

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YARI SEKİZGEN GİRİNTİLİ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şenay YENER

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

EYLÜL 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YARI SEKİZGEN GİRİNTİLİ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Şenay YENER
(514211025)**

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kaan YILDIZ

EYLÜL 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**PARAMETRIC INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES
OF SEMI-OCTAGONAL RE-ENTRANT STRUCTURES**



M.Sc. THESIS

**Şenay YENER
(514211025)**

Department of Defense Technologies

Defense Technologies Programme

Thesis Advisor: Asst. Prof. Dr. Kaan YILDIZ

SEPTEMBER 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 514211025 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Şenay YENER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YARI SEKİZGEN GİRİNTİLİ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Kaan YILDIZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Seher EKEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Fatih USTA
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Eylül 2025**
Savunma Tarihi : **22 Eylül 2025**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi birikimi, sabrı ve yol göstericiliğiyle bana büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Kaan YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin akademik bakış açısı ve yapıcı yönlendirmeleri, çalışmamın şekillenmesinde önemli rol oynamıştır.

Bu süreçte bana her zaman moral ve destek veren aileme teşekkürlerimi sunuyorum. Varlıkları ve inançları, zorlu zamanlarda bana güç ve motivasyon kaynağı olmuştur.

Eylül 2025

Şenay YENER
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Oksetik Malzemelere Genel Bakış	1
1.1.1 Girintili yapı (Re-enrant)	3
1.1.2 Kiral (Chiral) petek yapısı	5
1.1.3 Dönen birimler (Rotating units)	6
1.1.4 Eksik kiriş (Missing rib)	7
1.1.5 Çift ok ucu (Double arrowhead)	8
1.2 Tezin Amacı	8
2. LİTERATÜR TARAMASI	9
3. SOR BİRİM HÜCRESİ VE LATİS YAPISI	13
3.1 SOR Yapısının Geometrik Tanımı	13
3.2 SOR Yapısının FEA Analizi Detayları	15
4. MODEL, SİMÜLASYON VE SONUÇLAR	19
4.1 SOR Birim Hücresinin Tasarım Parametreleri	19
4.1.1 Latis yapılarının tasarım parametreleri	20
4.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	21
4.2.1 Genişliğin basma modülüne etkisi	21
4.2.2 Açının basma modülüne etkisi	23
4.2.3 Genişliğin basma dayanımına etkisi	23
4.2.4 Açının basma dayanımına etkisi	23
4.2.5 Genişliğin ortalama ezilme gerilmesine etkisi	24
4.2.6 Açının ortalama ezilme gerilmesine etkisi	24
4.2.7 Genişliğin yoğunlaşma gerinimine etkisi	25
4.2.8 Açının yoğunlaşma gerinimine etkisi	26
4.2.9 Genişliğin enerji emilimi ve özgül enerji emilimine etkisi	28
4.2.10 Açının enerji emilimi ve özgül enerji emilimine etkisi	38
5. SONUÇ	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51



KISALTMALAR

2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu
EA	: Enerji Emilimi
FEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
NPR	: Negatif Poisson Oranı
PLA+	: Polilaktik Asit
PPR	: Pozitif Poisson Oranı
SEA	: Özgül Enerji Emilimi
SOR	: Yarı Sekizgen Girintili
ZPR	: Sıfır Poisson Oranı



SEMBOLLER

D	: Latis yapının derinliği
E	: Young modülü
E_c	: Basma modülü
F(x)	: Uygulanan kuvvet
H	: Latis yapının yüksekliği
h	: Birim hücrenin yüksekliği
h(x)	: Enerji emilimi verimliliği
t	: Birim hücre duvar kalınlığı
U	: Enerji emilimi
w	: Birim hücrenin genişliği
W	: Latis yapının genişliği
x_d	: Yoğunlaşma yer değiştirmesi
x_y	: Akma yer değiştirmesi
ε	: Gerinim
ε_c	: Basma şekil değiştirme
ε_d	: Yoğunlaşma gerinimi
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilme
σ_{basma}	: Basma gerilmesi
σ_c	: Basma dayanımı
σ_y	: Akma gerilmesi
θ	: Birim hücre açısı
Δρ	: Bağıl yoğunluk



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : SOR yapısına ait tasarım değişkenleri (boyutlar mm olarak verilmiştir).	15
Çizelge 3.2 : PLA+ malzemesinin mekanik özellikleri [38]	16
Çizelge 4.1 : SOR oksetik birim hücrelerine ait tasarım parametreleri.....	20
Çizelge 4.2 : Latis yapısı tasarım parametreleri ve hücre sayıları	21
Çizelge 4.3 : Tüm tasarımların mekanik özellikleri sonuçları.....	22
Çizelge 4.4 : Enerji emilimi ve SEA sonuçları.....	29
Çizelge 4.5 : Enerji emilimi ve SEA sonuçları.....	38



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Poisson oranının davranışları [2].....	2
Şekil 1.2 : Oksetik olmayan ve oksetik yapılarının girinti direnci [5].....	2
Şekil 1.3 : Oksetik olmayan ve oksetik yapıların eğilme davranışları [8].....	3
Şekil 1.4 : 2D Girintili yapı [11].....	4
Şekil 1.5 : Girintili yapıların oksetik davranışı [13].....	4
Şekil 1.6 : Farklı dönme simetrisine sahip çeşitli yıldız şekilli sistemler: (a) Oksetik bal peteği; (b) 3'lü yıldız sistemi; (c) 4'lü yıldız sistemi; (d) 6'lü yıldız sistemi [15].....	5
Şekil 1.7 : Kiral petek yapısı [16].....	5
Şekil 1.8 : Kiral yapıların büzülmesi; (a) genişlemiş hali (b) sıkışmış üçgensel hali, (c) maksimum uzama durumundaki tek bir yapısal eleman (d) maksimum büzülme durumundaki hali [18].....	6
Şekil 1.9 : Oksetik dönen kare yapısı [20].....	6
Şekil 1.10 : Dönen üçgenler geometrileri [20].....	7
Şekil 1.11 : Dönen birim geometrisinin varyasyonları: (a) Daha genel bir form olan dönen paralelkenar yapısı ve (b) Farklı boyutlardaki karelerden oluşan “dönen kareler” yapısı [20].....	7
Şekil 1.12 : Eksik kiriş yapısının tanımı [21].....	7
Şekil 1.13 : Bir kompozit çift ok ucu oksetik yapısının birim hücresinin şematik temsili [22].....	8
Şekil 2.1 : Zırhlı araçlarda balistik ve darbe dayanımını iyileştirmek amacıyla hafif oksetik kompozit panellerin kullanımı üzerine bir uygulama.....	11
Şekil 3.1 : (a) İran, İsfahan'daki Cuma Camii; (b) caminin ikinci katında bulunan mozaik deseni; (c) sadeleştirilmiş desen ve dört farklı sekizgen tipinin temsili; (d) yeni oksetik birim hücre tasarım süreci; (e) yeni sekizgen desen; (f) SOR birim hücresinin tasarım parametreleri.....	14
Şekil 3.2 : SOR birim hücresi kullanılarak oluşturulan latis yapı tasarımı.....	15
Şekil 3.3 : PLA+ malzemesinin gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı [38].....	16
Şekil 3.4 : FEA Modeli.....	17
Şekil 3.5 : Referans çalışma ile farklı mesh boyutlarının karşılaştırılması.....	17
Şekil 4.1 : Tüm 1 mm duvar kalınlığındaki yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve yoğunlaşma bölgeleri.....	27
Şekil 4.2 : Tüm 0.5 mm duvar kalınlığındaki yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve yoğunlaşma bölgeleri.....	27
Şekil 4.3 : Tüm 1.5 mm duvar kalınlığındaki yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve yoğunlaşma bölgeleri.....	28
Şekil 4.4 : SOR1-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.....	30
Şekil 4.5 : SOR2-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.....	31

