



**İKİ VE ÜÇ BOYUTLU ÖKSETİK YAPILARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİTİK
OLARAK BELİRLENMESİ**

Şeydanur ERDEN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

2021

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İKİ VE ÜÇ BOYUTLU ÖKSETİK YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ANALİTİK OLARAK BELİRLENMESİ**

Şeydanur ERDEN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**İKİ VE ÜÇ BOYUTLU ÖKSETİK YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ANALİTİK OLARAK BELİRLENMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN danışmanlığında, Şeydanur ERDEN tarafından hazırlanan bu çalışma 21 / 01 / 2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman N. ORHAN	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

21 / 01 / 2021

Şeydanur ERDEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKİ VE ÜÇ BOYUTLU ÖKSETİK YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİTİK OLARAK BELİRLENMESİ

Şeydanur ERDEN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

Bu çalışmada, literatürde yer alan farklı öksetik yapıların mekanik özellikleri sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle analitik olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yeni ve özgün bir öksetik yapının tasarımı yapılmış ve mekanik özellikleri diğer mevcut yapılarla karşılaştırılmıştır. Re-entrant, Arrowhead, Lozenge Grids, Anti Tetrachiral ve Elliptic Holes isimli yapılarla birlikte RDN ismi verilen özgün öksetik yapı, iki ve üç boyutlu olarak modellenmiştir. Böylece, iki boyutlu toplam altı yapı, Re-entrant yapının beş farklı açılı değeriyle modellenmesiyle birlikte de toplam on farklı üç boyutlu yapı incelenmiştir. Yapıların Poisson oranları ve Direngenlik değerleri, iki boyutlu modellerde çekme etkisi, üç boyutlu modellerde ise hem çekme hem de basınç etkisinde ANSYS ortamında yapılan lineer analizlerden elde edilmiştir. Ayrıca, yapılarda oluşan gerilmeler dikkate alınarak, yapıların zayıf bölgeleri belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, iki boyutlu yapılarda en büyük negatif Poisson oranı ve Direngenlik değerleri Re-entrant yapıda elde edilmiştir. Üç boyutlu yapılarda ise en büyük negatif Poisson oranı Anti Tetrachiral yapısında, en büyük Direngenlik değeri ise 40° ile modellenen Re-entrant yapısında belirlenmiştir.

2021, 79 sayfa

Anahtar Kelimeler: Öksetik Malzeme, Sonlu Elemanlar Metodu, Poisson Oranı, Negatif Poisson Oranı

ABSTRACT

MS. Thesis

ANALYTICALLY DETERMINING THE MECHANICAL PROPERTIES OF 2D AND 3D AUXETIC MATERIALS

Şeydanur ERDEN

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Süleyman Nazif ORHAN

In this study, the mechanical properties of different auxetic materials that are used in literature are analyzed by the finite element method. Also, a novel auxetic material is designed and its mechanical properties compared with the other auxetic materials. The novel auxetic material called as RDN and the materials that are named Re-entrant, Arrowhead, Lozenge Grids, Anti Tetrachiral and Elliptic Holes are modelled in 2D and 3D. Thus, 6 materials in 2D and 10 different materials in 3D are analyzed. The Poisson's ratio and stiffness values of the materials, under the influence of tensile loading in 2D and tensile as well as compression in 3D, are obtained by the linear analysis in ANSYS. Moreover, by considering the stresses as in the materials, weak regions are determined. For in 2D, the highest negative Poisson's ratio and stiffness values are obtained by Re-entrant material. Among 3D materials, the highest negative Poisson's ratio is obtained by Anti Tetrachiral material, and the highest stiffness value is obtained by Re-entrant material with an internal angle of 40°.

2021, 79 page

Keywords: Auxetic Materials, Finite Element Method, Poisson Ratio, Negative Poisson Ratio

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmada, araştırmalarımı yönlendiren ve her türlü destek, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN’a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan aileme sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Şeydanur ERDEN
Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Poisson Oranı	2
1.2. Negatif Poisson Oranı (Öksetik Malzemeler)	3
1.2.1. Öksetik malzemelerin sınıflandırılması	4
1.2.1.1. Doğal Öksetik malzemeler	5
1.2.1.2. Yapay Öksetik malzemeler	6
1.2.2. Öksetik malzemelerin avantajları	7
1.2.3. Öksetik malzemelerin potansiyel kullanım alanları	7
1.2.3.1. Tekstil	8
1.2.3.2. Biyomedikal	8
1.2.3.3. Diğer kullanım alanları	11
2. KAYNAK ÖZETLERİ	13
3. MATERYAL ve YÖNTEM	23
3.2. Öksetik Yapıların Tasarımı ve Modellenmesi	24
3.2.1. İki boyutlu Öksetik yapıların modellenmesi	24
3.2.2. Üç boyutlu Öksetik yapıların modellenmesi	26
3.2.3. Özgün Öksetik yapının iki boyutlu olarak modellenmesi	29
3.2.4. Özgün Öksetik yapının üç boyutlu olarak modellenmesi	29
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	30
3.3.1. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi	31
3.3.2. Mesh boyutunun belirlenmesi	31
3.4. Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Parametreler	34
3.5. Sonlu Elemanlar Modellerinin Gerçeklemesi	36
3.5.1. İki boyutlu modellerin gerçeklemesi	36

3.5.2. Üç boyutlu modellerin gerçekleştirilmesi	38
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	42
4.1. İki Boyutlu Yapıların Sonlu Elemanlar Analizi Bulguları.....	42
4.2. Üç Boyutlu Yapıların Sonlu Elemanlar Analizi Bulguları	46
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR	57
EKLER.....	61
EK-1 İki boyutlu yapıların çekme etkisinde oluşan büyük ölçekli (Auto Scale) şekil değiştirme görüntüleri	61
EK-2 Üç boyutlu yapıların basınç ve çekme etkisinde oluşan büyük ölçekli (Auto Scale) şekil değiştirme görüntüleri.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ϵ	Birim Şekil Değişirme
ϵ_B	Boyuna Şekil Değişirme
ΔL	Boyca Uzama
ϵ_E	Enine Şekil Değişirme
GPa	Gigapascal
L	İlk Boy
T	Kayma Gerilmesi
Kg	Kilogram
F	Kuvvet
MPa	Megapascal
m	Metre
mm	Milimetre
N	Newton
ν	Poisson Oranı
σ_e	von Mises eşdeğer gerilmesi

Kısaltmalar

SE	Sonlu Elemanlar
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. (a) Öksetik olmayan davranış (b) Öksetik davranış.....	4
Şekil 1.2. Öksetik olmayan malzeme eğilme davranışı (b) Öksetik malzeme eğilme davranışı (Boakye 2019)	4
Şekil 1.3. Öksetik malzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılması (Alderson 1999)	5
Şekil 1.4. Magnox nükleer reaktör yapı (Alderson 1999).....	6
Şekil 1.5. (a) Re-entrant hücre modeli (b) Kayıp rib modeli (c) Chiral petek yapısı (d) Döner dörtgen yapıli menteşeler	7
Şekil 1.6. Patlamaya dayanıklı perde (Evans 2011).....	8
Şekil 1.7. Öksetik olmayan ve öksetik kan damarının deformasyon davranışının şematik gösterimi (Evans and Alderson, 2000).....	9
Şekil 1.8. Öksetik malzeme kullanan dilatör (Alderson 1999)	9
Şekil 1.9. Polimerik öksetik stent (Munib et al. 2015).....	10
Şekil 1.10. Öksetik malzemeden üretilen boyunluk (Panico et al. 2017)	10
Şekil 1.11. Öksetik köpük ile donatılmış spor kaskı (Foster 2018)	11
Şekil 1.12. Öksetik lamba tasarımı	11
Şekil 1.13. Marsta yaşam için şişirilebilen serbest biçimli kubbe (Lukovic et al. 2018).....	12
Şekil 3.1. Modelleme ve sonlu elemanlar analizlerinde yapılan işlemlerin akış şeması	23
Şekil 3.2. İki boyutlu modellerin detayları (a) Re-entrant (b) Arrowhead (c) Lozenge Grids (d) Anti Tetrachiral (e) Elliptic holes	26
Şekil 3.3. Üç boyutlu yapıların birim hücre ve genel görünüşleri (a) Re-entrant 50° (b) Arrowhead (c) Lozenge Grids (d) Anti Tetrachiral (e) Elliptic Holes	28
Şekil 3.4. Tasarlanan RDN modelin boyut detayı.....	29
Şekil 3.5. RDN modelin birim hücresi ve üç boyutlu genel görünüşü	30
Şekil 3.6. Yirmi düğüm noktasına sahip Hex Dominant eleman (Anonymous 2020d)..	31
Şekil 3.7. Direngenlik değerinin mesh boyutuna göre değişim grafiği	33
Şekil 3.8. Poisson oranının mesh boyutuna göre değişim grafiği	33
Şekil 3.9. İki boyutlu Re-entrant yapının mesh görüntüsü	34
Şekil 3.10. Üç Boyutlu Re-entrant yapının mesh görüntüsü.....	34
Şekil 3.11. Poisson oranı hesaplama noktaları (a) Arrowhead (b) Lozenge Grids	35
Şekil 3.12. İki boyutlu gerçekleştirme modelinin Solidworks görüntüsü	37
Şekil 3.13. İki boyutlu gerçekleştirme modelinin sınır şartları	37

Şekil 3.14. İki boyutlu gerçekleştirme modelinin sonlu elemanlar analizi görüntüsü	38
Şekil 3.15. Re-entrant 70° yapının Solidworks görüntüsü.....	38
Şekil 3.16. Re-entrant 40° modelde sınır şartları	39
Şekil 3.17. Re-entrant 40° modelin sonlu elemanlar görüntüsü	39
Şekil 3.18. Poisson oranının açıya göre değişim grafiği	40
Şekil 3.19. Gerilme- birim şekil değiştirme grafiği	41
Şekil 4.1. 2 boyutlu yapıların çekme etkisine dik doğrultudaki yer değiştirme değerleri (a) Re-entrant (b) Arrowhead (c) Lozenge Grids (d) Anti Tetrachiral (e) Elliptic Holes (f) RDN.....	43
Şekil 4.2. Re-entrant yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü	44
Şekil 4.3. Arrowhead yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü	44
Şekil 4.4. Lozenge Grids yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü	45
Şekil 4.5. Anti Tetrachiral yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü	45
Şekil 4.6. Elliptic Holes yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü	46
Şekil 4.7. RDN yapısının von Mises gerilme analizi görüntüsü	46
Şekil 4.8. Üç boyutlu numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	48
Şekil 4.9. Re-entrant yapının açı değerlerine göre kuvvet-şekil değiştirme grafiği	48
Şekil 4.10. Poisson oranının Re-entrant açı değerine göre değişim grafiği	49
Şekil 4.11. Üç boyutlu yapıların basınç etkisine dik yöndeki sonlu elemanlar görüntüsü (a) Arrowhead (b) Lozenge Grids (c) Anti Tetrachiral (d) Elliptic Holes (e) RDN	50
Şekil 4.12. Farklı açı değerlerindeki Re-entrant yapıların çekme etkisine dik yönde oluşan deformasyon SE analiz görüntüleri (a) 40° (b) 45° (c) 50° (d) 60° (e) 70° .	51
Şekil 4.13. Üç boyutlu yapılarda von Mises gerilim dağılımları (a) Arrowhead (b) Lozenge Grids (c) Anti Tetrachiral (d) Elliptic Holes (e) RDN	52
Şekil 4.14. (a) Re-entrant 45° von Mises dağılımı (b) Re-entrant 70° von Mises dağılımı	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Bazı malzemelerin Poisson oranları (Anonim 2020a).....	2
Çizelge 3.1. İki boyutlu modellerin ölçüleri	24
Çizelge 3.2. Üç boyutlu modellerin ölçüleri	27
Çizelge 3.3. Re-entrant yapının farklı açı değerlerine göre boyut ölçüleri.....	27
Çizelge 3.4. Özgün öksetik yapının iki boyutlu tasarımının ölçüleri.....	29
Çizelge 3.5. Özgün öksetik yapının üç boyutlu tasarımının ölçüleri	29
Çizelge 3.6. Analizde kullanılan malzeme özellikleri	31
Çizelge 3.7. Eleman kalitesinin Skewness değerine göre değişimi (Anonymous 2020d)	32
Çizelge 3.8. Yapıların Poisson oranları ile Skewness ve direngenlik değerlerinin mesh boyutuna göre değişimi	32
Çizelge 3.9. Re-entrant modellerin Poisson oranları	40
Çizelge 4.1. İki boyutlu modellerde elde edilen Poisson oranları, Direngenlik değerleri ve von Mises gerilmeleri.....	42
Çizelge 4.2. Basınç ve çekme etkisi altında Direngenlik ve Poisson değerleri	47
Çizelge 4.3. Re-entrant modellerin basınç ve çekmede Poisson oranları Direngenlik değerleri.....	47
Çizelge 4.4. Re-entrant yapının açı değerlerine göre von Mises gerilmeleri.....	53

1. GİRİŞ

Mühendislik alanında kullanılan malzemelerin birçok farklı mekanik özelliği bulunmaktadır. Malzemelerin kuvvet etkisi altındaki davranışını gösteren temel parametrelerden biri olan Poisson oranı da bu mekanik özelliklerin en önemlilerinden biridir. Poisson oranı basitçe “tek eksenli yükleme etkisindeki bir cisimde enine şekil değiştirmenin, boyuna şekil değiştirmeye oranı” olarak tanımlanabilir. Mühendislik malzemelerinin çoğunluğu pozitif Poisson oranı sahip olmakla birlikte, negatif Poisson oranına sahip doğal ve yapay malzemelerde bulunmaktadır. Negatif Poisson oranına sahip malzemelere özel olarak “öksetik (auxetic) malzeme” adı verilmekte, yapay olarak tasarlanmış geometriler ise “öksetik yapı” olarak adlandırılmaktadır.

Negatif Poisson oranlı malzemeler (öksetik malzemeler), pozitif Poisson oranına sahip malzemelerden farklı olarak özel deformasyon özelliği göstermektedirler. Negatif Poisson oranına sahip malzemeler pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin aksine, çekildikçe genişlemekte, basıldıkça daralmakta ve eğilme etkisi altında kubbe şeklini almaktadırlar. Bu farklı deformasyon özelliğinden dolayı öksetik malzemelerin farklı alanlarda (tekstil, biyomekanik, inşaat vb.) kullanılabilirliğine yönelik olarak, son yıllarda birçok farklı araştırma yapılmaktadır.

Bu çalışmada da literatürde bulunan farklı öksetik yapılar iki ve üç boyutlu olarak modellenerek, mekanik özellikleri Sonlu Elemanlar Yöntemiyle analitik olarak belirlenmiş, ayrıca özgün bir öksetik yapı tasarımı yapılarak mekanik özellikleri mevcut malzemelerle karşılaştırılmıştır. Literatürde var olan Re-entrant, Arrowhead, Lozenge Grids, Anti Tetrachiral ve Elliptic Holes isimli öksetik yapılar iki boyutlu ve birim hücre yöntemi kullanılarak üç boyutlu olarak Solidworks yazılımında modellenmiştir. Üç boyutlu Re-entrant yapının farklı açış değerleriyle modellenmesi ile birlikte toplam da 16 farklı öksetik yapı elde edilmiştir. Ayrıca, özel olarak tasarlanan ve “RDN” adı verilen öksetik yapı da iki ve üç boyutlu şekilde modellenmiştir. Tasarlanan iki boyutlu yapıların çekme etkisi altında, üç boyutlu yapıların ise hem çekme hem de basınç etkisi altında Poisson oranları ve Direngenlik değerleri ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan analizlerden elde edilmiştir. Ayrıca, modellerde elde edilen von Mises gerilmeleri dikkate alınarak, öksetik yapıların kritik kesitleri belirlenmiştir.

1.1. Poisson Oranı

Fransız matematikçi ve fizikçi Simeon Denis Poisson tarafından bulunan ve kendi adıyla anılan Poisson oranı günümüzde birçok mühendislik alanında kullanılan malzemelerin yapısını belirten önemli özelliklerden biridir. Her malzemenin kendine özgü Poisson oranı bulunmaktadır. Birçok farklı tanımlamanın yapıldığı Poisson oranı kısaca, eksenel çekme etkisindeki cisimlerde enine birim deformasyonun boyuna birim deformasyona oranı olarak tanımlanabilir. Poisson oranı pozitif olabildiği gibi negatif değerler de alabilmektedir. Mühendislik alanında kullanılan malzemelerin çoğu pozitif Poisson oranına sahiptir. Ancak, yakın geçmişte yapılan çalışmalar sonucunda bazı negatif Poisson oranına sahip doğal ve yapay malzemeler bulunmuştur. Poisson oranı, malzemeler için teorik olarak -1 ile 0,5 arasında değişim göstermektedir (Uzun 2017). Bazı malzemelerin Poisson oranları Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Bazı malzemelerin Poisson oranları (Anonim 2020a)

Malzeme	Poisson Oranı
Alüminyum	0,33
Bakır	0,36
Beton	0,1-0,2
Buz	0,33
Çelik	0,3
Gümüş	0,37
Kauçuk	0,48-0,50
Kurşun	0,43
PVC	0,35
Teflon	0,39
Magnezyum	0,35
Cam	0,24
Pirinç	0,33

1. GİRİŞ

Poisson oranı genel olarak Yunan nü (ν) sembolüyle belirtilir ve aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır:

$$\nu = -\frac{\epsilon_E}{\epsilon_B} \quad (1.1)$$

$$\epsilon_{enine} = \frac{\Delta L_x}{L_x} \quad \epsilon_{boyuna} = \frac{\Delta L_y}{L_y} \quad (1.2)$$

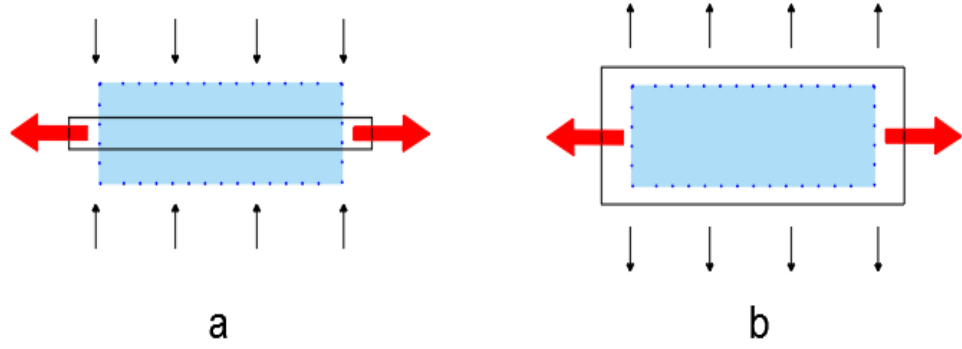
Burada;

ϵ	Birim Şekil Değiştirme
ϵ_E	Enine Birim Şekil Değiştirme
ϵ_B	Boyuna Birim Şekil Değiştirme
$\Delta L_x, \Delta L_y$	x ve y doğrultularında oluşan yer değiştirmeler
$L_x, L_y,$	x ve y doğrultularındaki ilk boylar

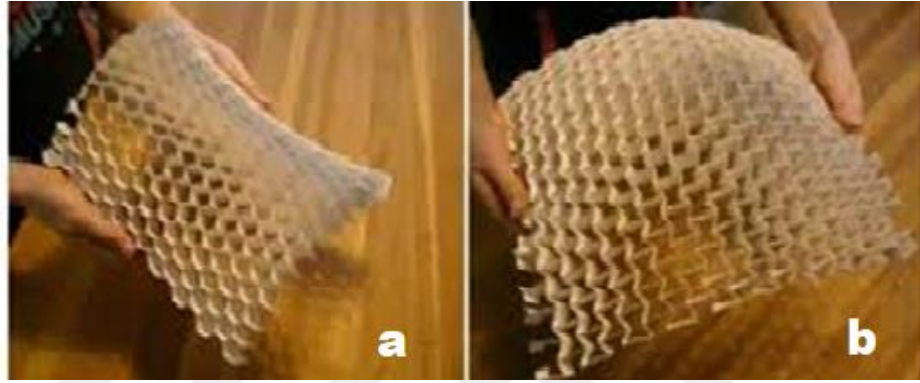
1.2. Negatif Poisson Oranı (Öksetik Malzemeler)

Mühendislikte kullanılan malzemelerin Poisson oranları genellikle pozitif olmasına rağmen negatif Poisson oranına sahip malzemeler de bulunmaktadır. Negatif Poisson oranına sahip malzemelere kısaca öksetik (auxetic) malzemeler denilmektedir. Auxetic kelimesi yunanca kökenli olup ‘auxetikos’ kelimesinden türemektedir ve kelime olarak ‘genişlemeye eğilimli’ anlamına gelmektedir. Bu kelime ilk olarak 1991 yılında yapılan çalışma sonucunda ‘negatif Poisson oranına sahip malzeme’ ifadesinden kaçınmak için kısaltma amacıyla önerilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. (Evans et al. 1991).

Öksetik malzemeler, pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin aksine çekildikçe genişler, basıldıkça daralır (Şekil 1.1) ve eğilme etkisinde kubbe şeklini alırlar (Şekil 1.2).



Şekil 1.1. (a) Öksetik olmayan davranış (b) Öksetik davranış

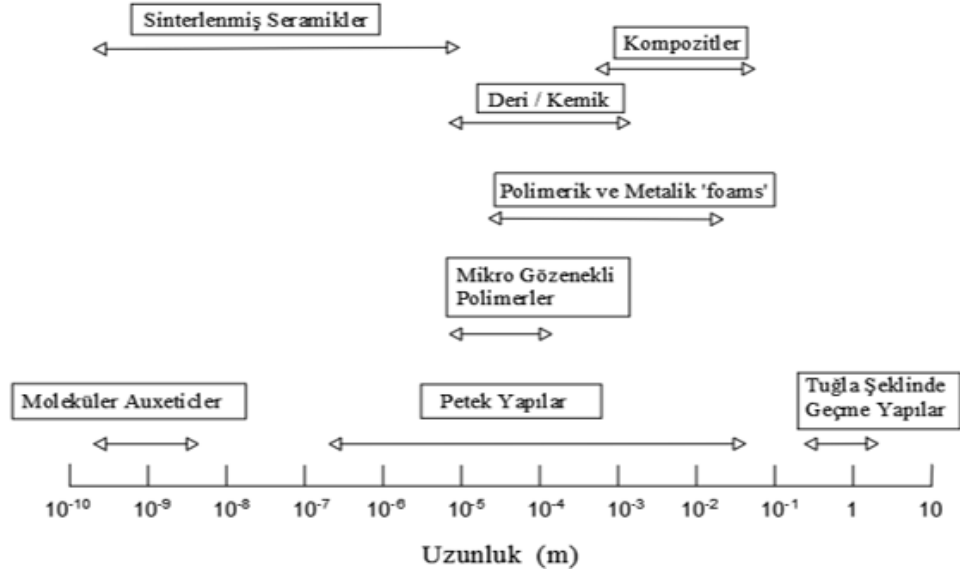


Şekil 1.2. Öksetik olmayan malzeme eğilme davranışı (b) Öksetik malzeme eğilme davranışı (Boakye 2019)

Negatif Poisson oranı özelliği, malzemenin doğal olarak yapısında olabileceği gibi malzemeye yapılan bazı işlemler sonucunda da kazandırılabilir. Bu özellik, malzemeye birçok artı değer ve üstün özellik katabilir. Sonradan öksetik özellik kazandırılan bir malzeme ilk olarak Rod Lakes tarafından 1980’li yıllarda Science dergisinde ‘foam (köpük) yapılar’ olarak yayınlanmıştır (Lakes 1987).