Şekil 4.6 :	SOR3-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	32
Şekil 4.7 :	SOR1-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	33
Şekil 4.8 :	SOR2-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	34
Şekil 4.9 :	SOR3-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	35
Şekil 4.10 :	SOR1-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	36
Şekil 4.11 :	SOR2-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	37
Şekil 4.12 :	SOR3-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	38
Şekil 4.13 :	SOR4-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	39
Şekil 4.14 :	SOR5-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	40
Şekil 4.15 :	SOR4-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	41
Şekil 4.16 :	SOR5-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	42
Şekil 4.17 :	SOR4-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	43
Şekil 4.18 :	SOR5-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları	44

YARI SEKİZGEN GİRİNTİLİ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Teknolojinin hızla gelişmesi, pek çok mühendislik alanında yenilik ihtiyacını artırmıştır. Bu ihtiyaçların başında ise havacılık ve savunma sanayii gelmektedir. Özellikle malzeme bilimi, söz konusu alanlarda önemli teknolojik ilerlemelere öncülük etmiştir. Hafiflik, yüksek dayanım ve enerji emilimi kapasitesi gibi malzeme özellikleri, savunma ve havacılık uygulamalarında temel gereklilikler arasında yer almaktadır. Bu gerekliliklere yanıt verebilecek yenilikçi çözümlerden biri ise oksetik yapı tasarımlarıdır. Oksetik malzemeler, negatif poisson oranına sahip alışılmışın dışında malzeme özellikleri gösteren yapılardır. Bu özellik, bir malzemeye uygulanan çekme kuvvetine dik yönde genişleme meydana gelmesiyle tanımlanır. Bu sıradışı davranışları ile geleneksel malzemelerden ayrılırlar ve darbe dayanımı, enerji emilimi ve geometrik kararlılık gibi mekanik özellikleri ile öne çıkarlar. Özellikle zırh sistemleri, koruyucu giysiler, uçak ve araç gövdeleri gibi enerji sönmüleme ve patlamaya karşı direnç gerektiren uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadırlar. Bu tez çalışmasında, savunma teknolojileri bağlamında oksetik yapıların mekanik performansını artırmaya yönelik sonlu elemanlar analizleri ile parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında, literatürde yaygın olarak kullanılan girintili hücre tipinin bir versiyonu olan yarı sekizgen girintili birim hücreler tercih edilmiştir. Temel geometrik parametreler olarak hücre yüksekliği (h), hücre genişliği (w) ve girinti açısı (θ) çeşitli kombinasyonlarla modellenmiş; bu parametrelerin yapının mekanik davranışı üzerindeki etkileri sistematik bir şekilde incelenmiştir. Değerlendirme kriterleri arasında basma modülü (compressive modulus), basma dayanımı (compressive strength), ortalama ezilme gerilmesi (mean crushing stress), özgül enerji emilimi (specific energy absorption), enerji emilimi (energy absorption) ve yoğunlaşma gerinimi (densification strain) gibi mekanik özellikler yer almıştır. Sayısal analizler, ABAQUS/Explicit çözümleyicisi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, modellerde C3D8R tipi (üç boyutlu, azaltılmış entegrasyonlu, 8 düğüm noktalı) katı elemanlar tercih edilmiştir. Her bir oksetik yapı modeli, -y yönünde %64 oranında eksenel basma deformasyonuna maruz bırakılmıştır. Malzeme modeli olarak polilaktik asit bazlı PLA+ kullanılmış; bu malzemenin mekanik özellikleri ABAQUS ortamına dijital olarak tanımlanmıştır. Temas tanımı için ‘sert temas’ (hard contact) kullanılmış ve temas yüzeyleri arasında 0,1 sürtünme katsayısı atanmıştır. Yüksek çözünürlükte ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla, analizlerde 0,4 mm kenar uzunluğuna sahip homojen bir mesh ağı kullanılmıştır. ABAQUS ortamından elde edilen kuvvet-deplasman verileri, MATLAB yazılımı kullanılarak işlenmiş ve bu veriler, yapının gerilme- birim şekil değiştirme eğrilerine dönüştürülmüştür. Elde edilen bu eğriler, yapının parametrelerinin yapısal performans üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmalı olarak incelemeye olanak tanımış ve çeşitli geometrik parametrelerin, özellikle girinti açıları (θ) ile hücre yüksekliği-genişlik oranı (h/w) gibi faktörlerin mekanik performans üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu

analizler, geometrik parametrelerin oksetik yapıların enerji emilimi, deformasyon davranışı ve genel mekanik özellikler üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, en uygun yapısal özelliklere sahip oksetik tasarımların, savunma ve havacılık sektörlerinde hafif, dayanıklı ve yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip sistemlerin tasarımında önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu yapıların otomotiv, biyomedikal ve spor güvenliği gibi çeşitli mühendislik alanlarında da kullanılma potansiyeline sahip olabileceği düşünülmekte ve bu alanlarda katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.



PARAMETRIC INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SEMI-OCTAGONAL RE-ENTRANT STRUCTURES

SUMMARY

The rapid advancement of technological developments has significantly increased the demand for the design of high-performance, durable, and lightweight structures in the defense and aerospace industries. The optimization of material properties for structures used in these fields is expected to provide substantial advantages, particularly in terms of rigidity, impact resistance, and energy absorption capacity. At the core of these requirements lie critical engineering goals such as reducing fuel consumption, increasing payload capacity, ensuring energy efficiency, and enhancing operational safety. Therefore, reducing weight while maintaining mechanical strength has become one of the fundamental challenges to be addressed in modern engineering. In recent years, the need for lightweight, rigid, and energy-absorbing materials has been rapidly increasing not only in the defense and aerospace sectors but also in areas such as space technologies, automotive engineering, robotics, and biomedical applications. This trend has encouraged the investigation of innovative geometric approaches and smart material behaviors within the fields of materials science and mechanical design. In this context, auxetic structures with a negative Poisson's ratio, which behave entirely differently from conventional materials, have become the focus of intense scientific research in recent years. Auxetic materials exhibit an unusual mechanical response by expanding both in the direction of the applied load and in the perpendicular direction when subjected to stress. This unique property provides several mechanical advantages such as high shear strength, enhanced impact resistance, superior energy dissipation capability, and increased puncture resistance. The concept of auxetic behavior was first introduced in the scientific literature and has since evolved into a broad field of research through both experimental and numerical studies. Honeycomb, lattice, foam, and re-entrant structural types have demonstrated that auxetic behavior can be achieved through various geometric principles. The geometric nature of these structures has the potential to create a mechanical response that is far more complex and, at the same time, more controllable than that of conventional materials. While traditional materials tend to contract laterally under load, auxetic materials expand, which helps to homogenize the stress distribution within the material and prevent the accumulation of local deformations. This behavior delays crack propagation and reduces the risk of sudden failure. These distinctive characteristics offer significant advantages, especially in systems exposed to repeated impacts, collisions, or high-energy interactions. Recent studies have shown that auxetic structures possess high potential not only at the theoretical level but also in practical engineering applications. For instance, numerous studies have been conducted on the use of auxetic geometries in impact-absorbing panels, personal protective armor systems, automotive crash absorbers, and aerospace structural components. In the defense industry, such structures provide great advantages in armor systems, mine protection panels, and military vehicle body designs due to their energy dissipation capability. In addition,

their ability to distribute energy in a controlled manner during high-speed impacts enables them to offer next-generation material solutions that can protect both vehicle personnel and overall system integrity. Compared to conventional materials, auxetic structures have the potential to maintain structural integrity more effectively by distributing impact energy over a wider area. This feature is particularly crucial in conditions involving high-energy collisions or explosive effects, where maintaining durability and reliability is vital. Thus, even in environments characterized by intense energy interactions, the robustness and safety of the structure can be significantly enhanced. For these reasons, the investigation and geometric optimization of auxetic materials hold great strategic importance for the future of defense technologies and high-performance engineering structures.

In material design, cultural and artistic architectural patterns have also attracted considerable attention. In this study, an original semi-octagonal auxetic unit cell, named SOR (Semi-Octagonal Re-entrant), was developed by drawing inspiration from the geometric motifs of the Jameh Mosque of Isfahan, one of the significant works of Islamic architecture. This approach aims to integrate traditional geometric patterns with modern engineering principles, transforming aesthetic design into a functional structural advantage. Accordingly, the SOR geometry was evaluated not only as a visually inspired element derived from a cultural form but also as an engineering solution with the potential to enhance mechanical performance. As a result, the relationship established between the geometric principles of traditional art and the mechanical characteristics of modern auxetic structures provides an innovative contribution to interdisciplinary design understanding.

In this thesis, the mechanical properties of semi-octagonal re-entrant auxetic structures were parametrically investigated, and their potential applications in the defense industry were evaluated. The main objective of the research is to analyze in detail the effects of geometric parameters—such as cell wall thickness, width, and angle—on mechanical performance. In this way, the quantitative relationship between structural strength, energy absorption capacity, and deformation behavior of the material has been revealed. For this purpose, fifteen different cell configurations were designed using SolidWorks, and a comparative evaluation was performed by maintaining the same number of unit cells in each model to ensure similar relative density. Additionally, to preserve the geometric accuracy of the generated models and increase the reliability of the results, all dimensional ratios were kept constant within specific engineering constraints. Geometric diversity was achieved through variations in wall thickness, height-to-width ratio (h/w), and re-entrant angle (θ). The effects of these parameters were assessed in terms of energy absorption, compressive strength, and deformation behavior. During the analysis process, deformation patterns that occurred under loading were closely examined, and the relationship between auxetic behavior and geometric parameters was clarified. The obtained results demonstrated that certain geometric combinations significantly enhance energy absorption capacity and improve structural stability. Proper optimization of these parameters constitutes a fundamental step toward the design of auxetic structures with the desired mechanical properties. Therefore, this study is not only a theoretical investigation but also provides a practical engineering approach for developing high-performance, lightweight, and durable auxetic structures suitable for use in the defense and aerospace industries.

Initially, the cell height (h) was set to 12 mm, the cell width (w) to 12 mm, and the angle (θ) to 120 degrees. Using these basic parameters, two different structures with h/w ratios of 1.2 and 0.8 were designed, where the width (w) values were selected as

10 mm and 15 mm, respectively. This configuration enabled the investigation of the effects of the h/w ratio on the mechanical properties. Furthermore, by keeping the h/w ratio constant (1), the angle (θ) was varied by ± 10 degrees to examine its influence on the overall behavior of the structure. As a result of these analyses, a total of five distinct designs were obtained. This systematic approach made it possible to understand how each geometric parameter affects the structural performance both individually and in interaction with other parameters.

During the design process, the wall thickness was initially set to 1 mm for all models; later, additional variations with wall thicknesses of 0.5 mm and 1.5 mm were introduced. The top and bottom plates were designed with a thickness of 3 mm to enhance structural rigidity and durability. The relative density was taken into consideration in determining the number of cells, ensuring comparable density values across all models for a fair evaluation. Maintaining constant relative density was particularly critical, as density directly affects both energy absorption capacity and mechanical strength. This variation is of critical importance for examining the effects of mass distribution within the material and its energy storage capacity. While an increase in wall thickness is generally expected to enhance stiffness, it also alters the energy absorption behavior and local buckling modes of the structure. Therefore, the thickness parameter has been treated as a key design variable, providing control over both strength and deformation characteristics throughout the optimization process.

Parametric analyses revealed that changes in the cell geometry significantly affect the mechanical behavior of the structures. Increasing the h/w ratio resulted in notable improvements in compressive modulus and maximum strength, as well as improvements in energy absorption and specific energy absorption (SEA) values. This indicates that auxetic materials with taller cell structures exhibit more rigid behavior under impact and demonstrate more effective performance in energy dissipation. Conversely, increasing the width (reducing the h/w ratio) led to a decrease in crushing resistance and caused more sudden and irregular changes in structural deformation. These findings clearly indicate that the h/w ratio is a critical design parameter directly affecting the energy dissipation and impact resistance performance of auxetic structures.

The angle (θ) parameter, while having a positive effect on rigidity, contributed more limitedly to energy absorption. Angles exhibited fluctuating results in specific energy absorption, indicating that the angle must be optimized in conjunction with other parameters. While the angle alone is not sufficient, when combined with appropriate h/w ratios, it contributes to the mechanical performance of the structure. In particular, certain angular configurations were observed to affect the collapse mechanism of the structure, thus altering the energy absorption efficiency. This suggests that auxetic structures represent a multi-faceted optimization problem and emphasizes that focusing on a single parameter is not sufficient.

As a result, the highest-performing structure was determined to be a configuration with a high h/w ratio and moderate angles. This structure represents an ideal design approach for defense and aerospace applications, offering high impact resistance and energy absorption capacity. Furthermore, the deformation modes analyzed demonstrate that the controlled collapse behavior of such auxetic structures provides significant engineering solutions for applications requiring high security, such as armor systems, impact protection panels, and military vehicle bodies. This controlled

collapse allows the material to gradually absorb impact energy, preventing localized damage and reducing the forces transmitted to the main structure.

This thesis demonstrates that semi-octagonal re-entrant auxetic structures can be geometrically optimized to design lightweight, rigid, and energy-absorbing structures for use in the defense industry. The findings suggest that these structures can provide substantial benefits not only in defense but also in other engineering disciplines such as automotive, biomedical, and sports safety. In conclusion, this work makes an important contribution to understanding the mechanical behavior of auxetic structures and improving their design.