1.2.1. Öksetik malzemelerin sınıflandırılması

Öksetik malzemeler genel olarak sınıflandırıldığında doğal ve yapay olarak ikiye ayrılırlar. Ayrıca, bu malzemeler için büyüklüklerine göre de bir sınıflandırma yapılmaktadır (Şekil 1.3) (Alderson 1999).



Şekil 1.3. Öksetik malzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılması (Alderson 1999)

1.2.1.1. Doğal Öksetik malzemeler

1900'lü yılların başlarında bulunan demir sülfid, moleküler seviyedeki ilk doğal öksetik malzemedir (Love 1927). Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (itriyum baryum bakır oksit)'nin negatif Poisson oranına sahip olduğu tespit edilmiştir (Ledbetter and Lei 1991). Doğada kristal yapıda bulunan doğal öksetik malzemelere arsenik (Gunton and Saunders 1972) ve kadmiyum da (Li 1976) örnek olarak gösterilebilir.

Kedi derisi üzerinde yapılan bir çalışmada da (Veronda and Westmann 1970), deri dokusunun mekanik karakterizasyonu incelenmiş ve yapılan eksenel olmayan testler sonunda elde edilen verilerden kedi derisinin öksetik davranış gösterdiği doğrulanmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda da semender derisi (Frolich et al. 1994) ve inek meme derisinde (Lees et al. 1991) çift ve tek eksenli olarak Poisson oranı ölçülmüş ve negatif değerler elde edilmiştir.

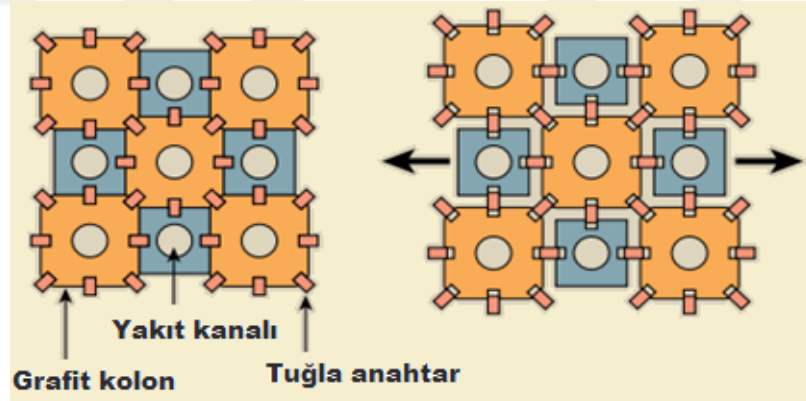
İnsan kaval kemiğinin süngerimsi kısmının anizotropik malzeme özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada da (Williams and Lewis 1982), süngerimsi kemiğin elastik sabitlerini tahmin etmeye yönelik deneysel gözlemlere dayalı bir sonlu eleman modeli önerilmiş ve bu kısmın negatif Poisson oranına sahip olduğu belirlenmiştir.

1.2.1.2. Yapay Öksetik malzemeler

Üretilen ilk hücresel yapay öksetik yapı, Gibson et al. tarafından 1982 yılında iki boyutlu silikon kauçuk (bal peteği) formunda tasarlanmıştır.

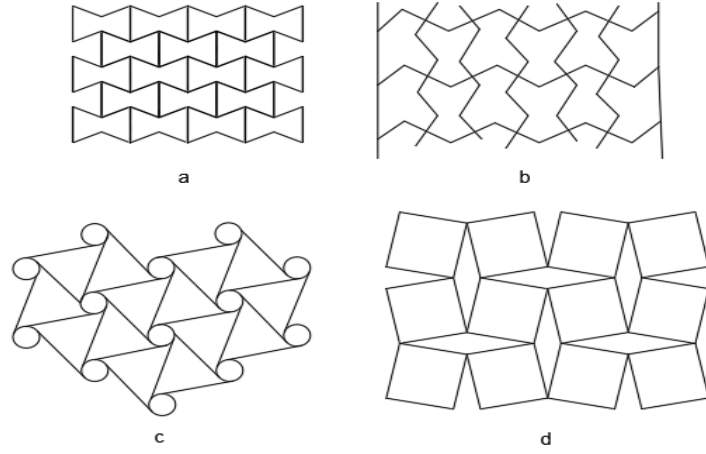
Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda “öksetik” petek yapılar üzerine birçok başarı elde edilmiştir. Örneğin, 1987’de poliüretan köpüklerin sıcaklık ve üç yönlü sıkıştırma sonucunda öksetik yapıya dönüştüğünü gösteren bir çalışma bu alanda yapılan çalışmalara büyük katkı sağlamıştır (Lakes 1987).

Birbirine geçmiş tuğla biçimindeki (keyed brick) yapılar (Şekil 1.4) nükleer Magnox reaktörler için tasarlanan makro boyuttaki “öksetik” yapılardır. Yapı, deprem sırasında oluşan kuvvetlerin yatay bileşenlerine dayanacak ve aynı zamanda grafit çekirdek ile çekirdeğin kenarlarındaki çelik destekleyici yapılar arasındaki farklı termal hareketleri barındırmak için yapının serbest hareketine izin verecek şekilde tasarlanmıştır (Alderson 1999).



Şekil 1.4. Magnox nükleer reaktör yapısı (Alderson 1999)

İnsan yapımı hücresel öksetik malzemelere örnek olarak re-entrant yapılar, kayıp rib modeli, chiral petek yapısı, döner birimler, yıldız şekilli yapılar verilebilir (Şekil 1.5). Bu düzenli şekiller haricinde düzensiz olarak öksetik yapılar üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır.



Şekil 1.5. (a) Re-entrant hücre modeli (b) Kayıp rib modeli (c) Chiral petek yapısı (d) Döner dörtgen yapılı menteşeler

1.2.2. Öksetik malzemelerin avantajları

Negatif Poisson oranına sahip malzemeler, pozitif Poisson oranına sahip malzemelerle kıyaslandığında birçok avantaja sahiptirler. Öksetik malzemelerin sahip olduğu bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Daha iyi sürtünme dayanımı
- Düşük yoğunluk
- Daha iyi enerji emme özelliği
- Sinklastik eğrilik
- Islak verimliliği
- Isıl darbe dayanımı
- Tutunma dayanımı
- Kopma dayanımı
- Daha iyi kayma modülü

1.2.3. Öksetik malzemelerin potansiyel kullanım alanları

Öksetik malzemeler geleneksel malzemelere kıyasla birçok avantajı bünyesinde barındırmaktadır. Bu avantajlardan dolayı kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Öksetik malzemelerle yapılan çalışmaların artması da kullanım alanlarında artışa neden olmaktadır.

1.2.3.1. Tekstil

Öksetik olduğu gösterilen yeni bir çift sarmallı ipliğin ve dokuma bir tekstil yapısında bu iplikten yapılan bir öksetik kompozitin kullanımını üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Bu, doğal olarak öksetik iplikler kullanılarak öksetik davranış sergilediği bildirilen ilk kompozittir. Daha da önemlisi hem iplik hem de kompozit standart üretim teknikleri kullanılarak üretilmiş ve bu nedenle potansiyel olarak çok çeşitli mühendislik uygulamalarında yararlı olmuştur (Miller et al. 2009).

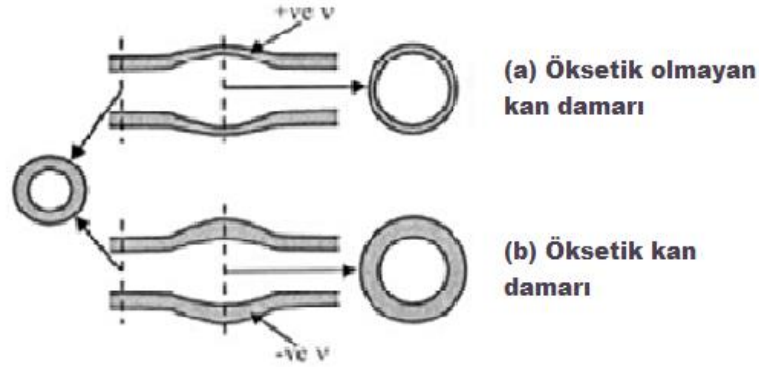
Tekstil alanında yapılan bir diğer çalışma da ise bomba patlamalarının etkilerinden daha iyi koruma sağlamak için gerildiğinde incelmeyen, kalınlaşan yeni tip patlamaya dayanıklı perde (Şekil 1.6) geliştirilmiştir (Evans 2011).



Şekil 1.6. Patlamaya dayanıklı perde (Evans 2011)

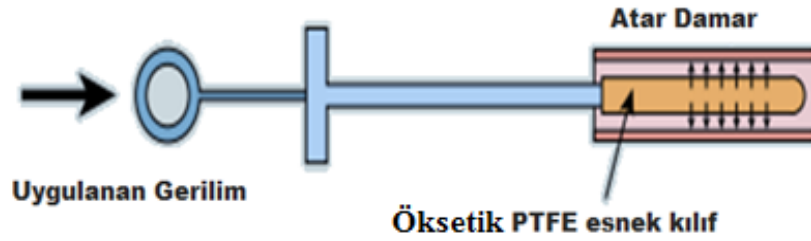
1.2.3.2. Biyomedikal

Öksetik malzemeler, biyomedikal alanında son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda birçok potansiyel kullanım alanına sahiptirler. Geleneksel malzemeden yapılmış kan damarında (Şekil 1.7), akan kan basıncına yanıt olarak damar açıldığında duvar kalınlığında bir azalma meydana gelebilir. Bu, duvar kalınlığında potansiyel olarak felaketle sonuçlanabilecek nihai bir yırtılmaya yol açabilir. Öksetik malzemeden yapılmış kan damarında ise akan kan basıncına yanıt olarak duvar kalınlığında artış olacaktır, böylece çeper incilmesi nedeniyle nihai yırtılmaya direnecektir (Evans and Alderson, 2000).



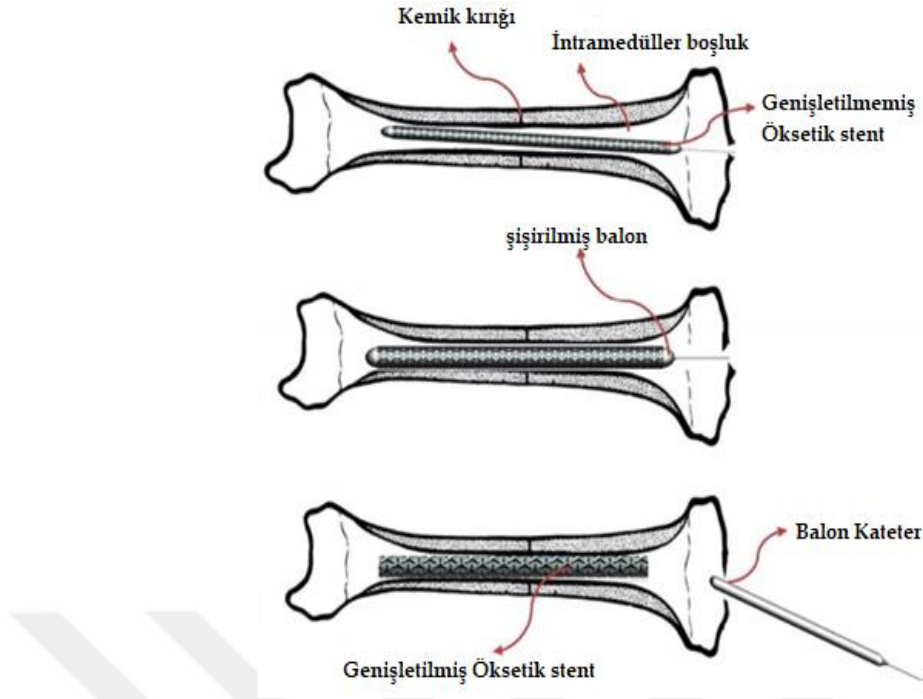
Şekil 1.7. Öksetik olmayan ve öksetik kan damarının deformasyon davranışının şematik gösterimi (Evans and Alderson, 2000)

Kalp cerrahisi ve ilgili prosedürlerde (Şekil 1.8) kullanılmak üzere bir arterin veya benzer bir damarın boşluğunu açmak için bir dilatör tasarlanmıştır. Arter, gerilim altındaki esnek bir öksetik PTFE içi boş çubuğun veya kılıfın yanıl genişlemesi ile açılır. Genişletilmiş bir PTFE arteriyel protezin özellikleri incelenmiş ve bir fibril poliüretan (PU) malzemeden üretilmiş olanlarla karşılaştırılmıştır. Her ikisi arasında belirgin şekilde farklı mekanik özellikler bulunmuştur (Moyers 1992).



Şekil 1.8. Öksetik malzeme kullanan dilatör (Alderson 1999)

Özel bir uygulama sistemi olmadan yerleştirilecek olan, oldukça küçük bir çapa sahip polimerik öksetik stent üretimi yapılmıştır (Şekil 1.9). Öksetik stenti hem radyal hem de uzunlamasına ekseninde plastik olarak deforme eden genişletilebilir balon kateter, cihazı oldukça küçük bir erişim noktasından intramedüller kanala yerleştirmek için kullanılabilir. Öksetik kemik stenti, kırılan kemiğe burulma desteği ve stabilite sağlayarak modüller kanalın şekline ve düzensizliklerine uyum sağlayabilir (Munib et al. 2015).



Şekil 1.9. Polimerik öksetik stent (Munib et al. 2015)

Öksetik malzeme kullanılarak esnek, dirençli, boynu tamamen örtmeyen dokusu sayesinde terleme yapmayan kişiye özel boyunluk üretilmiştir (Şekil 1.10). Boyunluğun geometrisi ve yapısal optimizasyonu kişiye özel boyun protezlerin elde edilebildiği dijital üretim teknolojileri sayesinde üretililebilecektir. Kişinin ağrı haritasını, yaka tasarımını, esnekliği ve kullanıcının koşullarına uyarlanmış desteği sunarak hastanın anatomik ve fizyolojik ihtiyaçlarını karşılayacağı ifade edilmiştir (Panico et al. 2017).



Şekil 1.10. Öksetik malzemedan üretilen boyunluk (Panico et al. 2017)

1.2.3.3. Diğer kullanım alanları

Spor kasklarıyla ilgili yapılan bir araştırmada öksetik kaskların kafa travmalarının önemli ölçüde önlediği belirtilmiştir. Öksetik köpük ile donatılmış kaskın (Şekil 1.11), geleneksel köpükle donatılardan daha fazla darbe şiddetini azaltabileceği belirtilmiştir (Foster 2018).



Şekil 1.11. Öksetik köpük ile donatılmış spor kaskı (Foster 2018)

Öksetik yapılar dekoratif amaçlarla kullanılmaktadır. Bu yapılarla farklı lamba tasarımı yapılmıştır (Şekil 1.12). Bu lambalar ışığın daha iyi yayılmasını ve ilginç gölge desenlerinin oluşmasını sağlamaktadır. (Anonymous 2020b).



Şekil 1.12. Öksetik lamba tasarımı

Yukarıda belirtilen kullanım alanlarının haricinde, Mars'ta olabilecek yaşam için yapısal tasarımlarda öksetik yapıların kullanımı planlanmaktadır (Şekil 1.13). Mars'taki atmosferik basınç Dünya'ninkinden 100 kat daha düşük olduğu için, yapıların iç kısmının basınçlandırılması gerekmektedir. Bu, düz bir şekilde kurulabilen şişirilebilir yapıların kullanımı düşük ağırlık ve yoğun depolamanın ek faydalarını sunmaktadır. Bu formdaki öksetik sistem zengin bir tasarım alanı da sunmaktadır (Lukovic et al. 2018).



Şekil 1.13. Marsta yaşam için şişirilebilen serbest biçimli kubbe (Lukovic et al. 2018)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Friis et al. (1988), geleneksel köpük malzemelerin hücre kaburgaları ile hücresel mimarilerini re-entrant köpük olacak şekilde dönüştürmüşlerdir. Negatif Poisson oranlarına sahip köpükler farklı teknik ve malzemeler kullanılarak hazırlanmış, mekanik davranışları ve yapıları değerlendirilmiştir. Re-entrant yapılara sahip köpüklerin, negatif Poisson oranlarının yanı sıra geleneksel köpüklerden daha yüksek esneklik sergiledikleri belirtilmiştir. Geleneksel köpüklerinin re-entrant köpüklere dönüştürmede üç yöntemin başarılı olduğu ifade edilmiştir. Bu yöntemlerden ilki üç eksenli sıkıştırma ve ardından termoplastik polimer köpükler için ısıtma işlemi, ikincisi ısıyla sertleşen polimer köpükler için köpürme işlemi sırasında üç eksenli sıkıştırma, üçüncüsü ise metal köpükler için üç yönde sıralı plastik sıkıştırma olduğu belirtilmiştir. Re-entrant köpüklerin Young modülleri geleneksel köpüklerden daha küçüktür ve negatif Poisson oranları sergilemişlerdir. Ayrıca re-entrant polimer köpüklerin, karşılık gelen geleneksel köpüklerden daha esnek olduğu tespit edilmiştir.

Chen and Lakes (1989), geleneksel ve negatif Poisson oranına sahip köpüksü malzemelerin burulma titreşimindeki dinamik dalga dağılımını deneysel olarak incelemişlerdir. Dinamik Elastisite modülü ve viskoelastik kayıp da deneysel verilerden elde edilmiştir. Sonuç olarak, köpüklü malzemelerin klasik elastiklik veya viskoelastisite teorisine uymadığı ifade edilmiştir. Negatif Poisson oranlarına sahip re-entrant köpüklerde kesme frekanslarının, türetildikleri geleneksel köpüklere göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. Tahmin edilen kesme frekansları, deneysel olarak gözlemlenenlerle karşılaştırılmıştır. Deneysel yöntemden elde edilen geleneksel köpüklerin kesme frekanslarının, temel bir köpük kiriş titreşimi modeline dayalı olarak tahmin edilenlerden biraz daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Choi and Lakes (1991), basınç uygulanarak takılan bağlantı elemanlarının tasarımında son zamanlarda geliştirilen negatif Poisson oranından yararlanmışlardır. Bağlantı elemanı, negatif Poisson oranına sahip malzemeden (bakır köpüğünden) yapılmış içi boş dairesel bir silindirik çekirdek ve karşılık gelen silindirik deliğe sahip bir yuvadan oluşmuştur. Bağlantı elemanı, radyal boyutta bir tolerans ile delikten daha büyük yapılmıştır. Bağlantı elemanına dik yerleştirme kuvveti uygulandığında negatif Poisson

oranı nedeniyle çapının (enine boyut) küçülmesi sağlanmıştır. Yeterli kuvvet uygulandığında ise çekirdek çapı delik çapına eşit olmuş ve çekirdek deliğe yerleştirilebilmiştir. Bağlantı elemanını çıkarmak için uygulanan aksenal kuvvet, göbeğin yanal olarak genişlemesine neden olmuş ve çıkarmaya direnen artan bir sürtünme kuvveti oluşturmuştur. Bağlantı elemanının yerleştirilmesi, negatif Poisson oranlı malzemelerin basınç altında sergilediği yanal daralma ile kolaylaştırılmıştır. Köpüklü malzeme, katı haldeki aynı malzemedan önemli ölçüde daha az sert ve daha az güçlü olduğundan dolayı negatif Poisson oranına sahip hücresel bağlantı elemanının mukavemetinin, aynı çaptaki katı bir vidanın gücünden daha az olduğu belirtilmiştir. Mukavemet farkının, kullanılan daha büyük çaplı bir bağlantı elemanı tasarlanarak telafi edilebileceği belirtilmiştir. Bastırarak geçirme tipi bağlantı elemanlarının, negatif Poisson oranlı malzemeler kullanılarak tasarlanabileceği ve bu tür bağlantı elemanlarının basit bir analizle tutarlı bir şekilde çalıştığı sonucuna varılmıştır.

Grima et al. (2005), iki boyutlu periyodik yapılar oluşturmak için birbirine bağlanan farklı dönme simetrisine sahip yıldız şeklindeki birimleri içerdikleri için "bağlantılı yıldızlar" olarak tanımlanabilecek yeni bir iki boyutlu periyodik yapı sınıfının öksetik davranış potansiyelini değerlendirmişlerdir. Analitik denklemlerin daha yerleşik (ve zahmetli) türetme yöntemlerine kıyasla bu tür sistemleri çok verimli ve nispeten kolay bir şekilde analiz etme imkânı sunduğundan bu çalışma EMUDA tekniği (kuvvet alanı moleküler modelleme simülasyonlarına dayanan bir analiz yöntemi) ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma iki açıdan oldukça önemlidir: Birincisi, bu "yıldız" içeren sistemlerin öksetik davranış için bir potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir. Özellikle, 6. ve 4. dereceden dönme simetrisine sahip yıldızlardan yapılan sistemlerin, 3. dereceden dönme simetrisine sahip sistemlerden daha büyük bir öksetik davranış sergileme potansiyeline sahip olduğu ifade edilmiştir. Poisson oranlarının büyüklüklerinin, yapının farklı çubuk elemanlarını birbirine bağlayan menteşelerin sertliğinden etkilendiğini ve menteşelerin sertliği değiştiğinde farklı sistemlerin farklı şekilde etkilendiği de belirtilmiştir. İkinci olarak, bu çalışma EMUDA tekniğinin uygulanan yükler altındaki periyodik yapıların davranışını incelemek ve özellikle bu tür sistemlerin öksetik olup olmadığını incelemek için uygulanma kolaylığı da gösterilmiştir. Özellikle, gerçek fiziksel modeller oluşturmaya veya analitik denklemler türetmeye gerek kalmadan hangi sistemlerin öksetik olarak en umut verici olduğu değerlendirmesi başarılı olmuştur, bu

nedenle bu sistemlerin analizi hızlandırılmış, çünkü en umut verici sistemlere diğerlerine göre öncelik verilmiştir.

Hou et al. (2012), kare bir kalıp içerisinde rastgele konumlara ve yönelimlere sahip öksetik birim hücrelerin gömülmesiyle oluşturulan 2D kompozit yapının sayısal çalışmasını yapmışlardır. Dört kompozit yapı, içerisine parametrik bir model aracılığıyla farklı sayıda ve rastgele yerleştirilen re-entrant birim hücrelerin genel malzemenin negatif Poisson oranı üzerindeki etkileri ve mekanik davranışları sonlu eleman yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Kompozitin içerisine gömülen birim hücrelerin sayısının azlığı ve yönelimi Poisson oranının pozitif olmasına sebep olmuştur. Bu nedenle kompozitin içerisine gömülen birim hücrelerin sayısının artması ile yüksek bir negatif Poisson oranı etkisi elde edilebileceği belirtilmiştir. Geliştirilen kompozit yapılar, bileşenlerinin malzeme özellikleri doğrusal elastik olmasına rağmen doğrusal olmayan mekanik davranış sergilemiştir. Kompozit içerisinde gömülü birim hücrelerin yoğunluğunun (sayısının) artması, yapının genel sertliğinde bir azalma meydana getirmesine rağmen boşluk alanının artması nedeniyle yapının ağırlığının azaldığı ifade edilmiştir.

Elipse and Lantada (2012), bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik araçlarıyla gerçekleştirilen iki boyutlu ve üç boyutlu öksetik geometrilerin karşılaştırmalı bir çalışmasını yapmışlardır. Farklı öksetik geometrilerin davranışı simüle edilmiştir ve Poisson oranları, elde edilebilen maksimum hacim veya alan azalmaları, eşdeğer Young modülü gibi bu geometrilerin ilgili özelliklerini göz önünde bulundurarak sistematik bir karşılaştırma yapılmıştır. Araştırmanın ilk bölümü, önceki inceleme yayınlarında, konferans bildirileri ve patentlerde yer alan bilgilere dayanarak veya bunlardan uyarlanan 7 üç boyutlu yapı ve 25 iki boyutlu yapı dahil olmak üzere, öksetik ve potansiyel olarak öksetik geometrilerden oluşan bir CAD kitaplığının geliştirilmesine odaklanmıştır. Poisson oranı, maksimum alan ve eşdeğer Young modülü dahil olmak üzere ilgili tasarım özelliklerini elde etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak toplam 32 potansiyel öksetik geometri tasarlanmıştır. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile 20 geometrinin öksetik davranışı doğrulanmış ve tipik olarak öksetik olarak belirtilen, ancak yanal genişleme, burkulma ve yapı çökmesi nedeniyle öksetik davranışı fiilen önlenen 6 geometri tespit edilmiştir.

Smardzewski (2013), öksetik sıkıştırma yaylarının modellerini tasarlamayı ve bunların döngüsel, uzun süreli statik yüklere karşı dirençlerini belirlemeyi amaçlamıştır. Ayrıca tasarlanan modellerin sertliğini belirlemek, elde edilen sonuçları sayısal hesaplamaların sonuçlarıyla karşılaştırmak ve yayların uzun vadeli, döngüsel ve statik yük koşullarında dayanıklılığını belirlemek istenmiştir. Öksetik malzemeden yapılmış bir koltukta gövde desteklenerek, iç kuvvetlerin vektörleri içe doğru yönlendirilmiş, istenmeyen sürtünme kuvvetleri ortadan kaldırılmış ve kullanıcı konforu artırılmıştır. Ayrıca yayların koltuğun ortasına doğru hareketi döşemede kullanılan kumaşın esnememesini sağlamıştır. Bu, köpüklü koltukların temel dezavantajını oluşturan kullanıcının gövdesi ile koltuk arasındaki yüksek sürtünme kuvvetlerini ortadan kaldırmıştır. Bu özelliklerinden dolayı, öksetik yaylar kullanılarak tasarlanan koltukların, geleneksel sistemlere göre yüksek kullanım konforu sağlayabileceği ifade edilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda tasarlanan yayın, poliüretan köpüklerin benzer sıkıştırma ve sertlik özelliklerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Döngüsel ve uzun süreli statik yüklerin yay yüksekliklerindeki değişiklikler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı; oturma konforu üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu ifade edilmiştir. Tartışılan çözümün ek bir avantajı olarak, poliüretan köpüklerin aksine, oturma ve yatma için mobilyalarda kullanılan öksetik yayların hava ve nem geçişi serbestliğini sağladığı ifade edilmiştir.

Subramani et al. (2014), cam elyaf takviyeli kompozit çubuklardan dört farklı öksetik yapı geliştirmiş, bunların negatif Poisson oranlarını ve çekme davranışlarını incelemiştir. Bu yapıların öksetik davranışları, görüntü tabanlı bir izleme yöntemi kullanılarak bir çekme test makinesinde incelenmiştir ve Poisson oranı her iki yön için de hesaplanmıştır. Analitik model kullanılarak hesaplanmış olan Poisson oranları, deneysel olarak belirlenen Poisson oranlarıyla karşılaştırılmıştır. Tüm yapıların negatif Poisson oranının yapısal açının başlangıç değerine bağlı olarak artış gösterdiği belirtilmiştir. Çekme davranışının da esas olarak ilk açığa bağlı olduğu gözlemlenmiş ve maksimum başlangıç açısına sahip yapı, en yüksek negatif Poisson oranını göstermiştir. Kırılma işinin, en büyük başlangıç açısı olan yapı için en yüksek seviyede olduğu yani bu yapının kırılması için diğer yapılara kıyasla daha yüksek enerji gerektiği ifade edilmiştir.

Zhang and Ghita (2015), düşük modüllü elastomerik çekirdek ve çift sarmal yapıda yüksek modüllü bir sarma elyafı olmak üzere iki liften oluşan kompozit yapı sarmal öksetik iplik (HAY) önermişlerdir. Kullanılan ipliğe üçüncü bir bileşenin (bir

kılıf) eklenmesi ile mevcut HAY'i daha fazla geliştirmeye çalışılmıştır. Kılıfın varlığının, sargının kayması ve HAY'nin üretimi sırasında daha önce karşılaşılan ilk sarma açısındaki tutarsızlık gibi problemlerin üstesinden gelmesi beklenmiştir. Geleneksel ve yeni sistemlerin öksetik performansı araştırılmış ve Poisson oran verileri sunulmuştur. Sonuçlar, negatif Poisson oranıyla 3 bileşenli bir yapıyı üretmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Öksetik davranışın, uygun bir kaplama tabakası ile azalmayacağı bununla birlikte, bir kaplama yöntemi nedeniyle öksetik etkinin büyüklüğünün azalabileceği ifade edilmiştir. 3 bileşenli bir öksetik kompozitin kaplama kalınlığının, Poisson oranını farklı potansiyel uygulamalara uyarlamak için yeni bir tasarım parametresi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Yang et al. (2015), hem büyük bir saptırma kiriş modeline hem de bir Timoshenko kiriş modeline dayalı olarak bir 3B re-entrant bal peteği öksetik hücresel yapısının analitik bir modelini oluşturmuştur. Hücresel yapının tüm ana yönlerde Young modülü, Poisson oranları ve akma dayanımı için analitik çözümler elde edilmiştir. Mevcut çalışmada, analitik model, geometrik tasarım parametreleri ile tam olarak belirlenen maksimum sapma açılarına sahip büyük bir sapma modeline dayanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra büyük sapma modelinin ve Timoshenko küçük sapma modelinin doğrulukları karşılaştırılmış ve re-entrant öksetik yapının geometrik parametrelerinin fonksiyonları olarak karakteristik davranışı belirlenmiştir. Teorik modellemeyi doğrulamak için, elektron demeti eritme (EBM) işlemi ile üretilen Ti6Al4V numuneleri ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Hücresel yapıların eklemeli üretimi (DFAM) tasarımına yönelik tartışmaları daha da genişletmek için sonuç karşılaştırması sırasında üretim özelliklerinin getirdiği modelleme sorunları ve sınır etkileri dikkate alınmıştır. Sonuçlar, deney ve sonlu eleman analizi ile karşılaştırılmış ve analitik modelin, imalatla ilgili faktörler modele yeterince dahil edildiğinde öksetik hücresel yapıların performansının tahmininde uygun ve nispeten doğru bir yöntem sağladığı doğrulanmıştır. Karakteristik dikme oranı H / L ve re-entrant açısı Θ her ikisi de re-entrant petek yapısının mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu belirtilmiştir. Bu mekanik özellikler ile geometrik parametreler arasındaki ilişkiler, tasarım denklemleriyle tam olarak belirlenebileceği ifade edilmiştir. Hem deneyler hem de simülasyonlar kullanılarak, re-entrant bal peteği öksetik hücresel yapısının mekanik özellikleri doğrulanmıştır. Yapıların Poisson oranları tahmin edilenle aynı eğilimleri göstermiştir. Tasarlanan bu re-entrant öksetik yapının, birim hücre sayısına nispeten az duyarlı olduğu belirtilmiştir. Birim hücrelerin sayısı 3'ten

büyük veya eşit olduğunda, boyut etkisi etkili bir şekilde ihmâl edilebilecektir. Bu, özellikle genel bileşen boyutu nedeniyle birim hücre sayısının kısıtlandığı birçok pratik tasarım uygulaması için kullanışlı olabilecektir.

Karaca (2016) kalp damar stentinin dokusu için öksetik bir yapı elde etmeye çalışmış ve üretilmesini planlamıştır. Öksetik yapının geliştirilmesi için tasarlanan ilk öksetik yapının hücre ölçüleri %40 oranında büyütülerek ve küçülterek toplamda 3 numune üretilmiştir. Bu numunelerin iki katı kalınlığında 3 farklı numune daha üretilmiştir. Testlerin dışında sonlu elemanlar analizleri yapılarak karşılaştırılmalar yapılmıştır. Gerçek deneyler ile karşılaştırılan simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu belirtilmiştir. Öksetik yapılarda büyük bir şekil değişiminin gerçekleşmesinin, yapının büyük bir Poisson oranına sahip olduğu anlamına gelmediği belirtilmiştir.

Chen and Fu (2017), 3 boyutlu klasik re-entrant bal peteği tasarımı üzerinden geliştirmeler yaparak yeni modifiye edilmiş bir yapı tasarlamışlardır. Re-entrant bal peteğinin geliştirilmiş bir tasarımı olarak görülen yapının elastik davranışının ve bunun geometrik parametrelere bağımlılığının daha derin bir şekilde anlaşılması için teorik ve sayısal analizin bir kombinasyonu gerçekleştirilmiştir. Yeni yapı, negatif Poisson oranı özelliği gösterdiği analitik ve sayısal olarak kanıtlanmıştır. Yeni 3 boyutlu yapının, tipik bir re-entrant bal peteğine kıyasla daha iyi bir negatif Poisson oranına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Destek uzunlukları, geri dönüş açıları, destek kalınlıkları dahil geometrik parametreler yeni yapının mekanik davranışını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca yapının, tipik re-entrant bal peteğine kıyasla tasarımda daha fazla esnekliğe sahip bir yapı olduğu gösterilmiştir.

Işıltan (2017), negatif Poisson oranına sahip yeni bir 3 boyutlu mikro-kafes yapı tasarımı ve bununla ilgili analizler yapmıştır. 2 boyutlu ve 3 boyutlu mikro kafes yapı numunelerinin analizler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak basınç etkisi altında Poisson oranı ile kesit çapı arasında doğru ilişki olmadığı gözlemlenmiştir. Kesit çapı arttıkça, yapının dayanabildiği kuvvet değerinde artış gözlenmiştir ve böylece sisteminin basınç etkisine karşı mukavemet kazandığı belirtilmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu mikro-kafes yapılar karşılaştırıldığında ise, üç boyutlu yapı rijitliğinin daha fazla

olmasından ötürü kuvvet dağılımının, iki boyutlu yapıya göre daha düzgün olduğu söylenmiştir.

Zahra and Dhanasekar (2017), polimer çimento harçlı kalıba gömülü öksetik köpüğüne sahip kompozitlerin deformasyon davranışını deneysel olarak değerlendirmiş ve yaygın olarak kullanılan fiberglas ağ katmanları (pozitif Poisson oranı gösteren) içeren harç kompozitleriyle karşılaştırmışlardır. Araştırmanın deneysel aşamasında iki sınıf öksetik köpük kullanılmıştır; ikisi de pahalı olmayan poliüretan köpüklerden, literatürde önerilen termo-mekanik bir işlem kullanılarak üretilmiştir. Harç-öksetik köpük numunelerinin geliştirilmesi için, iki farklı öksetik köpük yerleşimi incelenmiştir. İlk olarak öksetik köpük tabakalarını dış uçlara gömerek ve ikinci olarak köpüğü ortaya yerleştirerek inceleme yapılmıştır. Ayrıca, iki farklı tipte fiberglas ağı kompozitler de geliştirilmiş ve toplam altmış numune test edilmiştir. Öksetik köpük gömülü polimer çimento kalıp prizmalarının ara yüzey delaminasyonu tamamen ortadan kaldırıldığı için geleneksel fiberglas ağ gömülü polimer çimento kalıp prizmalarından daha üstün olduğu gösterilmiştir. Poisson oranı ve deneysel gerilme-şekil değiştirme sonuçları sonlu eleman modelleriyle doğrulanmıştır. Harcın ve öksetik köpüğün kalınlığının değişimi de sayısal olarak incelenmiştir. Harcın ortasındaki öksetik köpük gömülmesinin mukavemet ve Poisson oranı açısından yararlı olmadığı görülmüştür. Harç-fiberglas ağ kompozitlerin mukavemeti, öksetik köpüğünkine kıyasla daha yüksek olmasına rağmen delaminasyon hatası gözlenmiştir.

Ma et al. (2018), yeni 4 farklı kiral tip silindirik kabuklar tasarlamış ve 3D baskı yöntemi ile üretmiştir. Silindirik kabuğun mekanik ve deformasyon özelliklerini çeşitli kiral tip hücrelerle araştırmak için teorik analiz, sonlu eleman analizi ve yarı statik eksenel basma testleri yapılmıştır. Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayalı olarak çıkarılan analitik formüllerden, sıkıştırma modülü için ortalama sapmanın %5 in altında olduğu belirtilmiştir. Kiral silindirik kabukların, tüm kabuk tipleri arasında en iyi basınç modülünü ve mukavemetini gösterdiği ifade edilmiştir.

Hu et al. (2018), ABS polimerden üretilen re-entrant anti-trichiral peteklerin yarı-statik mekanik özelliklerini farklı deformasyonlar altında hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir. Çeşitli uzunluklarda bağlara sahip tekrar girişli anti-trikiral bal

peteği numuneleri, elastik-plastik malzeme olan ABS polimerin her bir parçasından lazer kesim tekniği ile üretilmiştir. Daha sonra bal peteği numuneleri üzerinde büyük deformasyonlu yarı statik sıkıştırma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda re-entrant anti-trichiral bal peteğinin çökmesine, silindirlerin sert dönüşü, bağların plastik menteşeler etrafında dönmesi ve bağların bükülmesinin baskın olduğu ortaya çıkarılmıştır. Deneylerde sergilenen hücre yapılarının deformasyon mekanizmasına bağlı olarak bal peteğinin çökme süreci birkaç aşamaya ayrılmıştır. Analitik tahminlerin deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Bal peteğinin ezilme geriliminin global gerilme ve hücre-duvar kalınlığı ile arttığı, bağ-uzunluk oranı ile azaldığı ortaya çıkarılmıştır.

Rad et al. (2019), 3 boyutlu birim hücresel ve çoklu birleşim halinde öksetik re-entrant yapısının hücre duvar açısını, duvar kalınlığını, duvar uzunluğunu değiştirerek sonlu elemanlar analizi ile öksetik özelliklerinin değişimlerini karşılaştırmışlardır. Öksetik yapıda yapılan bu değişikliklerin malzemenin öksetik özelliğini kaybettirmediği için istenilen özelliklerde malzeme tasarlatılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca hücre duvarı açısının negatif Poisson oranı ile doğru orantılı olduğu belirtilmiştir.

Rad et al. (2019), deneysel ve sayısal yöntemlerle yarı-statik ve dinamik yüklere maruz kalan farklı hücresel öksetik yapıların enerji soğurma kabiliyetinin birim hücre üzerindeki etkisini ele almışlardır. Çeşitli yapılar arasında, bir öksetik malzemenin temel özelliklerini bünyesinde barındırmasından dolayı bir re-entrant yapısı seçilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde deneysel testlerle doğrulandığı ifade edilen ABAQUS yazılımını kullanılmıştır. Farklı geometrik parametrelere sahip re-entrant yapıları modellenmiş ve geleneksel olanlarla karşılaştırılmıştır. Öksetik malzemelerin enerji soğurma kabiliyetine etkisini değerlendirmek için 3 boyutlu yazıcıyla ürettiği farklı yapılar üzerinde standart sıkıştırma testleri gerçekleştirilmiştir. Öksetik yapıların, yarı-statik eksenel darbe yüklerine dayanma kabiliyetleri nedeniyle incelenen tüm darbe direnci ve enerji soğurma göstergeleri açısından öksetik olmayan yapılardan üstün olduğu keşfedilmiştir. Enerji soğurma kapasitesinin değerlendirilmesi için öksetik birim hücrelerin geometrik özelliklerinin parametrik çalışması, gelecekteki çalışmalarda daha fazla uygulanabileceği ifade edilmiştir.

Çava (2019), 2 farklı sandviç numunelere (bal peteği ve re-entrant) basma testi ve eğilme testi yapmıştır. Hücresel desene sahip çekirdek malzemelerin, öksetik desene sahip çekirdek malzemelere göre daha yüksek düzlem içi ve düzlem dışı basma dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir. Bal peteği deseni düzlem dışı basma testinde en yüksek, düzlem içi basma testinde ise en düşük basma gerilim değerini göstermiştir. Bal peteği ve re-entrant desene sahip çekirdek malzemelerin hücre duvar kalınlığının artması basma ve eğme dayanımını artırmıştır. Bal peteği ve re-entrant desene sahip çekirdek malzemelerin hücre duvar uzunluğunun artmasının basma ve eğme dayanımını azalttığı belirlenmiştir. Re-entrant deseni bal peteği desenine göre hem düzlem içi hem de düzlem dışı basma testinde daha yüksek basma gerilim değeri göstermiştir.

Yutai Su et al. (2020), iki boyutlu klasik re-entrant modele ek yumuşak kemer benzeri kiriş ve menteşeler eklenerek yeni bir yapı önermiş ve hem deneysel hem de simülasyon yaklaşımlarını karşılaştırmışlardır. Menteşenin mukavemeti düşük tutulursa kirişin burkulma sorununun önemli ölçüde azaltılabileceğini ve artan sertliğe bağlı olarak öksetik davranışın azaltılmasının da en aza indirilebileceğini belirtmiştir. Bu nedenden dolayı sertliği artırmak için farklı Young modülüne sahip ek kemer benzeri kaburgalar eklenirken burkulma sorununu ortadan kaldırmak için ise menteşe bölgelerine yumuşak malzeme tanımlanmıştır. Simülasyon sonuçlarının, 3B yazdırılmış örnekleri üzerindeki test sonuçları ile iyi bir şekilde desteklendiği belirtilmiştir.

Vijayavenkataraman et al. (2020), metalik kemik implantlarının gerilme kalkanı ve iyileşme sırasında kırık bölgesinin yer değiştirmesinden kaynaklanan problemlerin üstesinden gelmek için öksetik yapıların dahil edilmesiyle yeni bir kemik plakası tasarımı önermişlerdir. Tasarlanan re-entrant yapıları kemik plakalarının, geleneksel kemik plakası tasarımından daha yüksek eğilme mukavemetine, daha düşük eğilme sertliğine ve çok daha yumuşak bir bükülmeye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, öksetik yapıların kemik plakası tasarımına dahil edilmesinin, gerilme kalkanını azaltmak, ameliyat sırasında bükülmeye yardımcı olmak ve kemik iyileşme sürecini arttırmak için etkili bir çözüm olabileceği belirtilmiştir.

Ahmet and Wang (2020), re-entrant ve eğimli sinüzoidal kiriş yapısına sahip öksetik malzemeleri 3 boyutlu baskı tekniği ile imal etmiş ve daha sonra aralarındaki

deformasyon ve gerilme şekil değiştirme bağıntısı farkını araştırmak için yarı statik basınç testleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda öksetik re-entrant numunelerinin, basınç yükü altında kararsız deformasyon modu gösterdiği belirtilmiştir. Basınç altında re-entrant numune için çift V kırılma modu gözlenirken, eğimli sinüzoidal giriş yapısı için katman katman çökme gerçekleştiği gözlenmiştir. Öksetik eğimli örneklerin, öksetik re-entrant örneklerle göre daha kararlı basınç deformasyonu ve sıkıştırmaya karşı daha yüksek direnç gösterdiği belirtilmiştir.

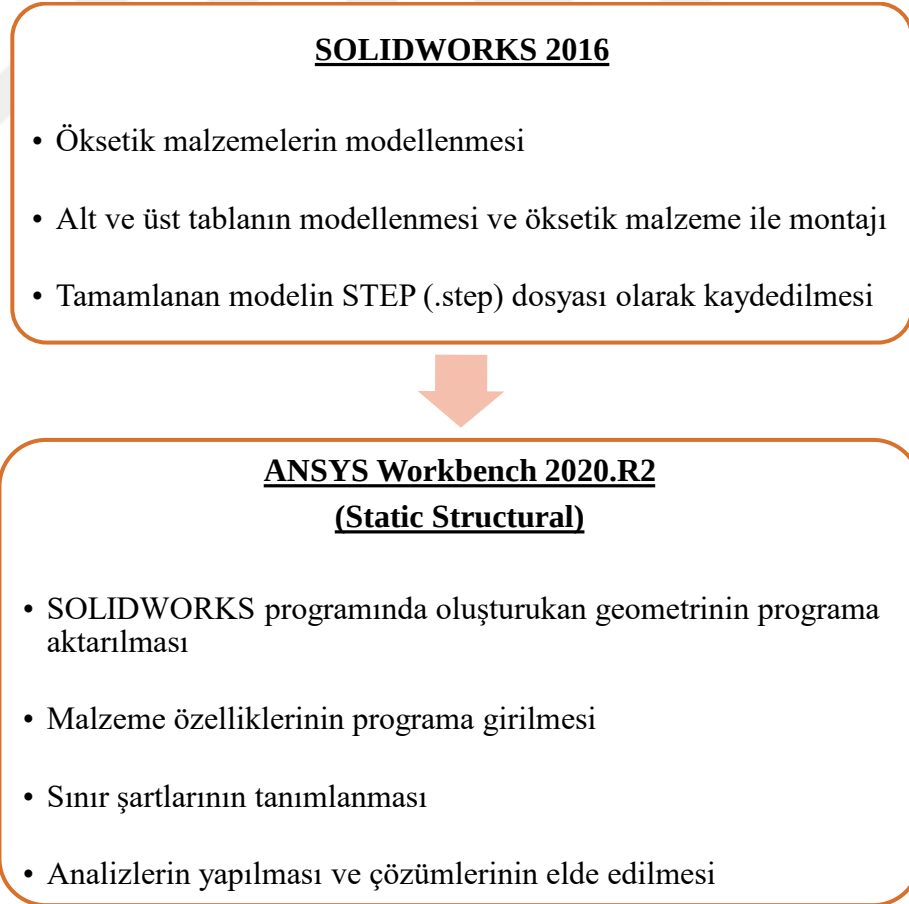
Khan et al. (2020), klasik öksetik modelin birim hücrelerine ek elemanlar ekleyerek yapının elastik özelliklerini geliştirmek amacıyla yeni modifiye edilmiş analitik re-entrant petek modeli önermişlerdir. Re-entrant petek modeline ilave eleman eklemek, nispi yoğunluğu düşük tutarken yapının negatif Poisson oranının artmasına yardımcı olması sağlanmıştır. Önerilen modelin parça uzunluklarının değiştirilerek parametrik olarak optimize edilebileceği belirtilmiştir. Önerilen model analitik olarak değerlendirilmiş ve öksetik davranışında artış olduğu sonucuna varılmıştır.