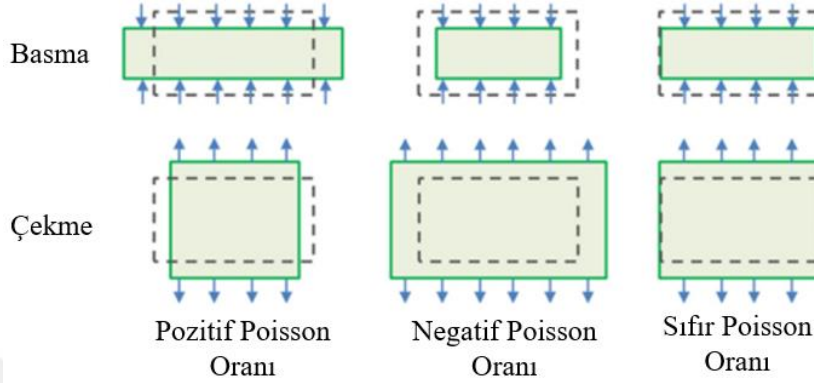
1. GİRİŞ

Malzeme bilimi ve yapısal tasarım alanlarında, hücresel katılar olarak da bilinen latis yapılar, düzenli veya düzensiz olarak tekrarlanarak oluşan hafif fakat dayanıklı mühendislik yapılarıdır. Yüksek enerji emme kapasitesi ve optimize edilebilir mekanik özellikleri sayesinde savunma teknolojileri, havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Latis yapılar bu alanlardaki teknolojik gelişmeler doğrultusunda önemli araştırma konusu haline gelmiştir. Latis yapıların mekanik performansları, sadece kullanılan malzemenin özelliklerine değil, aynı zamanda sahip oldukları geometrik konfigürasyonlara da bağlı bir durumdur. Bu nedenle, latis yapıların deformasyonunu anlamak ve kontrol etmek, performansın optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Poisson oranı, latis yapıların deformasyon davranışlarının değerlendirilmesinde belirleyici parametrelerden biridir. Bir malzeme veya yapıya eksenel yönde uygulanan deformasyona karşılık, enine yönde gözlemlenen birim şekil değişiminin oranı, Poisson oranı olarak tanımlanır. Yapıların Poisson oranlarına göre sınıflandırılması, hem mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını hem de uygulamaya özel tasarımların geliştirilmesini mümkün kılar.

1.1 Oksetik Malzemelere Genel Bakış

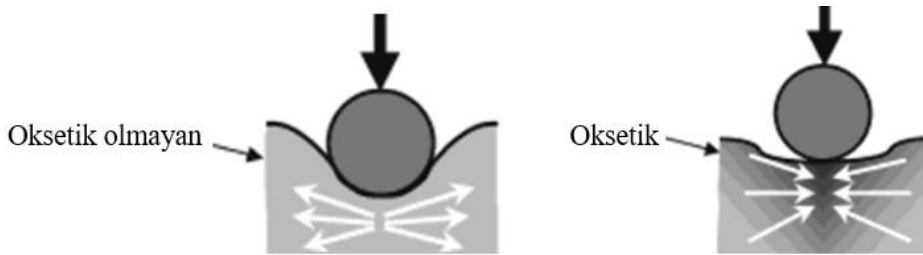
Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan geleneksel malzemelerin büyük çoğunluğu pozitif Poisson oranına (PPR) sahiptir. Ancak, bu klasik malzemelerin aksine, negatif Poisson oranına (NPR) sahip özel yapıdaki malzemeler de mevcuttur. Bu tür yapıların tanımlanması amacıyla Evans tarafından, 1991 yılında “oksetik” terimini önerilmiştir [1]. Yunanca “oksetikos” kelimesinden türetilen bu terim, “genişlemeye eğilimli” anlamına gelmektedir. Oksetik malzemeler, geleneksel malzeme davranışlarına kıyasla oldukça farklı mekanik özellikler sergiler. NPR’ye sahip bir yapı, çekme kuvveti uygulandığında bu kuvvete dik yönde genişleme; basma kuvveti uygulandığında ise daralma eğilimi gösterir [2]. Fakat geleneksel izotropik malzemelerde Poisson oranı genellikle pozitif ve teorik olarak en fazla +0.5 olabilir [3]. Bununla birlikte, bazı özel malzemeler veya geometrik olarak tasarlanmış yapılar

sıfır Poisson oranı (ZPR) gösterebilir [2]. Örneğin, oksetik köpükler ve girintili hücre yapıları bu tür davranışlara sahip yapılara örnek olarak gösterilebilir. Şekil 1.1’de, NPR’ye sahip bir yapının deformasyon altındaki davranışı görsel olarak sunulmuştur [2].



Şekil 1.1 : Poisson oranının davranışları [2].

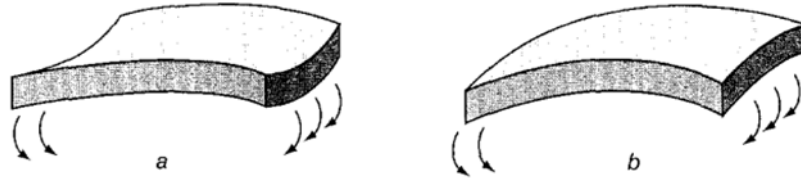
Oksetik yapılar, kendilerine özgü olan yapısal düzenlemeleri sayesinde, geleneksel malzemelere kıyasla birçok üstün mekanik özelliğe sahiptir. Bu özelliklerin başında, yüksek girinti (indentation) direnci gelmektedir [4]. Aynı duvar kalınlığına sahip petek yapılarında oksetik yapının girinti direncinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [5]. Bu fark, Şekil 1.2’de oksetik ve geleneksel petek yapıların girinti testi sonuçları karşılaştırılarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Oksetik olmayan ve oksetik yapılarının girinti direnci [5].

Oksetik yapıların bir diğer avantajı ise sinklastik eğiliktir. Bu özellik bir malzemenin her iki ana ekseninde aynı yönde eğilme yeteneğidir [6,7]. Sinklastik özelliğin kubbe formu oluşturma yeteneği, Şekil 1.3’te gösterilmiştir [8]. Geleneksel malzemeler bu tür deformasyonlara maruz kaldıklarında daha sınırlı bir tepki gösterirler fakat oksetik yapılar NPR sayesinde bu tür deformasyonlara daha kolay uyum sağlarlar. Ayrıca

oksetik yapılar ses ve titreşim sönümleme kapasitesi açısından da önemli avantajlar sunmaktadır [9].



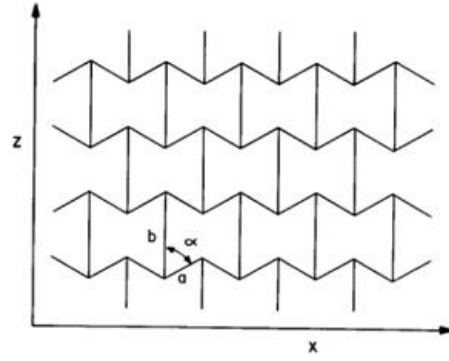
Şekil 1.3 : Oksetik olmayan ve oksetik yapıların eğilme davranışları [8].

Oksetik davranış, yalnızca yapay olarak tasarlanmış mühendislik malzemelerinde değil, aynı zamanda doğada bulunan çeşitli biyolojik ve inorganik yapılarda da gözlemlenebilen bir özelliktir.

Yapay oksetik yapılar bazı mühendislik uygulamaları ile tasarlanan geometrik desenlerdir. Bal peteği yapılar, malzemelere oksetik özellik kazandırmak amacıyla en yaygın kullanılan geometrilerdir. Gibson vd. [10] tarafından 1982 yılında iki boyutlu petek yapılarını tanımlanmıştır. Farklı petek türleri arasında girintili (re-entrant), dönen birimler (rotating units), kiral (chiral), eksik kirişler (missing ribs) ve ok başı (arrowhead) yapıları da bulunmaktadır.