Wu et al. (2020), standart pnömatik lastiğin pnömatik parçalarını gradyan öksetik bir yapı olan anti-tetrachiral yapı ile değiştirerek yeni bir tip pnömatik olmayan lastik tasarlamışlardır. İlk olarak, farklı gradyan faktörlerine sahip anti-tetrachiral yapıların düzlem içi mekanik özellikleri deney, sonlu elemanlar yöntemi ve teori ile incelenmiştir. Bundan yola çıkarak, pnömatik olmayan lastiğin yapısal tasarımı yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile sıkıştırma yükü altındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak gradyan anti tetrachiral yapının ve pnömatik olmayan lastiğin deformasyon modunda belirli benzerliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda gradyan anti-tetrachiral yapıya sahip pnömatik olmayan lastiğin iyi bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak, literatürde en çok kullanılan beş farklı öksetik yapı Solidworks programında iki ve üç boyutlu olacak şekilde tasarlanmış ve boyut parametreleri sunulmuştur. Daha sonra tasarımı yapılan özgün öksetik yapının iki ve üç boyutlu tasarım parametreleri verilmiştir. İkinci kısımda ise sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan sınır şartları ve malzeme özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca kullanılacak mesh parametresini belirlemek amacıyla yapılan mesh çalışması sunulmuştur. Son bölümde ise sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan iki ve üç boyutlu modellerin yapılan analizleri verilmiş ve elde edilen sonuçların literatürle karşılaştırılması yapılmıştır.

Tez kapsamında yapılan analizlerin akış şeması ana hatlarıyla Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Modelleme ve sonlu elemanlar analizlerinde yapılan işlemlerin akış şeması

3.2. Öksetik Yapıların Tasarımı ve Modellenmesi

Çalışma kapsamındaki öksetik davranış gösteren yapılar modellenirken iki ve üç boyutlu hücresel elemanlar kullanılmıştır. Hücresel öksetik elemanlar geometrik yapılarından dolayı negatif Poisson özelliği göstermektedir.

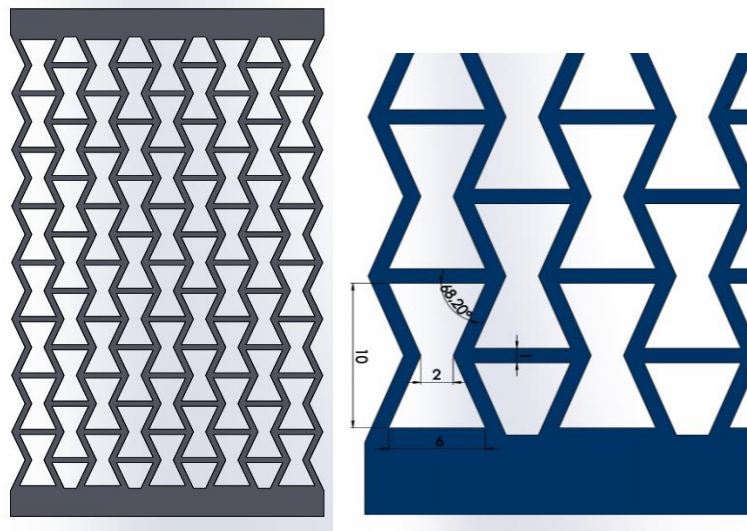
3.2.1. İki boyutlu Öksetik yapıların modellenmesi

İki boyutlu beş farklı tasarım Solidworks yazılımında oluşturulmuştur. Bu tasarımlar Re-entrant, Arrowhead, Lozenge Grids, Anti Tetrachiral ve Elliptic Holes modelleridir. Öksetik yapılar belirlenirken literatürde en çok kullanılan yapılar ve kullanılan boyutları dikkate alınmaya çalışılmıştır (Sree et al. 2020). Bütün yapıların boyutlarının birbirine yakın olmasına önem gösterilmiştir. Tasarımların geometrik farklılıklarından dolayı aynı ölçüler kullanılamamıştır. Modellerin Poisson oranı ve Direngenlik değerleri arasında bir karşılaştırma yapabilmek adına aynı boyutlarda tasarlanan yapıların boşluk oranlarının farklılıklarından dolayı dolu hacimleri de dikkate alınmıştır. Tasarlanan 2 boyutlu öksetik yapıların ölçü detayları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

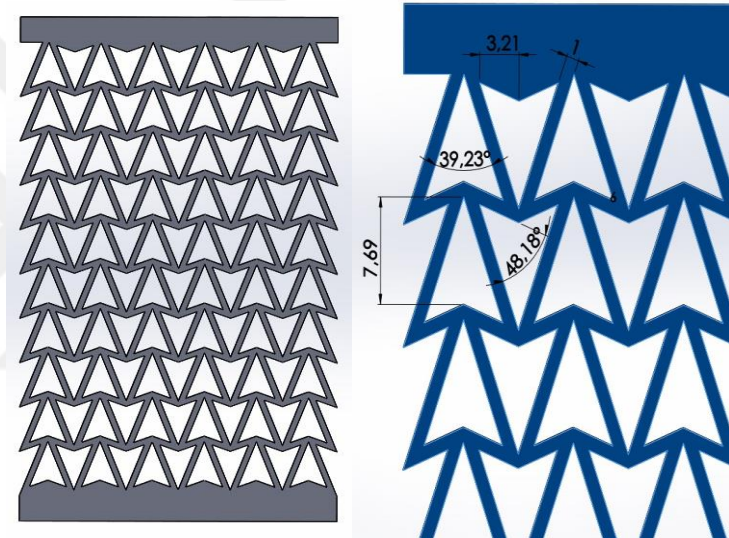
Çizelge 3.1. İki boyutlu modellerin ölçüleri

Numuneler	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Hacim (mm ³)
Re-entrant	2	99	51,18	3.915
Arrowhead	2	99,71	54,65	4.811
Lozenge Grids	2	97,69	59,69	4.777
Anti Tetrachiral	2	95	67	4.706
Elliptic Holes	2	99,7	49,84	5.409

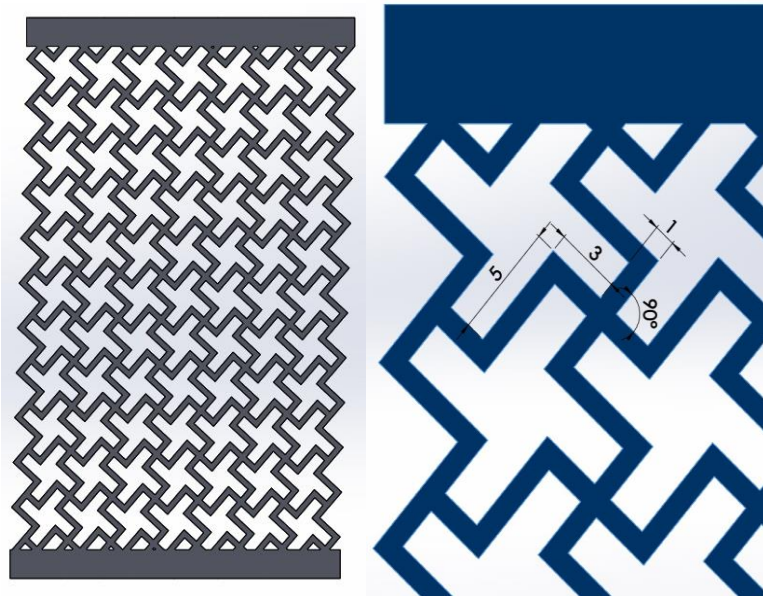
Tüm numunelerin kalınlıkları eşit olacak şekilde 2 mm seçilmiştir. Tasarlanan iki boyutlu modellerin açısı ve diğer boyut ölçülendirmeleri ayrıntılı olarak Şekil 3.2’de toplu olarak verilmiştir.



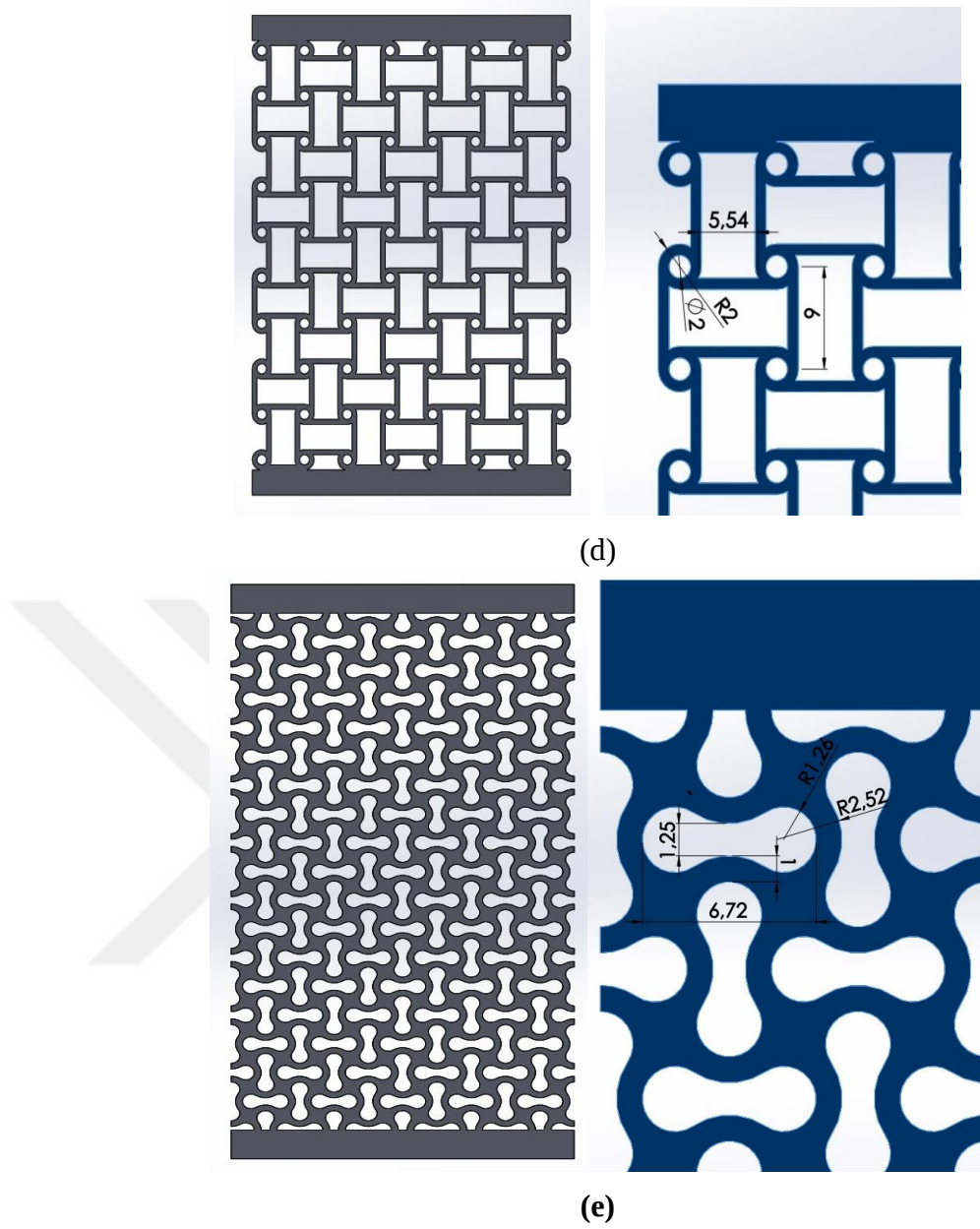
(a)



(b)



(c)



Şekil 3.2. İki boyutlu modellerin detayları (a) Re-entrant (b) Arrowhead (c) Lozenge Grids (d) Anti Tetrachiral (e) Elliptic holes

3.2.2. Üç boyutlu Öksetik yapıların modellenmesi

İki boyutlu olarak tasarlanan (Arrowhead, Lozenge Grids, Anti Tetrachiral, Elliptic Holes) yapıların tamamı birim hücre yöntemi ile üç boyutlu şekilde yeniden tasarlanmıştır. Klasik öksetik yapılardan olan Re-entrant yapı beş farklı açı değeri (40° , 45° , 50° , 60° , 70°) kullanılarak tasarlanmış ayrıca veriler elde edilmiştir. Tasarlanan üç boyutlu öksetik yapıların boyutları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Üç boyutlu modellerin ölçüleri

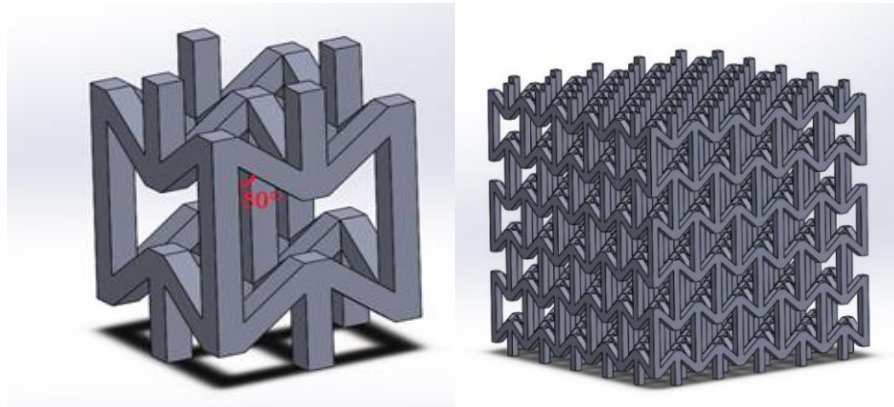
Numuneler	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Hacim (mm ³)
Arrowhead	98,84	88	88	38.270
Lozenge Grids	95	78,5	78,5	16.104
Anti Tetrachiral	72	70,5	70,5	7.171
Elliptic Holes	81	81	81	44.417

Farklı açı değerleri ile modellenen üç boyutlu Re-entrant yapıların boyutları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

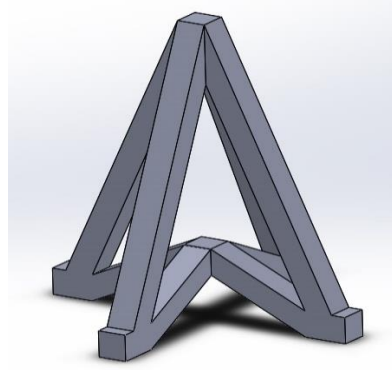
Çizelge 3.3. Re-entrant yapının farklı açı değerlerine göre boyut ölçüleri

Re-entrant Açı	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Hacim (mm ³)
40°	59,23	53,21	53,21	41.425
45°	62,06	58,36	58,36	42.598
50°	65,15	63,07	63,07	43.533
60°	74,06	71,07	71,07	45.305
70°	79,58	76,97	76,97	45.845

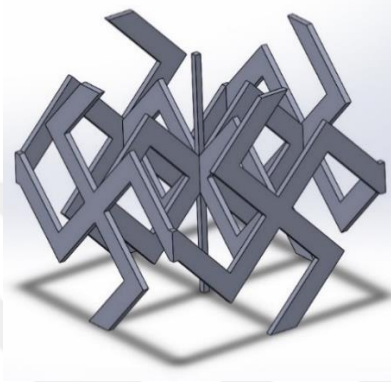
3 boyutlu çizim yapılırken öncelikle birim hücre tasarımı yapılmıştır. Daha sonra tasarlanan birim hücrelerin çoğaltılmasıyla 3 boyutlu yapılar oluşturulmuştur. Tasarlanan tüm 3 boyutlu yapıların birim hücre ve genel görünümü Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



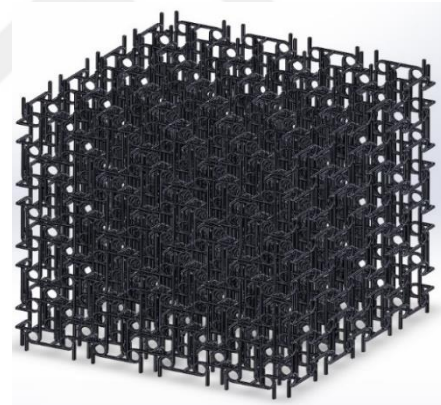
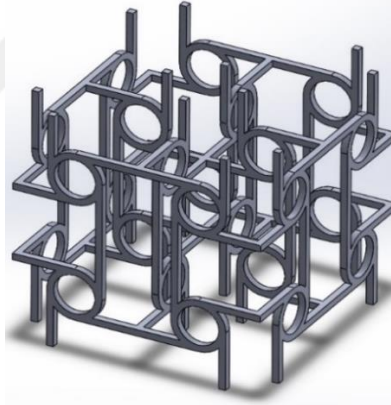
(a)



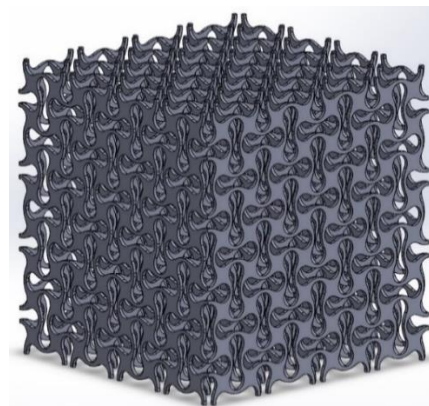
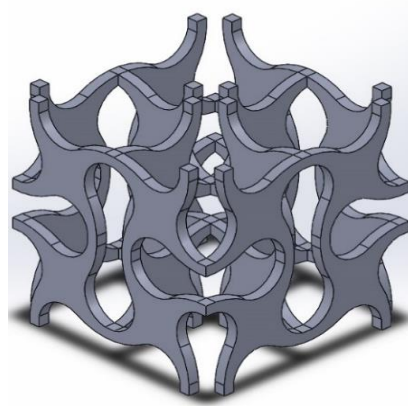
(b)



(c)



(d)



(e)

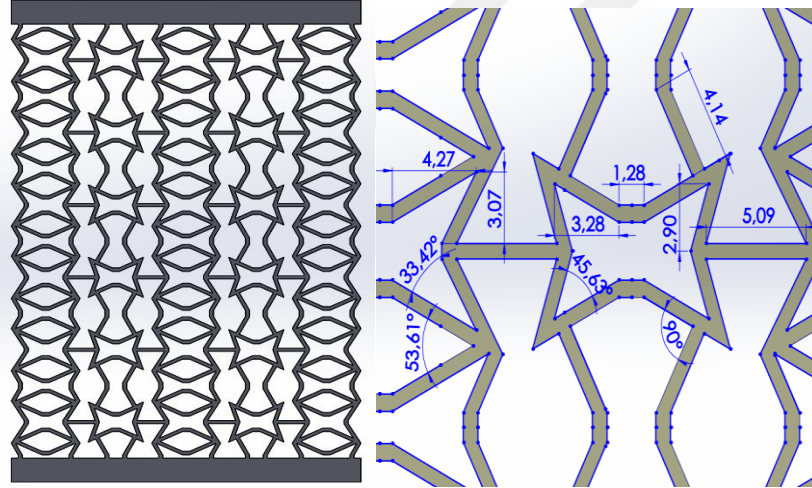
Şekil 3.3. Üç boyutlu yapıların birim hücre ve genel görünüşleri (a) Re-entrant 50° (b) Arrowhead (c) Lozenge Grids (d) Anti Tetrachiral (e) Elliptic Holes

3.2.3. Özgün Öksetik yapının iki boyutlu olarak modellenmesi

Mevcut öksetik yapılardan farklı olarak özgün bir öksetik yapının tasarımı öncelikle iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Yeni tasarlanan bu modele “RDN” adı verilmiştir. Tasarlanan RDN modelin analiz sonuçları diğer yapıların analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan RDN yapının boyut ölçüleri Çizelge 3.4’te, genel görünüş ve boyut detayları ayrıntılı olarak Şekil 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Özgün öksetik yapının iki boyutlu tasarımının ölçüleri

Model	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Hacim (mm ³)
RDN	2	100,89	63,82	4.235



Şekil 3.4. Tasarlanan RDN modelin boyut detayı

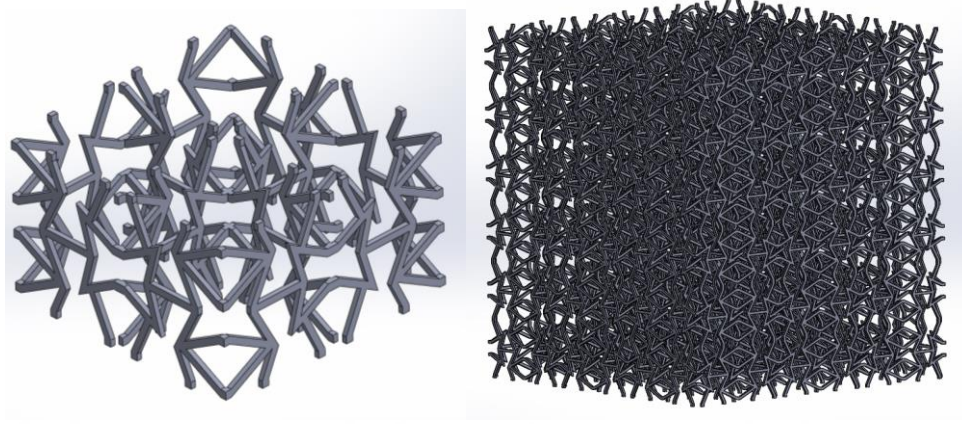
3.2.4. Özgün Öksetik yapının üç boyutlu olarak modellenmesi

Tasarlanan iki boyutlu RDN model diğer yapılarda olduğu gibi birim hücre yöntemi kullanılarak üç boyutlu şekilde yeniden modellenmiştir. RDN yapının boyut detayları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Özgün öksetik yapının üç boyutlu tasarımının ölçüleri

Model	Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Hacim (mm ³)
RDN	90,89	75,92	75,92	11.860

Üç boyutlu RDN model tasarımında kullanılan birim hücre ve genel görünüş Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. RDN modelin birim hücresi ve üç boyutlu genel görünüşü

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizleri ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu program kullanılarak öksetik yapıların, Poisson oranları hesaplanmış, yük-yer değiştirme eğrilerinden direngenlik değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, yapılarda oluşan von Mises gerilmeleri belirlenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi, doğada karşılaşılan karmaşık mühendislik problemlerini basit sonlu eleman adı verilen küçük bileşenlere ayırarak tam çözümün elde edildiği sayısal analiz yöntemidir. Bu yöntemin temel mantığı, karmaşık olan problemleri basite indirgeyerek kısa sürece çözüme ulaşmaktır (Anonim 2020c).

Sonlu elemanlar yöntemi ilk kez 1950 yılında uzay mühendisliği alanında kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin ilk çalışmasını Turner ve arkadaşları 1956 yılında sonlu elemanlar yöntemi hakkında ilk makalelerini yayınladılar. Sonlu elemanlar yöntemi teknolojik gelişmelere bağlı olarak 1970'li yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde inşaat, elektrik, makine, uçak, hidrodinamik, atom gibi çeşitli mühendislik alanlarının yanında, tıp dalında ortopedi, kalp ve damar cerrahisi, estetik cerrahi bölümlerinde kullanılmaktadır. (Anonim 2020c)

3.3.1. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Hazırlanmış olan öksetik modeller STEP (.step) formatında kaydedilmiş ve ANSYS Workbench 2020.R2 programına aktarılmıştır. Öksetik yapıların analizleri, ANSYS Workbench yazılımı içerisinde bulunan Static Structural analiz sisteminde gerçekleştirilmiştir. Analizler lineer olarak gerçekleştirilmiştir ve lineer malzeme özellikleri kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme programda tanımlı olan Structural Steel olarak seçilmiştir. Analizde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

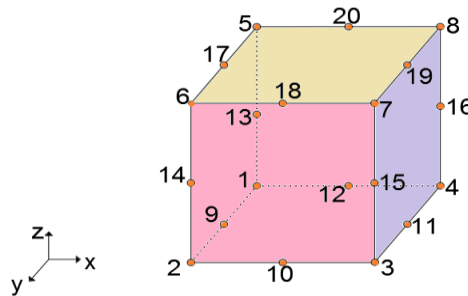
Çizelge 3.6. Analizde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü	Poisson Oranı	Yoğunluk
Structural Steel	200 GPa	0,3	7850 kg/m ³

3.3.2. Mesh boyutunun belirlenmesi

Solidworks programında modellenen öksetik yapıların analizleri için modellerdeki bütün parçaların hacimsel olarak sonlu sayıda elemana bölünmesinde (mesh), Hex Dominant mesh yöntemi ve all quad mesh tipi kullanılmıştır. Bu tercihlerin yapılmasında literatürde bulunan çalışmalar dikkate alınmıştır (Wang et al. 2016).

Bu yöntemle yapılan mesh, 20 düğüm noktasına sahiptir (Şekil 3.6). Bu elemanlar, bütün düğüm noktalarında üç serbestlik derecesine (x, y ve z yönlerinde noktasal ötelenme) sahiptirler ve gerilmeler bu düğüm noktalarından hesaplanmaktadır (Anonymous 2020d).



Şekil 3.6. Yirmi düğüm noktasına sahip Hex Dominant eleman (Anonymous 2020d)

Analizlerde kullanılacak olan mesh boyutunu en uygun şekilde belirlemek amacıyla Poisson oranının ve Direngenlik değerinin mesh boyutuna göre değişimi karşılaştırılmıştır. mesh boyutuna karar verilmesinde programda tanımlı olan farklı parametrelerden Skewness değeri dikkate alınmıştır. Skewness değeri bir yüzün veya hücrenin ideal eş açılı dörtgene ne kadar yakın olduğunu belirler. Bu parametreye bağlı olarak eleman kalitesinin değişimi Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Eleman kalitesinin Skewness değerine göre değişimi (Anonymous 2020d)

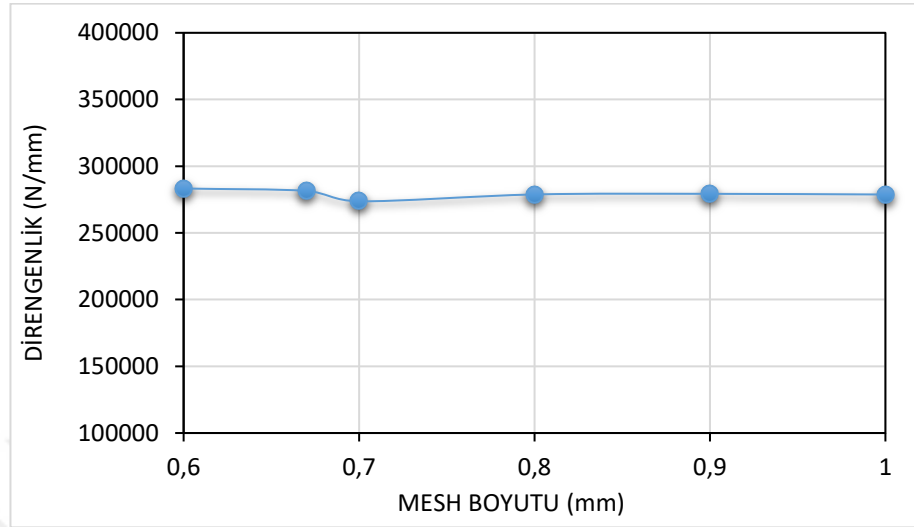
Skewness Değeri	Eleman Kalitesi
1	Bozuk
0,9-<1	Kötü
0,75-0,9	Zayıf
0,5-0,75	Vasat
0,25-0,5	İyi
>0-0,25	Çok iyi
0	Eşkenar

Mesh çalışmasında klasik öksetik yapı olan üç boyutlu Re-entrant model seçilmiştir. Re-entrant 45° modelde 1 ve 0,6 arasında farklı mesh değerleri verilerek sonuçları değerlendirilmiştir. Analizde Re-entrant modelin boyunun 1/1000’i (0,06206 mm) kullanılarak basınç etkisi altında deplasman uygulanmıştır. Mesh çalışmasında kullanılan mesh boyutları ve sonuçları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Yapıların Poisson oranları ile Skewness ve direngenlik değerlerinin mesh boyutuna göre değişimi

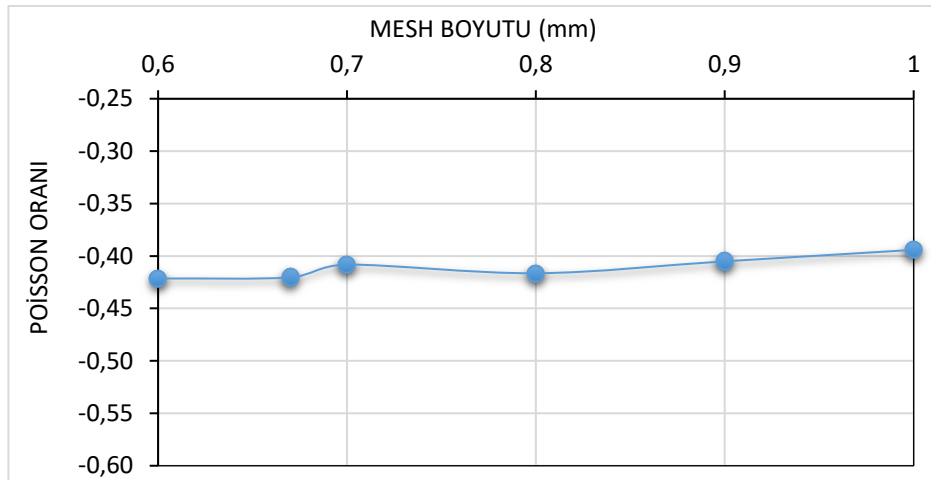
Mesh Boyutu	Poisson Oranı	Skewness	Direngenlik (N/mm)
1	-0,394	0,415	283.279
0,9	-0,405	0,371	281.473
0,8	-0,416	0,338	273.716
0,7	-0,408	0,312	278.822
0,67	-0,420	0,31	279.291
0,6	-0,422	0,307	278.780

Re-entrant 45° yapıda yapılan analiz sonuçlarına göre Direngenlik değerinin mesh boyutuna göre değişim grafiği Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Direngenlik değerinin mesh boyutuna göre değişim grafiği

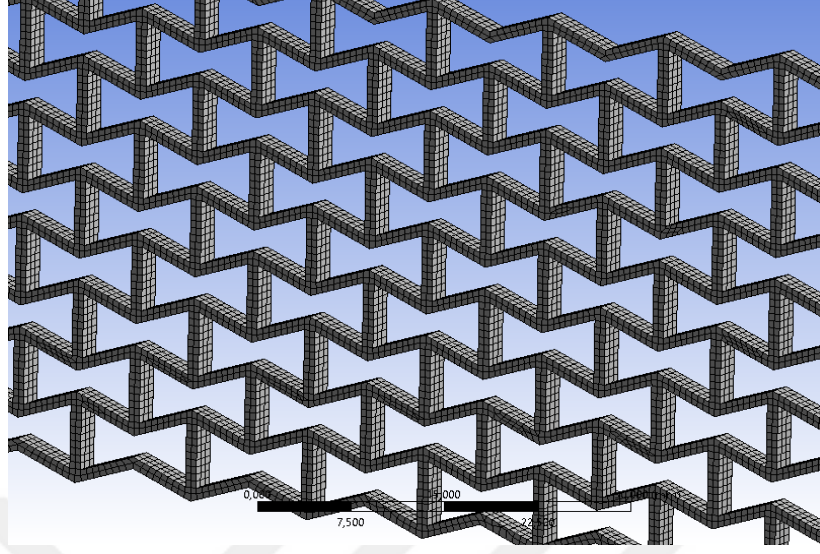
Üç boyutlu 45° Re-entrant yapının Poisson oranının mesh boyutuna göre değişim grafiği Şekil 3.8’de verilmiştir.



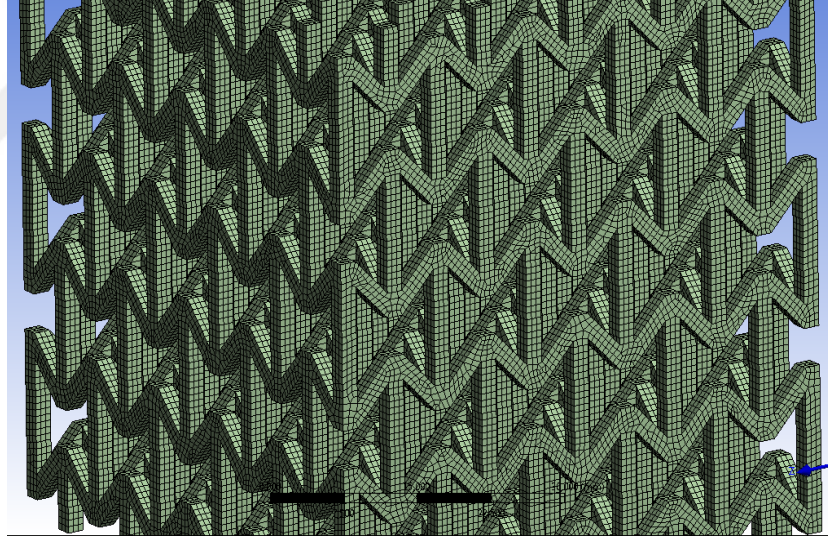
Şekil 3.8. Poisson oranının mesh boyutuna göre değişim grafiği

Yapılan mesh karşılaştırması sonucunda değerler arasında çok fazla fark olmadığı gözlenmiştir. Analiz süresinin kısa tutulması ve Skewness değeri de dikkate alınarak mesh boyutu olarak ortalama değer olan 0,67 mm seçilmiştir. Bu mesh değeri 2 ve 3

boyutlu modellerin tamamına uygulanmıştır. İki ve üç boyutlu yapılara uygulanan mesh görselleri örnek olarak Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da verilmiştir.



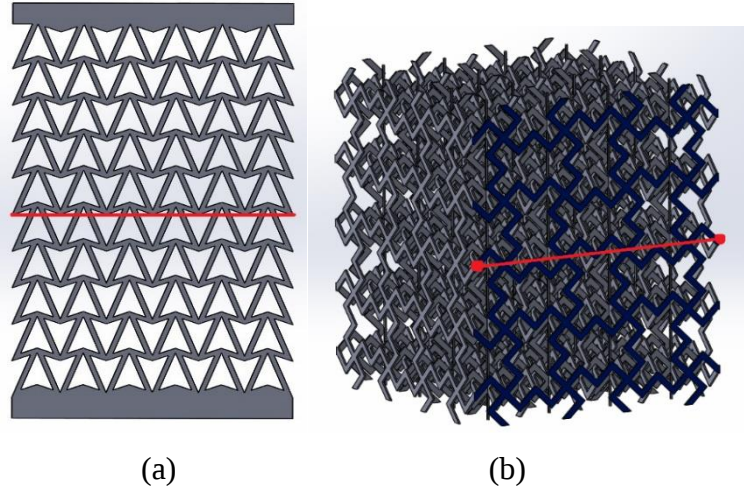
Şekil 3.9. İki boyutlu Re-entrant yapının mesh görüntüsü



Şekil 3.10. Üç Boyutlu Re-entrant yapının mesh görüntüsü

3.4. Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Parametreler

İki ve üç boyutlu modellerin Poisson oranları hesaplanırken yapıların yaklaşık olarak orta bölümlerinin en dış noktaları dikkate alınmıştır. 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellerin Poisson oranlarının hesaplandığı noktalar örnek olarak Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Poisson oranı hesaplama noktaları (a) Arrowhead (b) Lozenge Grids

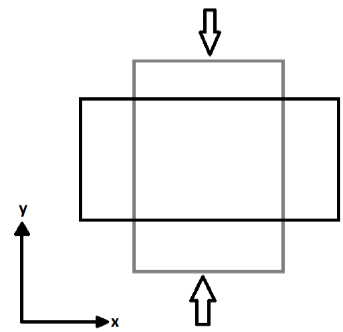
Tasarlanan numunelerin öksetiklik özelliklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla tüm yapıların Poisson oranları hesaplanmıştır. Analiz sonucunda Poisson Oranı hesaplamaları için, aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$\varepsilon_{enine} = \frac{\Delta L_x}{L_x} \quad \varepsilon_{boyuna} = \frac{\Delta L_y}{L_y} \quad (3.1)$$

$$\nu = - \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_B} \quad (3.2)$$

Burada;

ε	Birim Şekil Değişirme
ε_E	Enine Birim Şekil Değişirme
ε_B	Boyuna Birim Şekil Değişirme
$\Delta L_x, \Delta L_y$	x ve y doğrultularında oluşan yer değiştirmeler
$L_x, L_y,$	x ve y doğrultularındaki ilk boylar



Analiz sonuçlarına göre karşılaştırma yapılan parametrelerden biri de direngenlik değeridir. Yük-yer değiştirme eğrisinin başlangıcındaki doğrusal kısmın eğimi yöntemin direngenlik değerini vermektedir. Direngenlik, sistemde birim elastik (geri dönebilir) yer değiştirme oluşması için uygulanması gereken yük değerini göstermektedir. Direngenlik değeri yüksek olan bir sistem, düşük direngenlik değeri olan sisteme nazaran daha az

hareket edecektir. Tam direngen bir sistemde ise, yükleme etkisinde herhangi bir hareket oluşmayacaktır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde direngenlik değeri olarak, yük yer değiştirme eğrisinin eğimi dikkate alınarak hesaplanmıştır (Cohen and Griffin 2002).

Sonlu elemanlar analizlerinin sonuçlarını incelerken von Mises gerilmelerine de bakılmıştır. Böylece analizlerde gerilmelerin, hangi bölgelerde yoğunlaştığının belirlenmesi ve yapıların zayıf kısımlarının ortaya konması amaçlanmıştır.

Von Mises gerilmesi, sünek malzemelerde akma kriterinin belirlenmesinde kullanılmakta ve yapıdaki üç boyutlu gerilme halini tek bir sayısal değer ile karakterize eden bir gerilmeyi (eşdeğer gerilme) ifade etmektedir. Bu gerilme değeri, elemanın akma dayanımını aştığı anda akma meydana gelmekte ve plastik şekil değiştirmeler oluşmaya başlamaktadır (Güler 2013). Von Mises eşdeğer gerilmesinin genel ifadesi Denklem 3.4'te gösterilmiş, asal gerilmelere bağlı olarak hesaplanması ise Denklem 3.5'te verilmiştir.

$$\sigma_{e^2} = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (3.4)$$

$$\sigma_{e^2} = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.5)$$

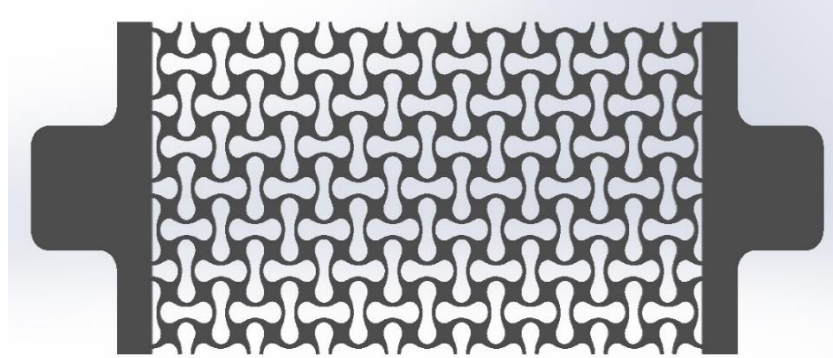
3.5. Sonlu Elemanlar Modellerinin Gerçeklemesi

Bu çalışmada sayısal modellerin ve analiz sonuçlarının doğru olduğunu gösterebilmek adına ilk olarak, literatürde önceden çalışılmış öksetik yapılar modellenerek analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen veriler literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.

3.5.1. İki boyutlu modellerin gerçekleştirilmesi

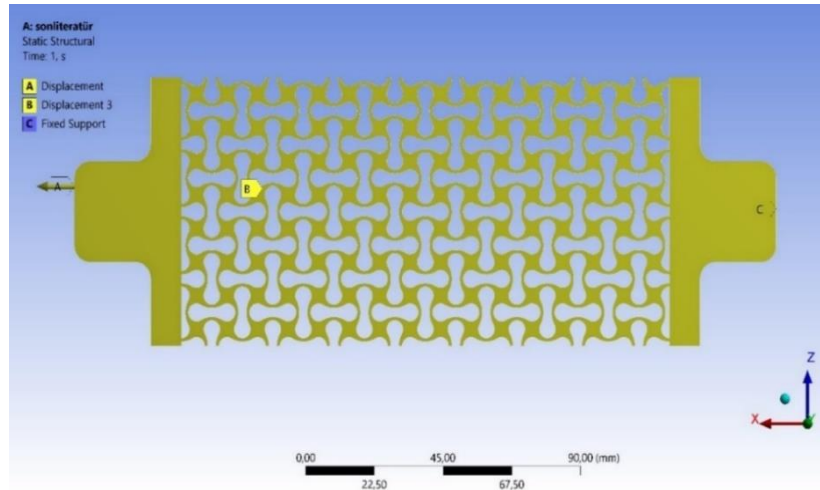
2 boyutlu modellerin gerçekliğini göstermek için 2020 yılında Wang et al. tarafından yapılan çalışmada incelenen Elliptic Holes yapı modellenmiştir (Şekil 3.12).

Modelleme yapılırken çalışmada belirtilen boyutlar ve sınır şartları uygulanmıştır. Yapılan analiz sonuçları çalışmanın verileri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.12. İki boyutlu gerçekleştirme modelinin Solidworks görüntüsü

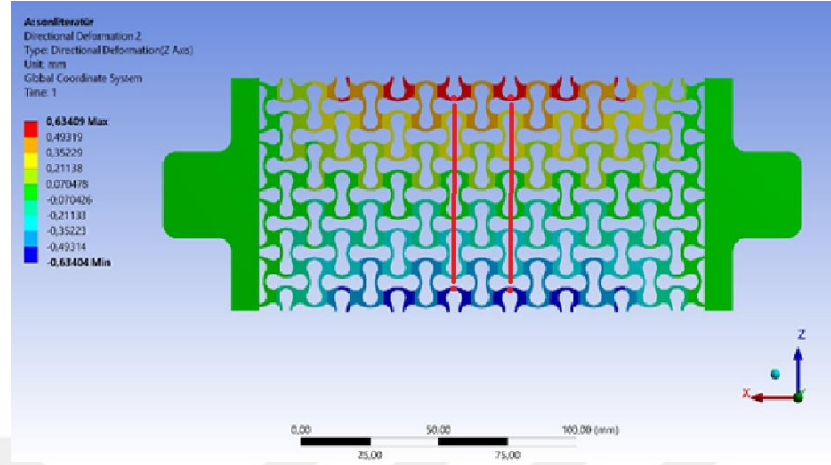
Analizde kullanılan malzemenin Elastik modülü 3 GPa, Poisson oranı 0,38 olarak alınmıştır. Analizde model, Şekil 3.13'te gösterilen C noktasından 'Fixed Support' ile sabitlenmiş ve A noktasından 2 mm'lik deplasman çekme şeklinde uygulanmıştır. Ayrıca y yönündeki hareket, şekilde yamulmaya neden olacağından ön ve arka yüzeylerin y yönündeki hareketi engellenmiştir.



Şekil 3.13. İki boyutlu gerçekleştirme modelinin sınır şartları

Analiz sonucunda Şekil 3.14'te kırmızı renkte gösterilen noktalar dikkate alınarak Poisson oranı hesaplanmıştır. 2020 yılında Wang et al. tarafından yapılan çalışmada Poisson oranının deneysel olarak -1,1066 olduğu belirtilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda Poisson oranı -0,989 olarak bulunmuştur. Yapılan analizlerden elde

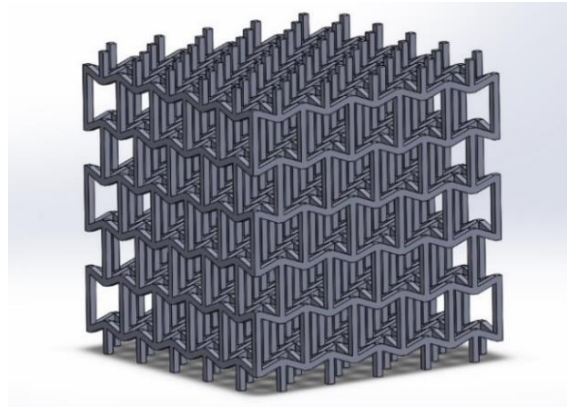
edilen değerlerin yaklaşık olarak doğru sonuçları gösterdiği sonucuna varılmış ve yapılan analizlerde benzer sınır şartları ve mesh yapıları kullanılmıştır.



Şekil 3.14. İki boyutlu gerçekteleme modelinin sonlu elemanlar analizi görüntüsü

3.5.2. Üç boyutlu modellerin gerçektelemesi

Üç boyutlu modellerin doğruluğunu göstermek adına 2016 yılında Wang et al. tarafından yapılan çalışmada incelenen öksetik yapılar modellenmiştir. Üç boyutlu Re-entrant yapı literatür çalışmasında belirtilen boyut ve açılarda (40°, 45°, 50°, 60°, 70°) modellenerek analizlerden elde edilen Poisson oranları ve Elastisite Modülü değerleri literatürle karşılaştırılmıştır (Şekil 3.15).