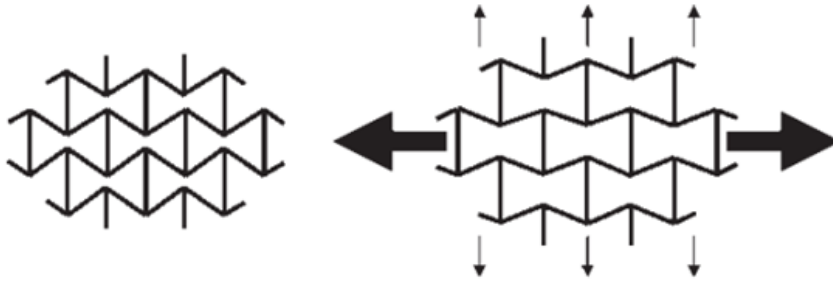
1.1.1 Girintili yapı (Re-entrant)

Oksetik yapıların en bilinen türlerinden biri girintili yapılardır. Bu yapılar, ilk olarak 1980'li yılların başında geliştirilen ve NPR gösteren iki boyutlu (2D) hücresel yapılardır. Şekil 1.4'te bu oksetik davranışın örneği sunulmaktadır [10-12]. Girintili yapılar, klasik petek yapılardan farklı olarak, hücre duvarlarının içe doğru eğilmesiyle tasarlanan yapılardır. Gerilme veya basma kuvvetleri altında, bu özel geometrinin duvarlarının açılması veya kapanması, NPR oluşmasına imkan tanır. Girintili yapılar, çeşitli deformasyon mekanizmalarının analitik hesaplamaları doğrultusunda geliştirilmiştir [11].



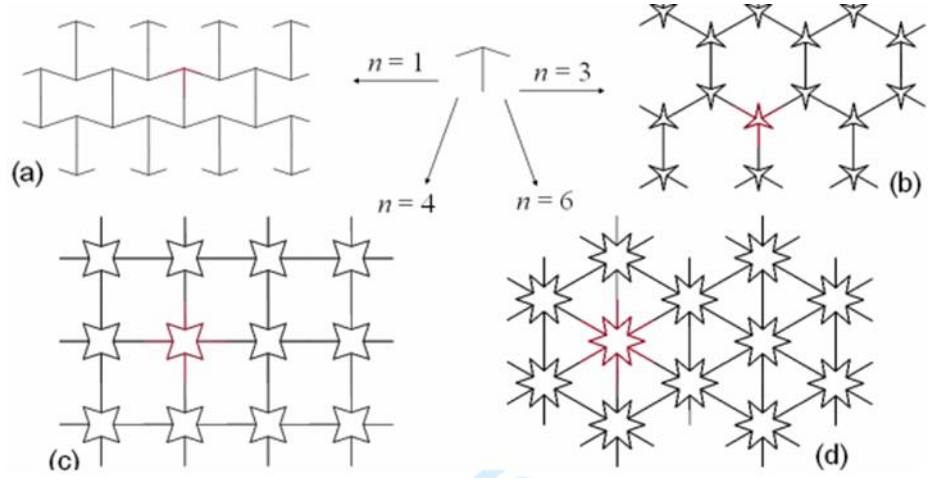
Şekil 1.4 : 2D Girintili yapı [11].

Evans vd. [13], 1994 yılında girintili yapının üç boyutlu (3D) versiyonunu önererek, oksetik yapıların daha karmaşık mühendislik uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılmıştır. Bu sayede 3D girintili yapılarda, hücre duvarlarının üç eksenli olarak düzenlenmesiyle birlikte, yapının tüm yönlerde oksetik özellik göstermesi mümkün kılınır. Böylece, sadece iki boyutlu deformasyon değil, üç boyutlu yükleme koşulları altında da enerji Emilimi, darbe dayanımı ve şekil geri kazanımı gibi işlevler etkili biçimde sağlanabilmektedir. Şekil 1.5'te şematik olarak gösterilen girintili yapıya yatay yönde bir çekme kuvveti uygulandığında, dikey yönlü nervürler (hücre duvarlarını oluşturan ince bağlantı kolları) dışa doğru hareket eder. Bu dışa doğru yer değiştirme, nervürlerin birbirinden uzaklaşmasına neden olur ve yapının hacminde bir artış meydana gelir. Bu mekanik yanıt, girintili yapının temel oksetik etkisini oluşturmaktadır [14].



Şekil 1.5 : Girintili yapıların oksetik davranışı [13].

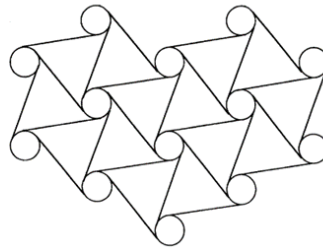
Girintili yapıların birçok farklı geometrik varyasyonu geliştirilmiştir. Bu çeşitliliklerden birisi de yıldız desenli girintili yapılardır. Bu özel yapılar, klasik girintili geometrisinin çok simetrik birer türevi olarak tasarlanmaktadır. Şekil 1.6'da, üç, dört ve altı katlı simetriye sahip yıldız desenli girintili hücre örnekleri sunulmaktadır [15]. Bu tür geometrik düzenlemeler, yapıların mekanik performansını kontrollü bir şekilde optimize etmek amacıyla avantaj sunmaktadır.



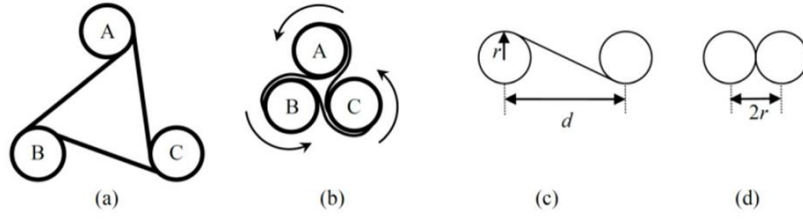
Şekil 1.6 : Farklı dönme simetrisine sahip çeşitli yıldız şekilli sistemler: (a) Oksetik bal peteği; (b) 3'lü yıldız sistemi; (c) 4'lü yıldız sistemi; (d) 6'lı yıldız sistemi [15].

1.1.2 Kiral (Chiral) petek yapısı

Kiral petek yapısı, oksetik malzeme davranışı sergileyen önemli geometrik tasarımlardan biridir [16,17]. Son yıllarda hem akademik hem de mühendislik uygulamalarında yine geniş bir araştırma ağı bulunmaktadır. Bu Kiral yapılarda hücreler genellikle dairesel düğümler ve onları bağlayan eğimli bağlantı çubuklarından oluşur. Bu karakteristik tasarım özelliği sayesinde uygulanan yük altında, yapılar alışılmadık şekilde deformasyona uğrar. Şekil 1.7'de tipik bir kiral latis yapısının geometrisi gösterilmektedir ve dairesel düğümlerin bağlantı çubukları ile olan düzeni açıkça gösterilmektedir. Şekil 1.8'de ise bu yapının dış yükler altındaki deformasyon davranışı gösterilmektedir. Bu deformasyon biçimleri, kiral petek yapısının oksetik özelliğini açıkça ortaya koymaktadır.



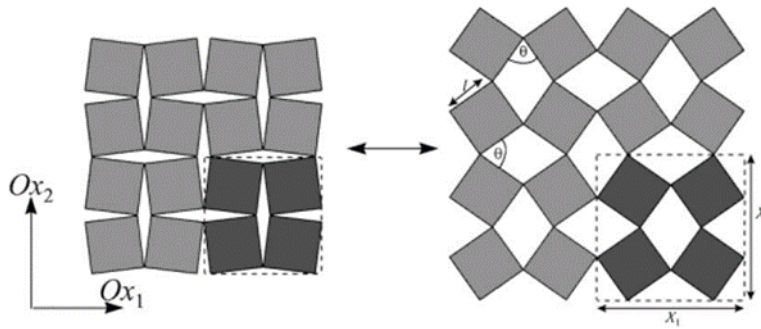
Şekil 1.7 : Kiral petek yapısı [16].