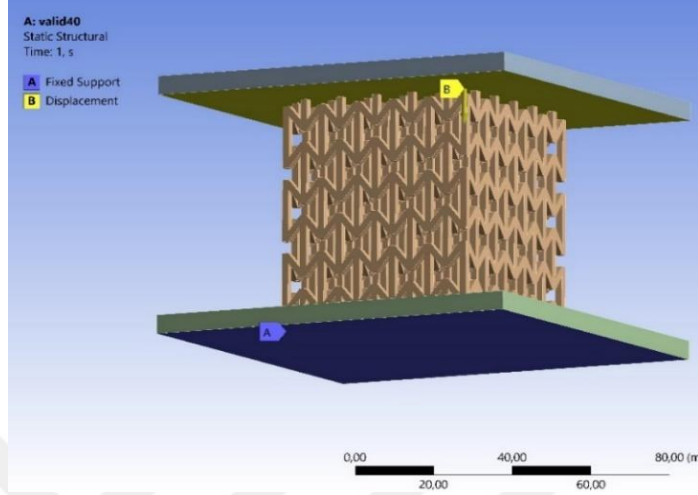


Şekil 3.15. Re-entrant 70° yapının Solidworks görüntüsü

Analizlerde kullanılan malzemenin Elastisite modülü 196 GPa, Poisson oranı 0,295 ve akma gerilmesi 185 MPa olarak alınmıştır. Mesh boyutu makalede belirtilen

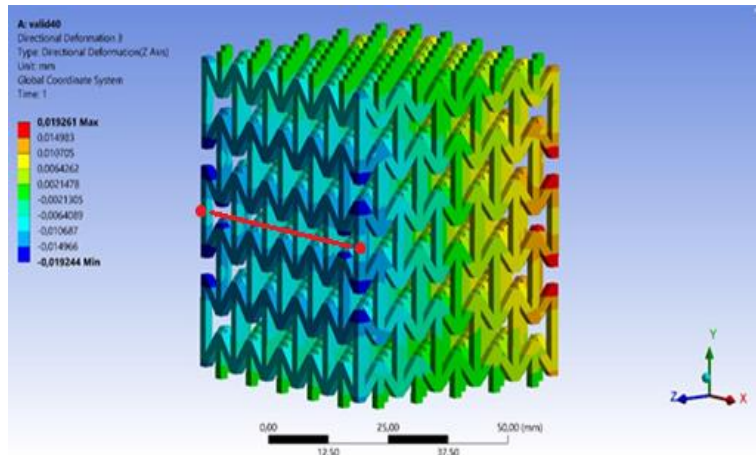
3. MATERYAL ve YÖNTEM

şekilde 0,67 mm olarak seçilmiştir. Analizlerde her modele kendi boy uzunluğunun 1/1000'i olacak şekilde bir deplasman değeri basınç olarak uygulanmıştır. Analizde kullanılan sınır şartları Şekil 3.16'te gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Re-entrant 40° modelde sınır şartları

Analiz sonucunda elde edilen veriler ile Şekil 3.17'de gösterilen (kırmızı noktalar) yapının ortasının en dış noktaları dikkate alınarak Poisson oranları hesaplanmış ve literatür verileri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan Poisson oranları, 2016 yılında Wang et al. tarafından yapılan çalışmada verilen Poisson oranları Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

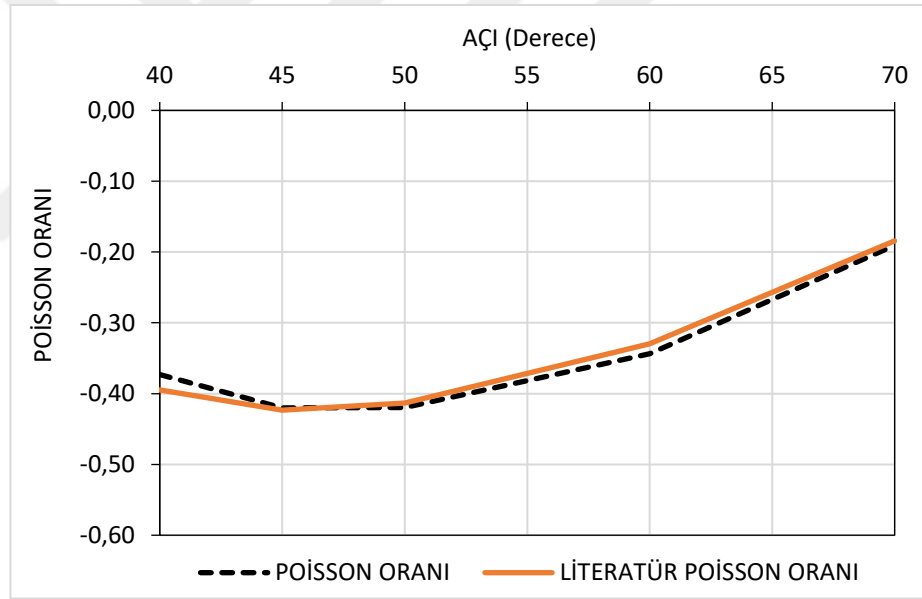


Şekil 3.17. Re-entrant 40° modelin sonlu elemanlar görüntüsü

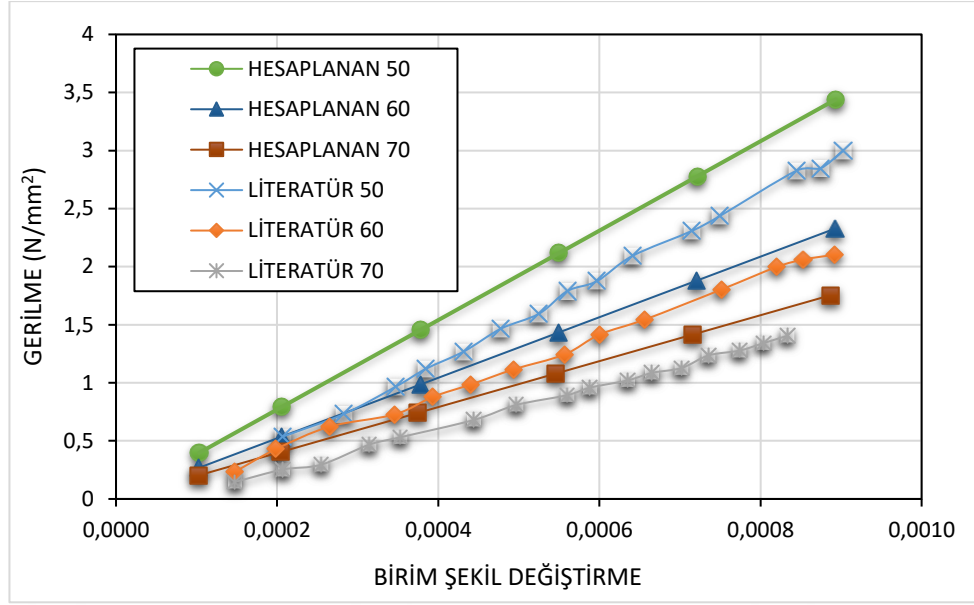
Çizelge 3.9. Re-entrant modellerin Poisson oranları

Açı	Poisson Oranı	Literatür Poisson Oranı	Elastisite Modülü (N/mm ²)
40°	-0,3733	-0,3949	6.760
45°	-0,4202	-0,4233	4.973
50°	-0,4195	-0,4131	3.850
60°	-0,3435	-0,3298	2.608
70°	-0,1906	-0,1842	1.977

Farklı açı değerleri ile tasarlanan üç boyutlu Re-entrant yapının Poisson oranının açı değerine göre değişiminin literatürle karşılaştırması grafiği Şekil 3.18’de verilmiştir.

**Şekil 3.18.** Poisson oranının açıya göre değişim grafiği

Elde edilen veriler ile 3 farklı Re-entrant yapının gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizdirilmiştir. Literatür çalışmasında verilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile analizlerden elde edilen eğriler Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. Gerilme- birim şekil değiştirme grafiği

Literatür verileri ve sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırıldığında grafik eğimlerinden yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir. Benzer sonuçların elde edilmesi nedeniyle bu çalışmadaki diğer analizlerde, modelleme tekniği ve sınır şartları seçiminde (deplasman değeri, mesh boyutu vb.) bu örnekler dikkate alınmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde ilk olarak 2 boyutlu yapıların çekme etkisi altında analizlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. İkinci bölümde ise 3 boyutlu yapıların hem çekme hem de basınç etkisi altında sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen bulgular sunulmuştur.

4.1. İki Boyutlu Yapıların Sonlu Elemanlar Analizi Bulguları

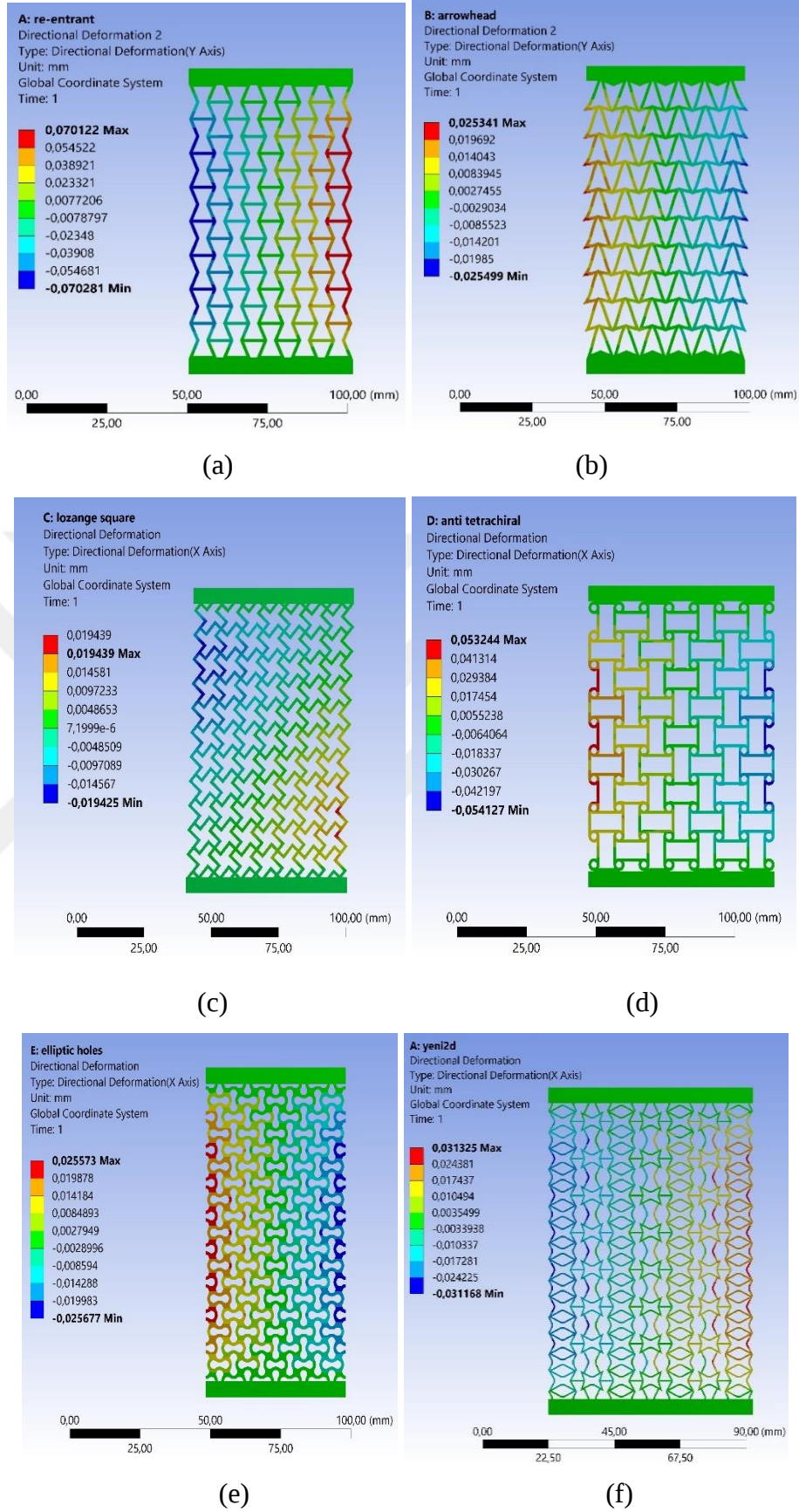
İki boyutlu modellenen yapılara belirtilen sınır şartları uygulanmış ve çekme analizi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. İki boyutlu modellerde elde edilen Poisson oranları, Direngenlik değerleri ve von Mises gerilmeleri

2D Modeller	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)	von Mises Gerilmesi (MPa)
Re-Entrant	-0,987	11.576	403
Arrowhead	-0,880	10.382	278
Lozenge Grids	-0,406	2.836	320
Anti Tetrachiral	-0,843	4.760	211
Elliptic Holes	-0,962	8.108	309
RDN	-0,704	3.601	259

Elde edilen veriler sonucunda en büyük negatif Poisson oranı ve en büyük von Mises gerilmesi klasik Re-entrant yapıda elde edilmiştir. Re-entrant yapıdan sonra en büyük negatif Poisson değerine sahip olan Elliptic Holes yapısı aynı zamanda en büyük hacme sahiptir. En küçük negatif Poisson oranına sahip olan Lozenge Grids yapısı aynı zamanda en küçük Direngenlik değerine sahiptir, en küçük von Mises gerilmesine ise Anti Tetrachiral yapısı sahiptir.

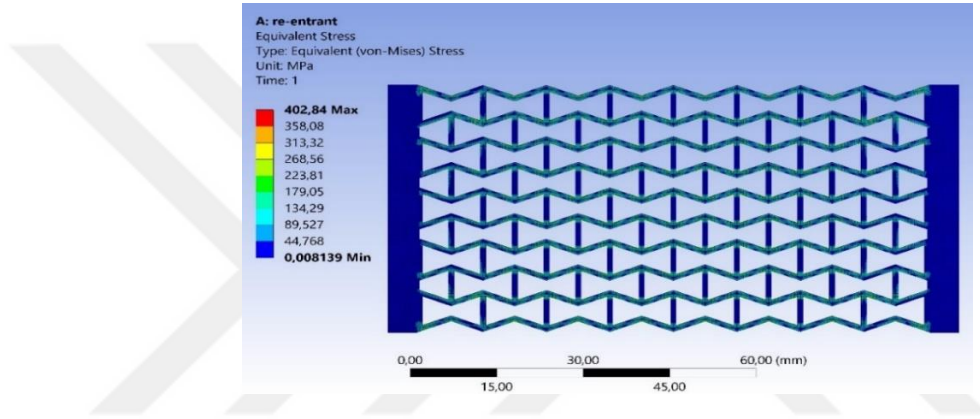
2 boyutlu yapıların çekme etkisine dik doğrultuda oluşan yer değiştirme görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. 2 boyutlu yapıların çekme etkisine dik doğrultudaki yer değiştirme değerleri (a) Re-entrant (b) Arrowhead (c) Lozange Grids (d) Anti Tetrachiral (e) Elliptic Holes (f) RDN

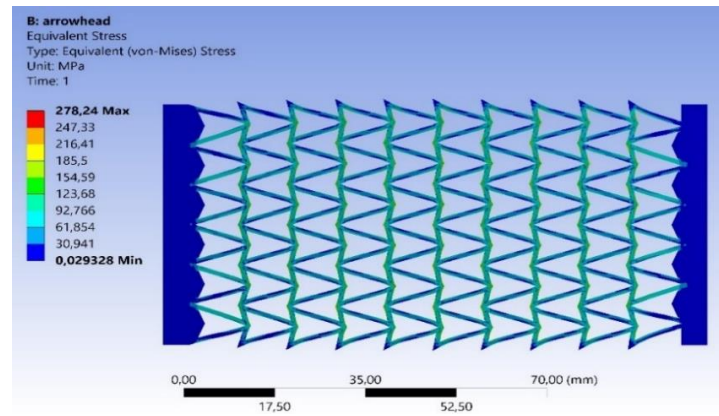
İki boyutlu yapıların çekme etkisinde oluşan öksetiklik özelliğinin daha iyi görünebilmesi için büyük ölçekli (Auto Scale) şekil değiştirme görüntüleri çalışmanın ek-1 kısmında toplu olarak sunulmuştur.

Şekil 4.2’de iki boyutlu Re-entrant yapının, SE analizlerinden elde edilen von Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir. Re-entrant yapıda en büyük von Mises gerilmelerinin, yapının öksetiklik özelliği göstermesini sağlayan yatay yöndeki iç geçişlik bölgelerinde olduğu görülmektedir. Re-entrant yapıda oluşan maksimum von Mises gerilmesi 403 MPa’dır.



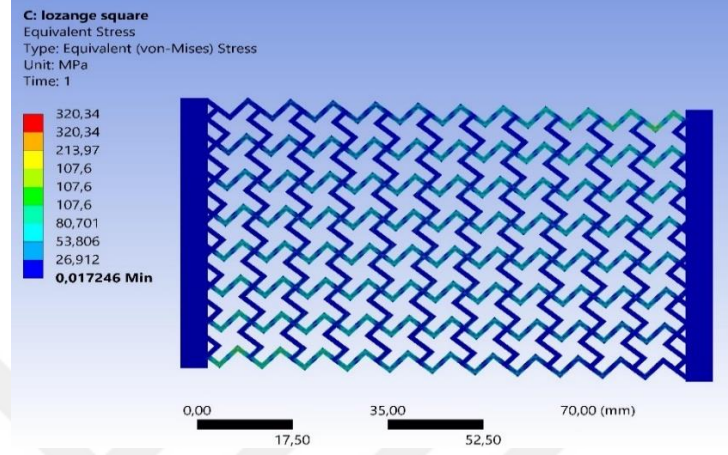
Şekil 4.2. Re-entrant yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü

Şekil 4.3’te iki boyutlu Arrowhead yapısının von Mises gerilme analiz sonucu gösterilmiştir. En büyük gerilmeler, Arrowhead yapısının birim hücredeki iç bükey dörtgenin sivri uç bölgelerinde meydana gelmektedir. Arrowhead yapıda oluşan maksimum von Mises gerilmesi 278 MPa’dır.



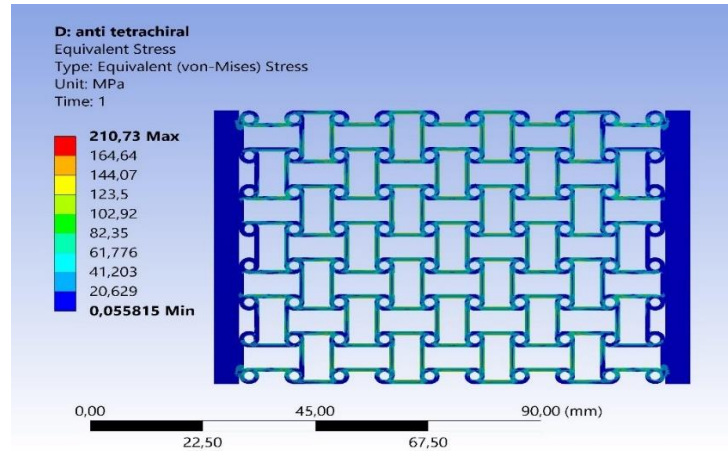
Şekil 4.3. Arrowhead yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü

Şekil 4.4'te iki boyutlu Lozenge Grids yapısının von Mises gerilme analiz sonucu gösterilmiştir. Lozenge Grids yapısının yatay çubuk elemanlarının köşe noktalarında en büyük gerilmeler meydana gelmektedir. Lozenge Grids yapıda oluşan maksimum von Mises gerilmesi 320 MPa'dır.



Şekil 4.4. Lozenge Grids yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü

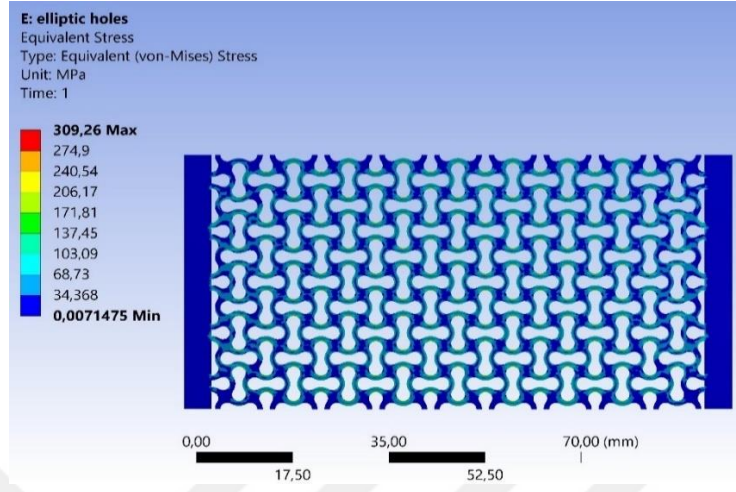
Şekil 4.5'te iki boyutlu Anti Tetrachiral yapısının von Mises gerilme analiz sonucu gösterilmiştir. Anti Tetrachiral yapısında dairelerin birleşim çubuk elemanlarında en büyük gerilme meydana gelmektedir. Anti Tetrachiral yapıda oluşan maksimum von Mises gerilmesi 211 MPa'dır.



Şekil 4.5. Anti Tetrachiral yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü

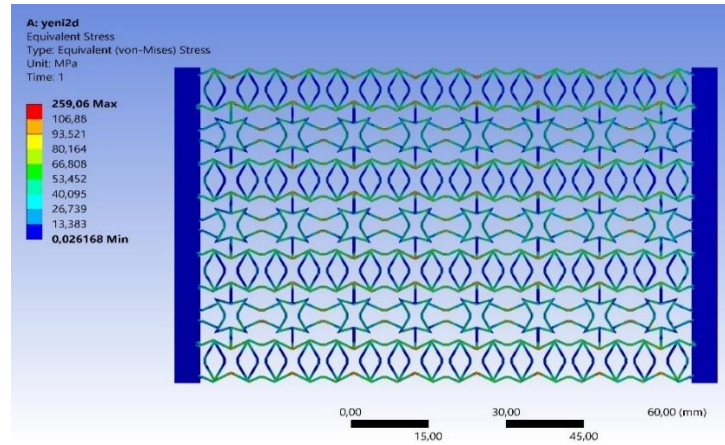
Şekil 4.6'da iki boyutlu Elliptic Holes yapısının von Mises gerilme analiz sonucu gösterilmiştir. Elliptic Holes yapısında, birim hücrelerinde var olan dairelerin iç ve dış

bölgelerinde en büyük gerilme meydana gelmektedir. Elliptic Holes yapıda oluşan maksimum von Mises gerilmesi 309 MPa'dır.



Şekil 4.6. Elliptic Holes yapının von Mises gerilme analizi görüntüsü

Şekil 4.7’de iki boyutlu yeni tasarım RDN yapısının von Mises gerilme analiz sonucu gösterilmiştir. RDN yapısında birim hücrelerinde var olan yatay yöndeki iç geçişli bölgelerin iç kısımlarında en büyük gerilme meydana gelmektedir. RDN yapıda oluşan maksimum von Mises gerilmesi 259 MPa’dır.



Şekil 4.7. RDN yapısının von Mises gerilme analizi görüntüsü

4.2. Üç Boyutlu Yapıların Sonlu Elemanlar Analizi Bulguları

Üç boyutlu modellenen yapılar için belirtilen sınır şartları doğrultusunda hem çekme hem de basınç etkisi altında elde edilen değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Basınç ve çekme etkisi altında Direngenlik ve Poisson değerleri

	BASINÇ		ÇEKME	
3D Modeller	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)
Arrowhead	-0,832	46.250	-0,841	46.252
Lozenge Grids	-0,431	14.539	-0,434	14.539
Anti Tetrachiral	-0,999	2.528	-0,999	2.528
Elliptic Holes	-0,994	26.634	-0,993	26.799
RDN	-0,808	11.916	-0,806	11.916

Farklı açı değerleri ile modellenen Re-entrant yapıların basınç ve çekme etkisi altında elde edilen Poisson oranı, Direngenlik değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

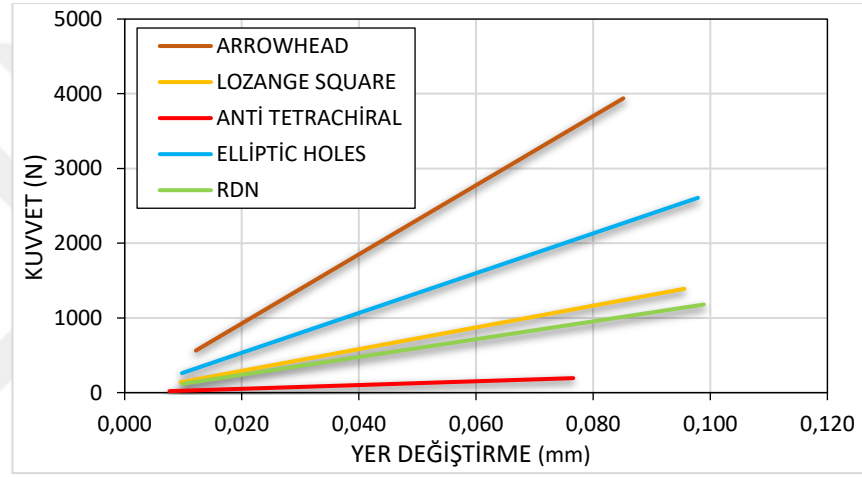
Çizelge 4.3. Re-entrant modellerin basınç ve çekmede Poisson oranları Direngenlik değerleri

	BASINÇ		ÇEKME	
Açı	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)
40°	-0,3712	330.017	-0,3716	330.067
45°	-0,4195	278.686	-0,4199	278.686
50°	-0,4177	240.087	-0,4176	240.087
60°	-0,3430	181.543	-0,3435	181.543
70°	-0,1897	150.409	-0,1898	150.409

3 boyutlu numuneler üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen verilere göre Direngenlik değerleri ve Poisson oranları çekme ve basınç etkisi altında değişiklik göstermemiştir. Bu sonuca göre yapıların öksetiklik özelliğinin çekme ve basınç etkisi altında aynı olduğu görülmektedir.

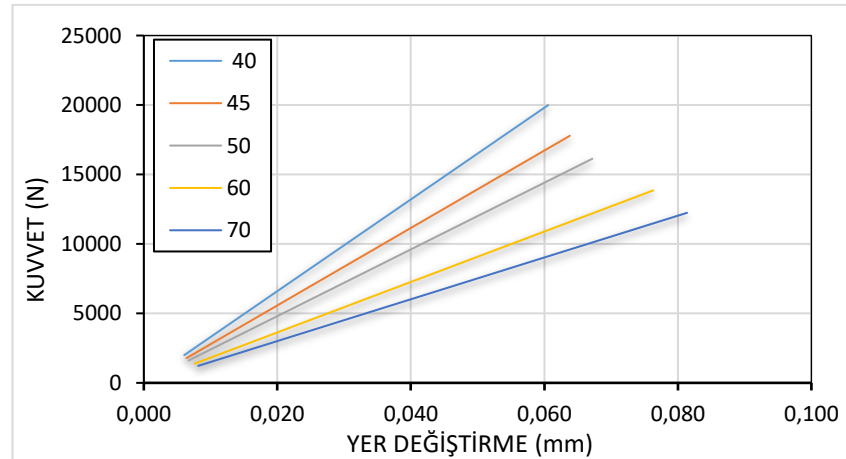
3 boyutlu yapılarda da en büyük negatif Poisson oranını Anti Tetrachiral yapısı, en küçük negatif Poisson oranını ise 70° Re-entrant yapı sahiptir. En büyük Direngenlik değerini 40° Re-entrant yapı, en küçük Direngenlik değerini ise Anti Tetrachiral yapı sahiptir. Re-entrant yapılardan elde edilen verilere göre Re-entrant yapının açı değeri arttıkça Direngenlik değerinde bir azalma meydana gelmektedir. Re-entrant yapılar arasında en büyük öksetiklik özelliğini ise 45° Re-entrant yapı göstermiştir.

3 boyutlu numuneler üzerinde yapılan basınç analizinde elde edilen değerler ile oluşturulan kuvvet-şekil değiştirme grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8.Üç boyutlu numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği

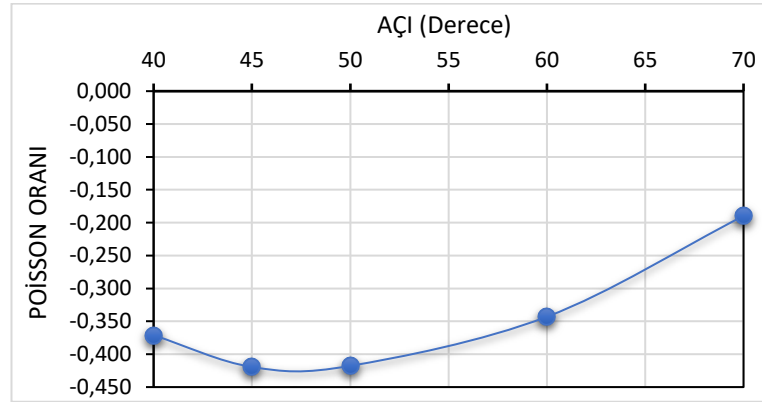
Farklı açı değerlerine göre modellenen Re-entrant yapıların çekme etkisi altında kuvvet-şekil değiştirme grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Re-entrant yapının açı değerlerine göre kuvvet-şekil değiştirme grafiği

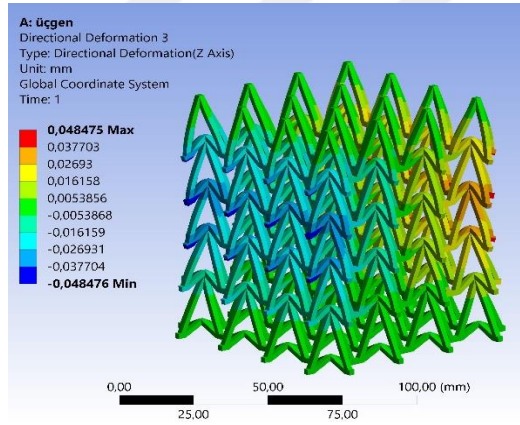
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Farklı açı değerlerine göre modellenen Re-entrant yapıların çekme etkisi altında Poisson oranının açı değerine göre değişim grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir.

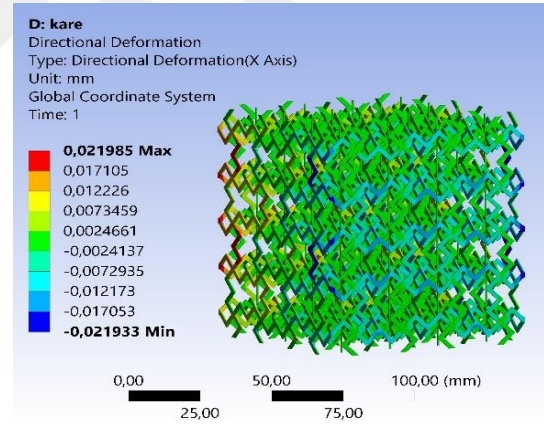


Şekil 4.10. Poisson oranının Re-entrant açı değerine göre değişim grafiği

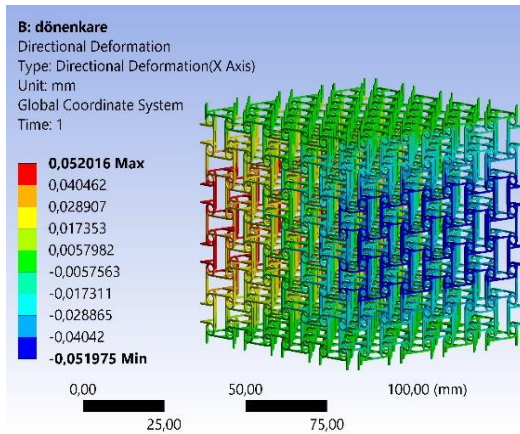
3 boyutlu yapıların basınç etkisine dik doğrultudaki yer değiştirme değerlerinin görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir.



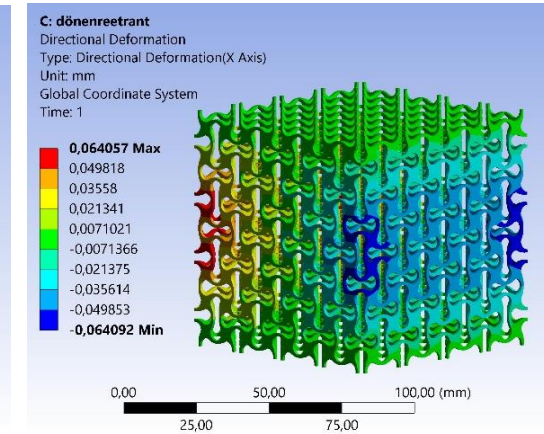
(a)



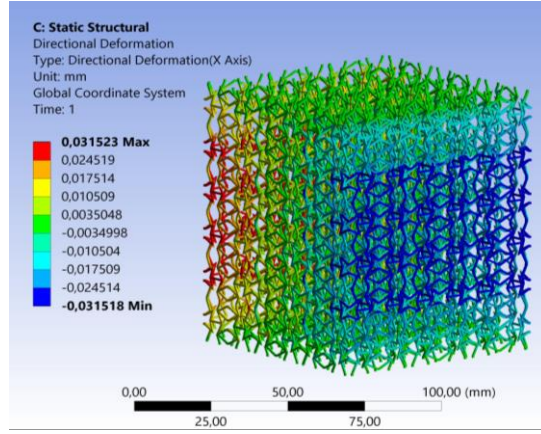
(b)



(c)



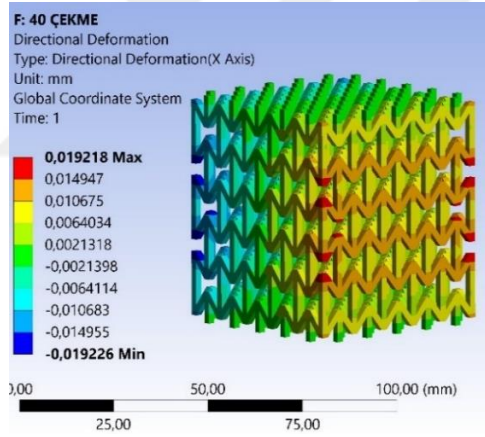
(d)



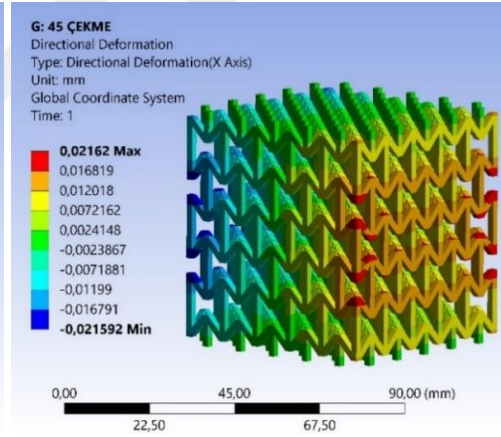
(e)

Şekil 4.11. Üç boyutlu yapıların basınç etkisine dik yöndeki sonlu elemanlar görüntüsü (a) Arrowhead (b) Lozenge Grids (c) Anti Tetrachiral (d) Elliptic Holes (e) RDN

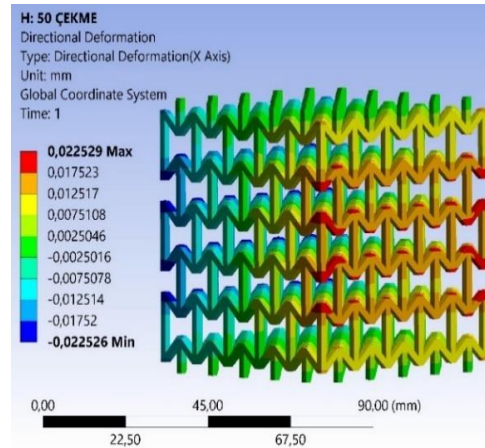
3 boyutlu farklı açılarındaki Re-entrant yapılarda çekme etkisine dik doğrultuda oluşan yer değiştirmeler Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



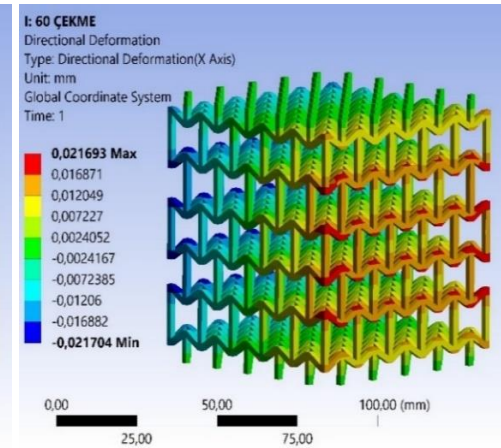
(a)



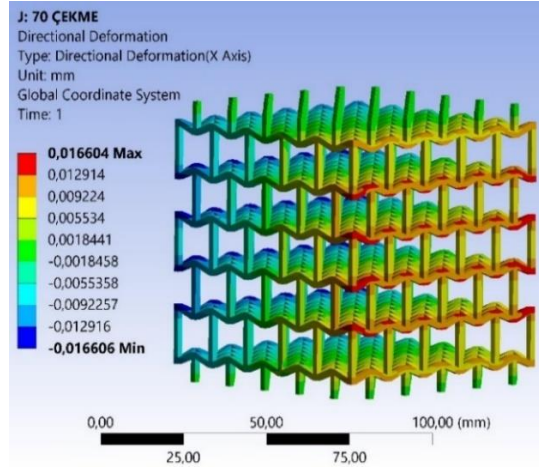
(b)



(c)



(d)

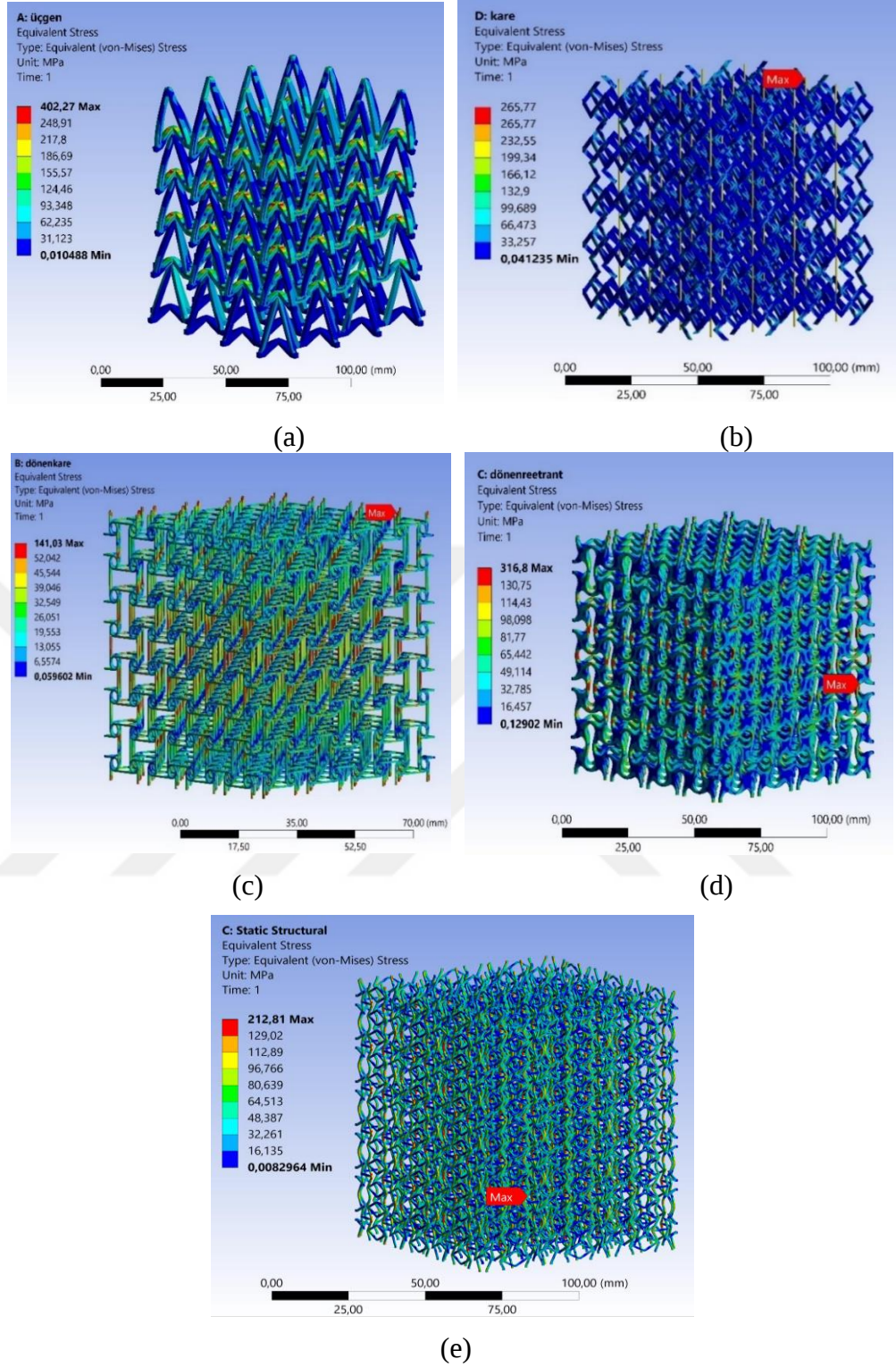


(e)

Şekil 4.12. Farklı açı değerlerindeki Re-entrant yapıların çekme etkisine dik yönde oluşan deformasyon SE analiz görüntüleri (a) 40° (b) 45° (c) 50° (d) 60° (e) 70°

Şekil 4.13'te üç boyutlu modellenen yapılarda meydana gelen von Mises gerilme değerleri gösterilmiştir. Üç boyutlu Arrowhead yapısında birim hücrelerin birleşim bölgesi olan, üst üste oturan hücresel elemanların iç bölümlerinde (sivri uç kısımlarında) maksimum von Mises gerilmeleri oluşmuştur. Lozenge Grids yapısının birim hücre elemanları birbirine bağlayan birleşim çubuklarında en büyük gerilmeler meydana gelmektedir. Anti Tetrachiral yapısında, iki boyutlu yapıda olduğu gibi dairelerin birleşim çubuklarında von Mises gerilmeleri maksimum değerlere sahiptir. Elliptic Holes yapısında ise birim hücrelerinde var olan dairelerin iç ve dış bölgelerinde zorlanmalar meydana gelmektedir ve en büyük von Mises gerilmeleri bu bölgelerde oluşmaktadır. RDN yapısında dikey yöndeki içe geçiş bölgelerinde en büyük zorlanmalar meydana gelmiştir ve en büyük gerilmelerin bu bölgelerde oluştuğu belirlenmiştir.

Üç boyutlu yapıların çekme ve basınç etkisinde oluşan öksetiklik özelliğinin daha iyi görünebilmesi için büyük ölçekli (Auto Scale) şekil değiştirme görüntüleri çalışmanın Ek-2 kısmında toplu olarak sunulmuştur.



Şekil 4.13. Üç boyutlu yapılarda von Mises gerilim dağılımları (a) Arrowhead (b) Lozenge Grids (c) Anti Tetrachiral (d) Elliptic Holes (e) RDN

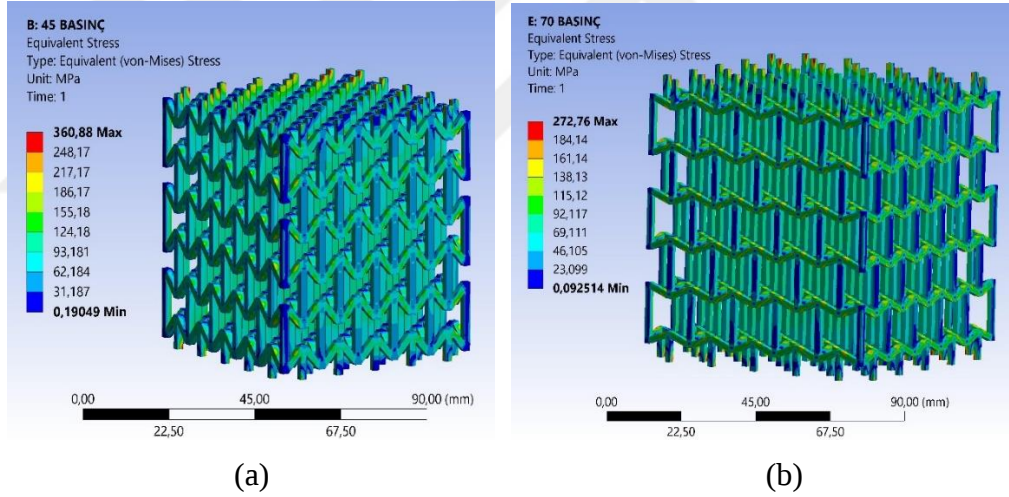
Çizelge 4.4'te Re-entrant yapının açısı değerlerine göre von Mises gerilmeleri verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında yapıların negatif Poisson oranları ile doğru bir ilişki olduğu söylenebilir. En yüksek negatif Poisson değerine sahip olan 45° Re-entrant yapı

en fazla gerilmeye yani von Mises gerilmesine sahiptir. En küçük negatif Poisson oranına sahip olan 70° Re-entrant yapı ise en küçük gerilmeye sahiptir.