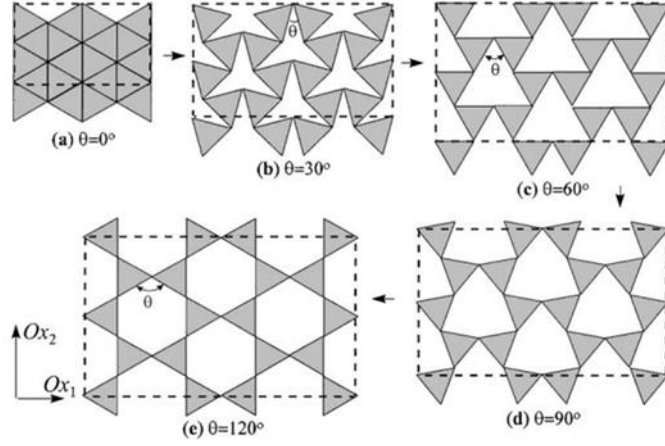
Şekil 1.8 : Kiral yapıların büzülmesi; (a) genişlemiş hali (b) sıkışmış üçgensel hali, (c) maksimum uzama durumundaki tek bir yapısal eleman (d) maksimum büzülme durumundaki hali [18].

1.1.3 Dönen birimler (Rotating units)

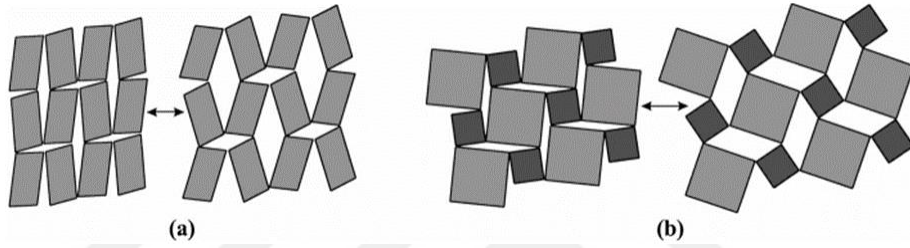
Dönen birimler mekanizmaları, oksetik özellik gösteren bir diğer önemli yapı türüdür. Bu tür yapılar iki boyutlu düzlemde rijit çokgen elemanların birbirine menteşe benzeri bağlantı ile bağlanmasıyla oluşturulur. Bağlantı noktaları, bu yapıya serbest dönme derecesi kazandırır ve bu sayede yapının gösterdiği deformasyon davranışı oksetik bir şekilde karşımıza çıkar. Tek eksenli yükleme altında, bu mekanizmalar birbirine dönerek daha açık bir yapı formuna geçer. Bu hareket sonucu mekanizmada NPR gözlemlenir [19-20]. Dönen birimler yapılarının modellenmesinde genellikle kare, paralelkenar ve üçgen gibi temel çokgen şekiller tercih edilmektedir. Şekil 1.9’da kare birimlerden oluşan bir dönen birimler yapısı, Şekil 1.10’da üçgen birimlerin oluşturduğu yapı ve Şekil 1.11’de ise paralelkenar birimlerden oluşan yapı şematik olarak gösterilmektedir. Bu çeşitlilik, mühendislik uygulamalarında istenen mekanik performansa uygun tasarım yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1.9 : Oksetik dönen kare yapısı [20].



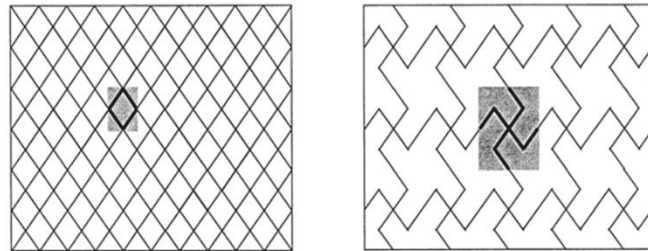
Şekil 1.10 : Dönen üçgenler geometrileri [20].



Şekil 1.11 : Dönen birim geometrisinin varyasyonları: (a) Daha genel bir form olan dönen paralelkenar yapısı ve (b) Farklı boyutlardaki karelerden oluşan “dönen kareler” yapısı [20].

1.1.4 Eksik kiriş (Missing rib)

Eksik kiriş yapısı, oksetik davranış sergileyen bir diğer önemli yapı türüdür ve temel olarak konvansiyonel petek benzeri latis sistemlerinin belirli kısımlarının, özellikle de bazı bağlantı kirişlerinin yapısal düzenden kasıtlı olarak kesilmesi/silinmesiyle elde edilir. Bu tasarım uygulaması ile deformasyon sonucu yapıda NPR gösteren davranış meydana gelir. Şekil 1.12’de tipik bir eksik kiriş yapısının geometrisi sunulmaktadır.



Şekil 1.12 : Eksik kiriş yapısının tanımı [21].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Son yıllarda, savunma sanayi ve havacılıkta meydana gelen gelişmeler doğrultusunda, bu sektörlerin ihtiyaçlarını karşılamak için yeni malzeme tasarımları büyük önem kazanmıştır. Bu yeniliklerin başında ise latis yapılar yer almaktadır. Latis yapılarına iyileştirilmiş özellik araştırmacılar tarafından birçok farklı birim hücre tasarımı ile kazandırılmaktadır. Araştırmacılar tarafından geliştirilen bu farklı birim hücre yapılarının yük altında deformasyona uğrama şekilleri ve verdikleri tepkiye göre sınıflandırılabilir; PPR sahip yapılar, ZPR sahip yapılar ve NPR sahip yapılar [2]. PPR sahip malzemelere en yaygın olarak kullanılan altıgen petek yapıları örnek verilebilir. Bu malzemeler, düşük yoğunlukta fakat yüksek mukavemetli malzeme tasarımına olanak sağladıkları için araştırmacılar birçok çalışma yapmışlardır.

Bal peteği yapılar, hafiflikleri ve yüksek özgül dayanım değerleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında uzun süredir tercih edilmektedir. Masters ve Evans, bal peteği yapılarının mekanik özelliklerini anlamak için üç ana deformasyon mekanizmasını birleştiren kapsamlı bir model sunmuşlardır. Hücre geometrisinin Poisson oranı ve elastik özellikler üzerindeki etkilerini göstermişler ve bu çalışmalar, malzemelerin optimize edilmesine önemli katkılar sağlamıştır. Ayrıca, bu çalışmada hücre duvarlarının kiriş gibi davranarak eğilerek deforme olduğunu ve hücre bağlantılarında menteşe benzeri hareketlerin meydana geldiğini belirtmişlerdir [23]. Bu çalışmalar, düşük yoğunluklu ancak yüksek mukavemetli malzemelerin tasarımı için yeni yaklaşımlar geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Paik vd. [24], alüminyum petek çekirdekli sandviç panellerin mekanik dayanım özelliklerini hem deneysel hem teorik olarak incelemişlerdir. Gerçekleştirilen üç nokta eğme, eksenel basma ve yanal ezilme testleri, hücre kalınlığının artırılmasının plastik deformasyonun gecikmesine ve nihai dayanımın artmasına katkı sağladığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde Zhu vd. [25], bal peteği çekirdekli ve alüminyum köpük çekirdekli metal sandviç panellerin patlama yükleri altındaki davranışlarını deneysel, sayısal ve analitik yöntemlerle incelemişlerdir. Ayrıca Pannikottu ve Bandaru [26], esnek ve enerji emici araç zırhı geliştirmek amacıyla, güçlendirilmiş petek yapılar

tasarlamışlardır. Bu yapılar hem yük taşıma kapasitesine hem de darbe enerjisi emme özelliğine sahip olup, daha yüksek yapısal verimlilik sunmaktadır.

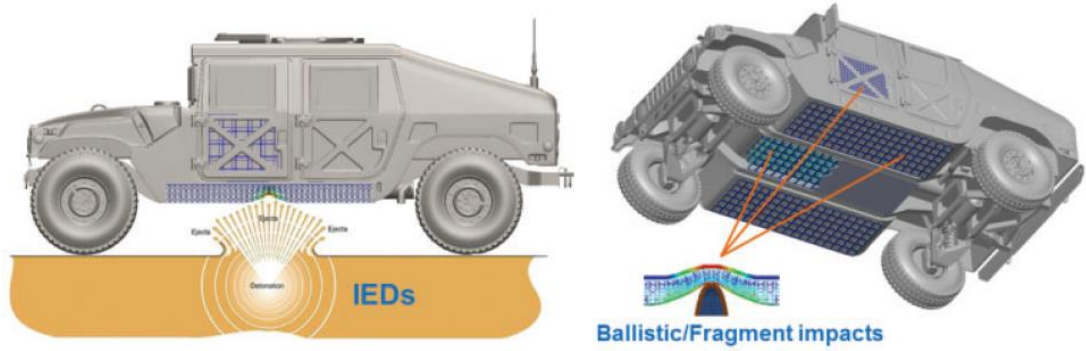
Tüm bu çalışmalar, geleneksel altıgen petek yapıların önemli avantajlara sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bu yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde bazı sınırlamalar da mevcuttur. Geleneksel petek yapılar, genellikle lineer deformasyon davranışları sergileyerek sınırlı esneklik ve enerji emme kapasitesi göstermektedir. Özellikle yüksek deformasyon gerektiren uygulamalarda veya ani şok yükleri altında bu yapılar istenen performansı sağlayamamaktadır. Bu sınırlamaların aşılması amacıyla son yıllarda oksetik yapılar, mekanik özelliklerin optimize edilmesi için önemli bir alternatif olarak ön plana çıkmıştır.

Oksetik yapılar, NPR sahip olmaları sayesinde, çekme gerilme altında genişleyebilme özellikleri ile dikkat çekmektedir. Lakes ve Elms [27], negatif Poisson oranına sahip girintili köpüklerin mekanik özelliklerini geleneksel köpüklerle karşılaştırmışlardır ve bunun sonucunda girintili yapıların dinamik darbe enerji emilimi ve darbe dayanımının daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, girintili köpüklerin sandviç panellerde kullanılması ile yapısal dayanımı artırabilmektedir. Lee vd. [28], bal peteği ve girintili yapılarının elastik özelliklerini homojenizasyon temelli sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile incelemişlerdir. Bu çalışmada, Poisson oranının girintili yapının açısı ve hacim oranı gibi geometrik parametrelerden etkilendiği belirlenmiştir. Shokri vd. [29], 2D girintili yapıyı 3D girintili yapıya uyarlayarak enerji yöntemleri ve sayısal analizler ile mekanik davranışları incelemişlerdir. Hücre geometrisindeki değişikliklerin mekanik özelliklerde önemli değişimlere neden olabileceği gösterilmiştir.

Bu doğrultuda, Fu vd. [30], 2D girintili bal peteği yapıları temel alarak 3D oksetik bir yapı geliştirmiş ve geometrik parametrelerin deformasyon davranışı ile Poisson oranı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hou vd. [31] ise girintili yapıların geleneksel altıgen petek yapılar ile kıyaslamasını yaparak düzlem içi dinamik ezilme dayanımını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, darbe hızı ve hücre duvarının en-boy oranının deformasyon modları üzerindeki etkisini incelemiş ve girintili yapıların daha yüksek plato gerilmesine sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu durum, girintili yapıların daha iyi enerji emme kapasitesine sahip olduklarını göstermiştir. Darbe etkisi altındaki davranışları inceleyen Liu vd. [32], girintili petek yapısının, geleneksel altıgen petek yapısına kıyasla daha üstün enerji emme kapasitesine sahip olduğunu sonlu elemanlar

yöntemi ile göstermişlerdir. Yapısal performansın daha da iyileştirilmesi amacıyla Fu vd. [33], girintili petek yapısına eşkenar dörtgen konfigürasyonu ekleyerek yeni bir tasarım geliştirmişlerdir. Yaptıkları teorik analizler ve sayısal simülasyonlar sonucunda, bu yeni tasarımın oksetik özelliğini korurken Young modülü ve burkulma dayanımını önemli derecede artırdığı gözlemlenmiştir.

Imbalzano vd. [34], oksetik latis çekirdekli sandviç panellerin yerel darbelere karşı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Farklı tasarımlar parametrik analizlerle değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda yapıların darbe dayanımı açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu görmüşlerdir. Şekil 2.1’de bu uygulamaya örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Zırhlı araçlarda balistik ve darbe dayanımını iyileştirmek amacıyla hafif oksetik kompozit panellerin kullanımı üzerine bir uygulama.

Yang vd. [35], oksetik malzemelerin balistik koruma pedleri gibi uygulamaları için performansını incelemiştir. Oksetik malzemelerin darbe kuvvetlerini etkili bir şekilde dağıtarak alt katmanda daha düşük stres yaratabileceğini ve darbe enerjisini çevre bölgelere yönlendirebileceği gözlemlenmiştir.

Wang vd. [36], girintili ve yıldız şeklinde yapılarını birleştirerek yeni bir girintili yıldız şekilli yapı geliştirmiş ve düşük, orta ve yüksek deformasyon modlarında yapıların düzlem içi darbe davranışlarını incelemişlerdir. Son olarak Wu vd. [37], yarı girintili yapıların çekme özelliklerini ve deformasyon davranışlarını incelemişlerdir. Bu yapıları altıgen petek ve girintili hücrelerin birleşimi olarak değerlendirmiş ve mekanik özelliklerini optimize etmek için teorik modeller geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar, geometrik parametrelerin optimize edilmesi ile mekanik performansın önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir.