Çizelge 4.4. Re-entrant yapının açI değerlerine göre von Mises gerilmeleri

Açı (Derece)	40°	45°	50°	60°	70°
Von Mises Gerilmesi (MPa)	353	361	360	334	273

Şekil 4.14'te iki farklı Re-entrant açı değerine göre von Mises gerilmelerinin dağılımı verilmiştir. Re-entrant yapıların hepsinde en büyük gerilmeler aynı bölgelerde meydana gelmektedir. 3 boyutlu Re-entrant yapıda en büyük von Mises gerilmelerinin, yapının öksetiklik özelliği göstermesini sağlayan içe geçişli bölgelerinde oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.14. (a) Re-entrant 45° von Mises dağılımı (b) Re-entrant 70° von Mises dağılımı

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında iki ve üç boyutlu farklı öksetik modeller basınç ve çekme etkisi altında analitik olarak incelenmiştir. Literatürde bulunan beş farklı yapıya ek olarak özgün bir öksetik yapı olarak modellenen RDN modeli de iki ve üç boyutlu olarak tasarlanmış ve mevcut yapılarla karşılaştırılmıştır. Re-entrant ve Arrowhead dışındaki öksetik yapılar ilk olarak bu çalışma kapsamında üç boyutlu olarak incelenmiştir. Bu modellemeler yapılırken Re-entrant yapısında kullanılan birim hücre eleman mantığı kullanılmıştır. Re-entrant yapısı ayrıca beş farklı açı değeri ile modellenip analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylece toplamda altı adet iki boyutlu, on adet ise üç boyutlu model incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- İki boyutlu modellerin çekme etkisi altında yapılan analiz sonuçları karşılaştırıldığında en büyük negatif Poisson değerine sahip olan yapının Re-entrant yapı olduğu belirlenmiştir. Böylece iki boyutlu yapılar arasında en fazla öksetiklik özelliğini ve en büyük Direngenlik değerini Re-entrant yapı göstermiştir.
- İki boyutlu modellerin çekme etkisi altında yapılan analiz sonuçlarına göre yapılar arasında en küçük negatif Poisson oranına sahip olan Lozenge Grids yapısı aynı zamanda en küçük Direngenlik değerine de sahiptir.
- Üç boyutlu modellerin sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre basınç ve çekme etkisi altında yapıların Direngenlik değerlerinde ve Poisson oranlarında bir değişimin olmadığı belirlenmiştir.
- Üç boyutlu numunelerin hem basınç hem de çekme etkisi altında yapılan sonlu elemanlar analizi sonucuna göre Anti Tetrachiral yapısı en büyük negatif Poisson oranına, 70° ile modellenen Re-entrant yapı ise en küçük negatif Poisson oranına sahiptir.
- Üç boyutlu Re-entrant yapının Poisson oranının ve Direngenlik değerinin farklı açı değerlerine göre değişimini belirlemek için yapılan çalışmada en iyi öksetiklik özelliğini 45° Re-entrant yapı göstermiştir. 40° Re-entrant yapı en büyük

Direngenlik değeri, 70° Re-entrant yapı ise en küçük Direngenlik değeri sahiptir. Bu sonuca göre Re-entrant yapının açısı değeri arttıkça Direngenlik değeri bir azalma meydana gelmektedir.

- Üç boyutlu farklı açısı değerlerine göre modellenen Re-entrant yapılar arasında en büyük von Mises gerilimini 45° Re-entrant yapıda, en küçük von Mises gerilimini ise 70° Re-entrant yapıda belirlenmiştir. Bu sonuca göre negatif Poisson oranının von Mises gerilmesi ile doğru orantılı olduğu sonucuna varılabilir.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen verilere göre ileriki çalışmalarda yapılabilecekler ve öksetik malzemelerin kullanım alanlarına yönelik değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

- Analizleri yapılan iki ve üç boyutlu yapıların belirlenen özelliklerinin daha iyi doğrulanabilmesi adına deneysel çalışmaların yapılması gerçek davranışların anlaşılması açısından yararlı olacaktır.
- Yapılan analizler lineer bölge için yapılmış olup, plastik deformasyon bölgesi dikkate alınmamıştır. Bunun sebebi doğrusal olmayan malzeme özelliği, kontak tanımının analizlerde yakınsama sorunları oluşturmaları ve analiz süresini büyük ölçüde uzatmasıdır. Ancak analizlerin nonlineer olarak yapılmasıyla yapıların davranışlarını daha iyi belirlenmesi sağlanabilir.
- Modellemelerde kullanılan birim hücre sayısının yapının davranışına etkisini inceleyebilmek adına yapı boyutu aynı kalacak şekilde birim hücre sayısında değişiklik yapılarak karşılaştırmalar yapılabilir.
- Yapılarda meydana gelen von Mises gerilmelerinin hangi bölgelerde yoğunlaştığı dikkate alınarak modellemelerde iyileştirmeler yapılabilir. Dolayısıyla daha iyi öksetik özellik veya direngenlik değerleri elde edilebilir.
- Öksetik yapıların uygulamalarda kullanım alanları belirlenirken elde edilen Poisson oranları ve Direngenlik değerleri dikkate alınarak karar verilebilir. Böylece kullanım alanında amacına uygun bir seçim yapılmış olacaktır. Örneğin, fazla esneklik ihtiyacı olan boyunluk tasarımında Direngenlik değeri düşük olan

bir öksetik yapı seçimi yapılabilir. Böylece daha esnek olacağından hareket kısıtlaması ortadan kalkacaktır.

- Öksetik yapılarda var olan yüksek sönümleme ve esneklik yeteneğinden dolayı deprem izolatörü olarak kullanabilmek adına çalışmalar yapılmaktadır (Ungureanu et al. 2015) (Naidoo and Drosopoulos 2020). Yapılan çalışmalarda teorik olarak yapının maruz kaldığı ivme ve yapısal hasarın azaltılmasını kolaylaştırdığı ve sismik titreşimlerin yayılmasını başarıyla azalttığı belirtilmiştir. Bu bilgilere göre sismik izolatör olarak kullanımı için çalışmalar geliştirilebilir.
- Tasarlanan modellerin kullanım alanlarını daha iyi belirleyebilmek adına öksetik yapılar üretilerek beton içerisindeki davranışı incelenebilir. Böylece öksetik yapıların inşaat sektöründe kullanımı için bir ön çalışma yapılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, B., Wang, H., 2020. Compressive Deformation Mechanisms In Auxetik Materials With Re-Entrant And Curved Structures. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 7 (5), 11947-11950.
- Alderson, A., 1999. A Triumph of Lateral Thought. *Chemistry and Industry*, 385-39.
- Anonim, 2020a. Web Sitesi: <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/26/poisson-orani-nedir/>, Erişim Tarihi: 14.10.2020.
- Anonymous, 2020b. Web Sitesi: <https://matsurowanubusshitsu.myportfolio.com/auxeticclamp.>, Erişim Tarihi: 25.11.2020.
- Anonim, 2020c. Web Sitesi: <https://insapedia.com/sonlu-elemanlar-yontemi-nedir-sinir-sartlari-uygulama-adimlari/>, Erişim Tarihi: 29.11.2020.
- Anonymous, 2020d. Ansys mechanical APDL theory reference (Ansys Release 15.0), Ansys Inc, Canonsburg, PA, USA. Erişim Tarihi: 30.12.2020.
- Chen, C. P., Lakes, R. S., 1989. Dynamic wave dispersion and loss properties of conventional and negative Poisson's ratio polymeric cellular materials. *Cellular Polymers*, 8, 343-369.
- Chen, Y., Fu, M. H., 2017. A novel three-dimensional auxetik lattice meta-material with enhanced stiffness. *Smart Materials and Structures*, 26, 1-11.
- Choi, J. B. and Lakes, R. S., 1991. Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam. *Cellular Polymers*, 10, 205-212.
- Çava, K., 2019. FDM tip 3 boyutlu yazıcı le termoplastik petek/Öksetik çekirdek malzeme tasarımı, üretimi ve sandviç kompozitlerde kullanım özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 67, Trabzon.
- Elipe, J. C. A., and Lantada, A. D., 2012. Comparative study of auxetik geometries by means of computer-aided design and engineering. *Smart Materials and Structures*, 21, 1-12.
- Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchison I. J., Rogers S. C., 1991. Molecular Network Design, *Nature* 353, 124.
- Evans, K. E., 2011. Expanding Blast-Proof Curtain Will Reduce Impact of Bomb Explosions. *Engineering and Physical Sciences Research Council*, 1-2.
- Evans, K.E., Alderson, A., 2000. Auxetik materials: functional materials and structures from lateral thinking!. *Advanced Materials*, 2000. 12 (9), 617-628.

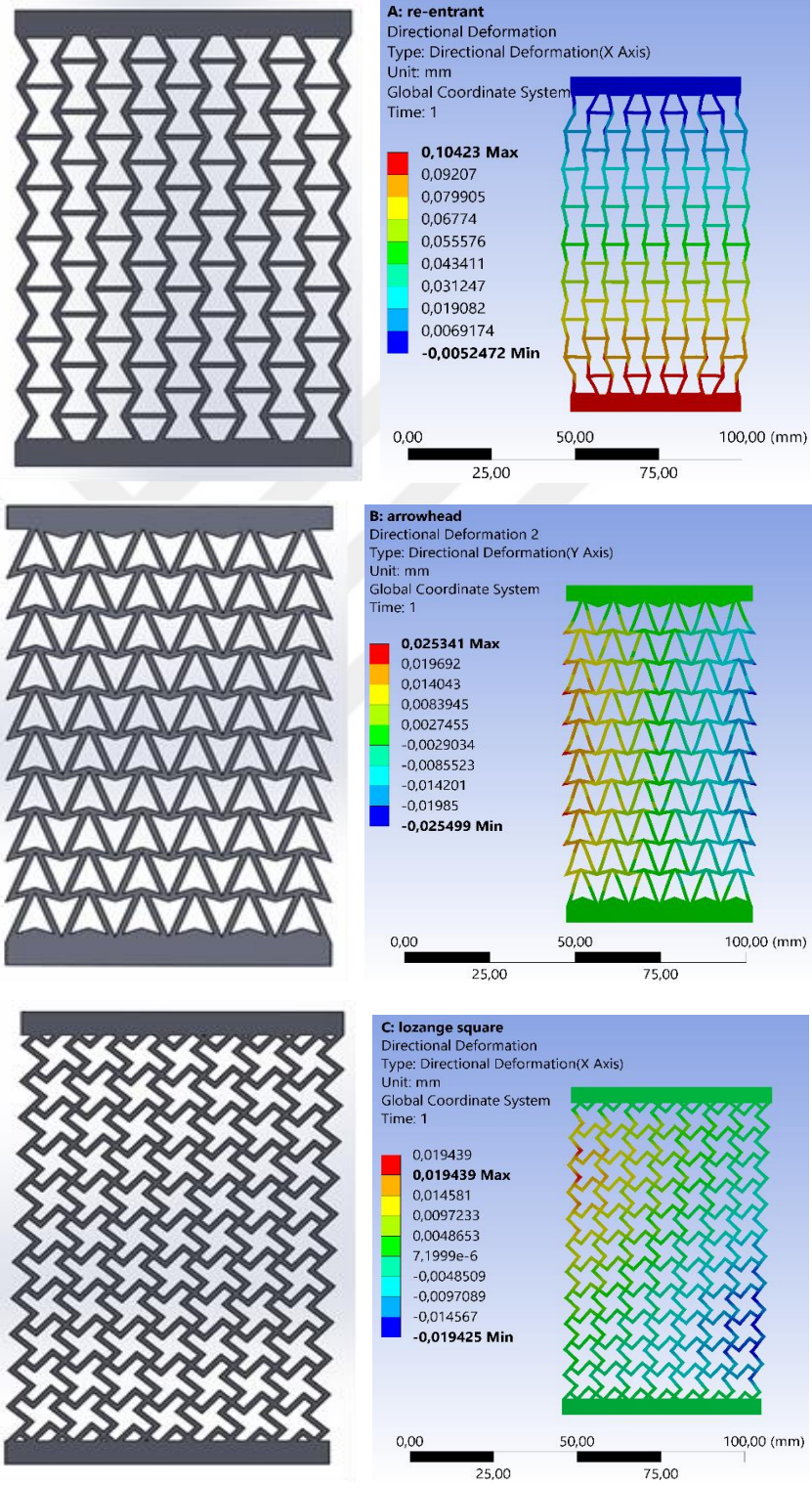
- Foster, L., Paketi, P., Allen, T., Senior, T., Duncan, O., Alderson, A., 2018. Application of Auxetic Foam in Sports Helmets. *Applied Sciences*, 8 (3), 1-12.
- Friis, E. A., Lakes, R. S., and Park, J. B., 1988. Negative Poisson's ratio polymeric and metallic materials. *Journal of Materials Science*, 23, 4406-4414.
- Frohlich, L. M., Labarbera, M., Stevens, W. P., 1994. Poisson's ratio of a crossed fibre sheath: the skin of aquatic salamanders. *Journal of Zoology*, 232, 231–252.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G. S. and Robertson C. I., 1982. The Mechanics of two Dimensional Cellular Solids. *CI proceedings of Royal Society London*, 382(A), 25–42.
- Grima, J. N., Gatt, R., Alderson, A. and Evans, K. E., 2005. On the potential of connected stars as auxetik systems. *Molecular Simulation*, 31(13), 925-935.
- Gunton, D. J., and Saunders, G. A., 1972. The Young's modulus and Poisson's ratio in arsenic, antimony and bismuth, *Journal of Materials Science*, 7 (9), 1061–1068.
- Güler, M. S., 2013. Dolgu malzemesi özellikleri, dolgu geometrisi ve çalışma şartlarının dolgulu dışteki gerilme dağılımına etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Hou, X., Hu, H., Silberschmidt, V., 2012. A novel concept to develop composite structures with isotropic negative Poisson's ratio: Effects of random inclusions. *Composites Science and Technology*, 72, 1848-1854.
- Hu, L. L., Luo, Z. R., Zhang, Z. Y., Lian, M. K., Huang, L. S., 2018. Mechanical property of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation. *Composites Part B*, 1-34.
- Işıltan, A., 2017. Negatif Poisson oranına sahip bir mikro-kafes yapının tasarımı ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 67, İstanbul.
- Karaca, A. A., 2016. Auxetik malzemelerin deneysel olarak ve Sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 71, Bursa.
- Khan, S. Z., Mustahsan, F., Mahmoud, E. R. I., Masood, S. H., 2020. A novel modified re-entrant honeycomb structure to enhance the auxetik behavior: Analytical and numerical study by FEA. *Materials Today: Proceedings*, 1-5.
- Lakes, R. S., 1987. Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. *Science*, 235, 1038–1040.
- Lees, C., Vincent, J. E. V., and Hillerton, J. E., 1991. Poisson's ratio in skin. *Biomed Mater. Eng.*, 1 (1), 19–23

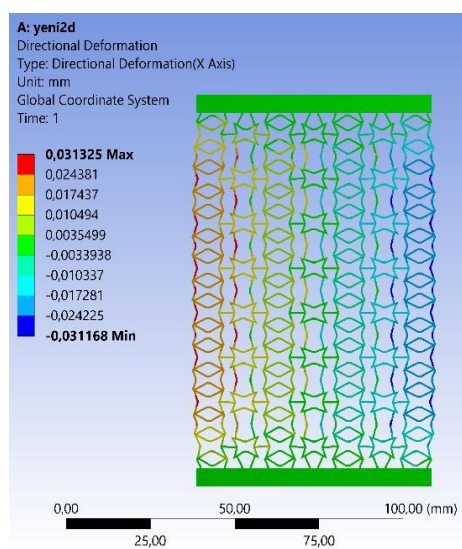
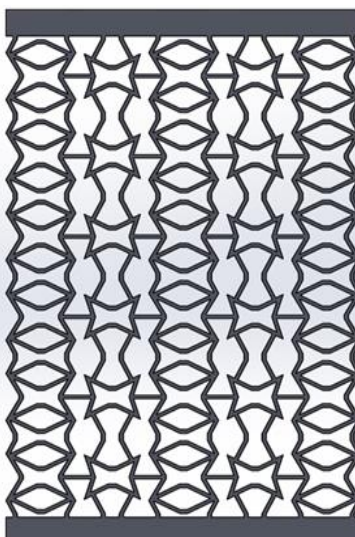
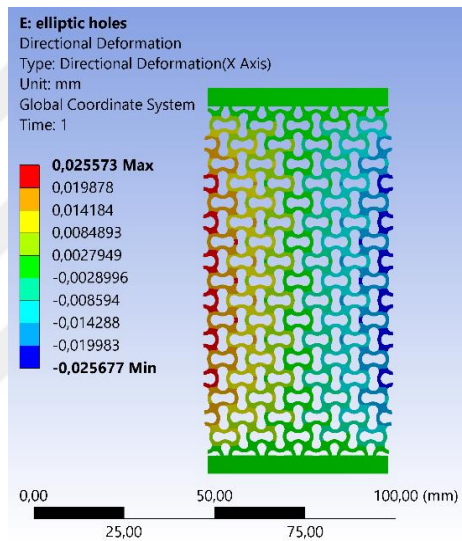
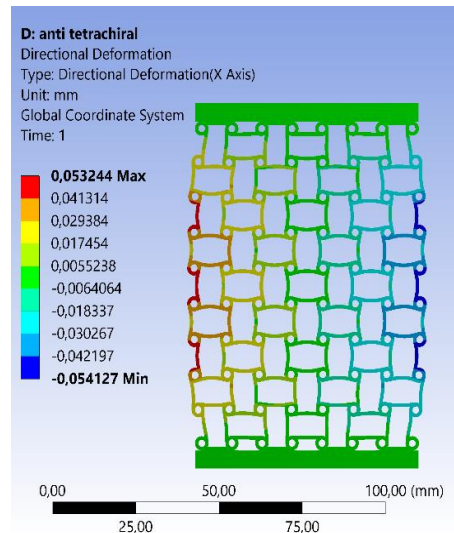
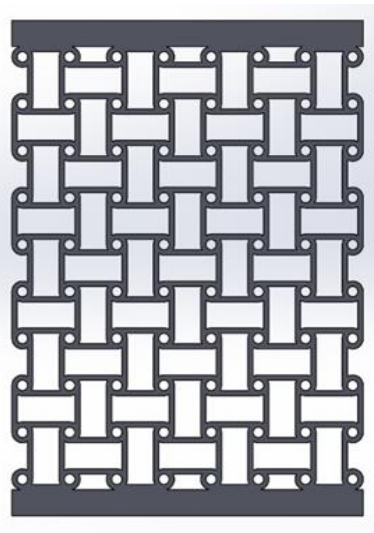
- Ledbetter, H. and Lei M., 1991. Poisson's Ratio of Porous and Microcracked Solids: Theory and Application to Oxide Superconductors. *Journal of Materials Research*, 6, 2253–2255.
- Li, Y., 1976. The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus and shear modulus in hexagonal materials. *Physica Status Solidi Series A*, 38 (1), 171–175.
- Love, A. E. H., 1927. *A treatise on the mechanical theory of elasticity*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lukovic, M., Konakovic, P., Pauly, M., 2018. Computational Design of Deployable Auxetic Shells. Chalmers University of Technology, 22-25 September, *Advances in Architectural Geometry*, 1-13, Gothenburg, Sweden
- Ma, C., Lei, H., Liang, J., Wu, W., Wang, T., Fang, D., 2018. Macroscopic mechanical response of chiral-type cylindrical metastructures under axial compression loading. *Materials & Design*, 1-38.
- Miller, W., Hook, P. B., Smith, C. W., Wang, X., Evans, K. E., 2009. The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite. *Composites Science and Technology*, 69(5), 651-655.
- Moyers, R., 1992. Dilator for Opening the Lumen of a Tubular Organ. United State of America, Patent No. 5108413.
- Munib, Z., Ali, M. N., Ansari, U., Mir, M., 2015. Auxetik polymeric bone stent for tubular fractures: design, fabrication and structural analysis. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 54 (16), 1667-1678.
- Naidoo, P., Drosopoulos, G., 2020. Evaluation of the dynamic response of structures using auxetic-type base isolation. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 51, 52-70.
- Panico, M., Langella, C., Santulli, C., 2017. Development of a Biomedical Neckbrace through Tailored Auxetic Shapes. *Italian Journal of Science & Engineering*, 1 (3), 105-117.
- Rad, M. S., Hatami, H., Ahmad, Z., Yasur, A. K., 2019. Analytical solution and finite element approach to the dense re-entrant unit cells of Auxetik structures. *Springer*, 1-15.
- Rad, M. S., Hatami, H., Alipouri, R., Nejad, A. F., Omidinasab, F., 2019. Determination of energy absorption in different cellular auxetik structures. *Mechanics & Industry* 20, 302, 1-11.
- Smardzewski, J., 2013. Auxetik springs for seating. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37, 369-376.
- Sree P., S., N., Teja, G., S., R., C., Krishna, A., S., Rao, B., K., D., Aravind, A., A., Rao, B., L., 2020, Modeling and Analysis of Structures with Negative Poisson's Ratio *International Journal Of Engineering Research & Technology (Ijert)*, 09.

- Su, Y., Wu, X., Shi, J., 2020. A novel 3D printable multimaterial auxetik metamaterial with reinforced structure: Improved stiffness and retained auxetik behavior. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-11.
- Subramani, P., Rana, S., Oliveira, D. V., Fangueiro, R., and Xavier, J., 2014. Development of novel auxetik structures based on braided composites. *Materials and Design*, 1-22.
- Ungureanu, B., Achaoui, Y., Enoch, S., Brûlé, S., Guenneau, S., 2015. Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections. *arXiv preprint arXiv:1510.08785*.
- Uzun, M., 2017. Negatif Poisson oranına (Auxetik) sahip malzemeler ve uygulama alanları. *The Journal of Textiles and Engineers*, 77, 13-18.
- Veronda, D. R. and Westmann, R. A., 1970. Mechanical Characterisation of Skin Finite Deformations. *Journal of Biomechanics*, 13, 111–124.
- Vijayavenkataraman, S., Gopinath, A., Lu, W. F., 2020. A new design of 3D-printed orthopedic bone plates with auxetik structures to mitigate stress shielding and improve intra-operative bending. *Bio-Design and Manufacturing*, 3, 98-108.
- Wang, H., Zhang Y., Lin W., Qin Q., 2020. A novel two-dimensional mechanical metamaterial with negative Poisson's ratio. *Computational Materials Science*, 171, 1-9.
- Wang, X., Li, X., Ma, L., 2016. Interlocking assembled 3D auxetic cellular structures. *Materials and Design*, 99, 467-476.
- Williams, J. L. and Lewis, J. L., 1982. Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis. *Journal Biomech Eng.*, 104, 5–56.
- Wu, T., Li, M., Zhu, X., Lu, X., 2020. Research on non-pneumatic tire with gradient anti-tetrachiral structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-9.
- Yang, L., Harrysson, O., West H., Cormier, D., 2015. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetik structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and Structures*, 1-16.
- Zahra, T., Dhanasekar, M., 2017. Characterisation of cementitious polymer mortar – Auxetik foam composites. *Construction and Building Materials*, 147, 143-159.
- Zhang, G. H., Ghita, O., Evans, K. E., 2015. The manufacture and mechanical properties of a novel negative Poisson's ratio 3-component composite. *20th International Conference on Composite Materials Copenhagen*, 1-7.

EKLER

EK-1 İki boyutlu yapıların çekme etkisinde oluşan büyük ölçekli (Auto Scale) şekil değiştirme görüntüleri





EK-2 Üç boyutlu yapıların basınç ve çekme etkisinde oluşan büyük ölçekli (Auto Scale) şekil değiştirme görüntüleri