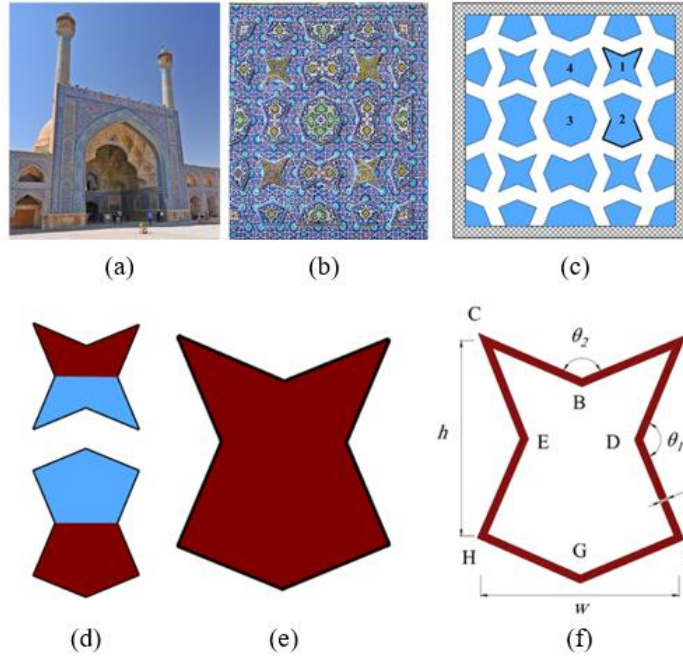


3. SOR BİRİM HÜCRESİ VE LATİS YAPISI

Bu bölümde, oksetik birim hücrenin tasarım parametreleri ve latis yapısının tasarımı ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

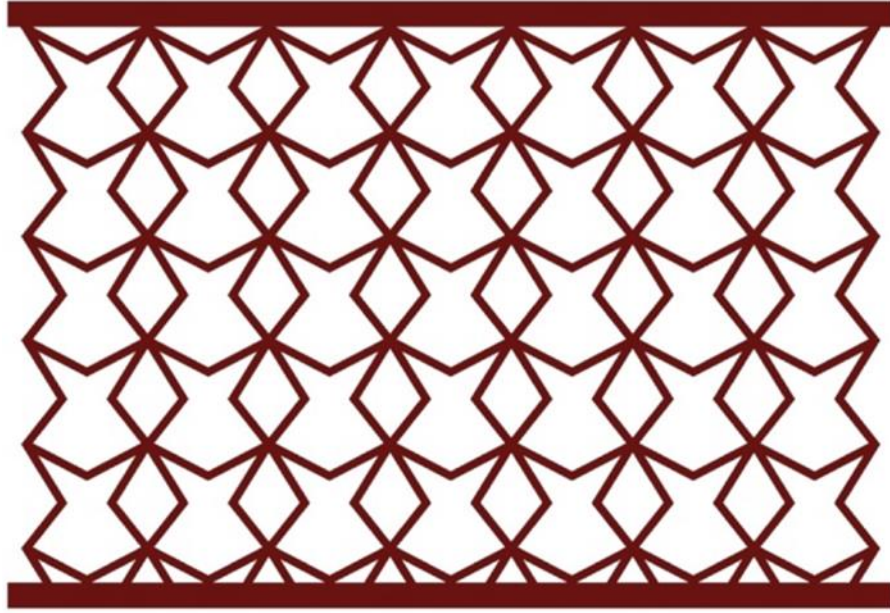
3.1 SOR Yapısının Geometrik Tanımı

Antik sanat desenleri ve İslami motifler yeni bir oksetik malzeme tasarımı için ilham kaynağı olabilmektedir. İran İsfahan şehrinde bulunan Jameh Camii islam sanatının önemli bir örneğidir. Bu tasarımda ilham kaynağı olarak Jameh camiinin geometrik motifleri kullanılmıştır [38]. Jameh Camii içinde bulunan karışık ve estetik desenler ile dikkat çekmektedir. Özellikle caminin duvarında bulunan mozaik desenleri dört farklı motiften oluşmaktadır. Bu motifler modern oksetik yapıların tasarımında bir temel oluşturmak için kullanılmıştır. Çalışma, Jameh Camiide ki bu sekizgen motiflerin Şekil 3.1’de tanımlanan kırmızı ile gösterilen üst ve alt bölümlerini yenilikçi bir şekilde birleştirerek yeni bir oksetik yapı tasarımı Şekil 3.1(e)’de geliştirmiştir. Bu yeni sekizgen tasarım hem görsel açıdan hem mekanik açıdan oldukça işlevsel bir oksetik yapı olmuştur. Bu yeni birim hücreye SOR (Yarı Sekizgen Girintili) adı verilmiştir ve geometrik parametreleri Şekil 3.1(f)’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : (a) İran, İsfahan'daki Cuma Camii; (b) caminin ikinci katında bulunan mozaik deseni; (c) sadeleştirilmiş desen ve dört farklı sekizgen tipinin temsili; (d) yeni oksetik birim hücre tasarım süreci; (e) yeni sekizgen desen; (f) SOR birim hücresinin tasarım parametreleri.

Geliştirilen bu SOR birim hücresinin geometrik hücreleri dikkatlice analiz edilerek belirlenmiş ve optimizasyon süreci ile yapının performansı artırılmaya çalışılmıştır. Bu yeni tasarım hem geleneksel islam sanatının estetik değerlerini modern mühendislik ile harmanlayarak ilham verici bir çözüm sunmakta dem de oksetik yapılar için önemli bir tasarım alternatifi oluşturmaktadır. SOR birim hücreler yatay yönde düğümler aracılığıyla birbirine bağlanır. Latis yapının tasarımı Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : SOR birim hücresi kullanılarak oluşturulan latis yapı tasarımı.

Şekil 3.1(f)'de geometrik parametreleri verilen SOR yapısının tasarım parametreleri Çizelge 3.1'de verilmektedir. Şekil 3.1(f)'de tanımlanan h , birim hücrenin yüksekliği w , genişliği ifade etmektedir. θ_1 ve θ_2 açıları t duvar kalınlığını H latis yapının toplam yüksekliği W latis yapının toplam uzunluğu D değeri ise latis yapının derinliğini ifade etmektedir.

Çizelge 3.1 : SOR yapısına ait tasarım değişkenleri (boyutlar mm olarak verilmiştir).

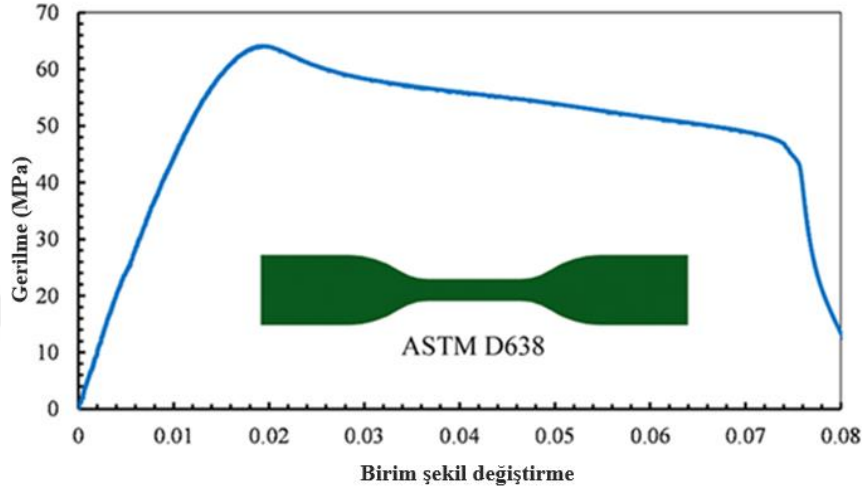
	h	w	θ_1	θ_2	H	W	D
SOR	12	14	110°	125°	70.07	102.38	17

3.2 SOR Yapısının FEA Analizi Detayları

Bu tez kapsamında tasarlanan yarı sekizgen girintili oksetik yapının mekanik davranışları ABAQUS 2024 sonlu elemanlar analiz programı [39] kullanılarak açık (explicit) çözüm yöntemi ile incelenmiştir. Yapının basma yükü altındaki enerji emilimi kabiliyeti, deformasyon davranışı ve ilgili mekanik parametreleri değerlendirmek üzere bir dizi sayısal analiz gerçekleştirilmiştir.

Modelleme sürecinde, yapının alt plakası merkezinde belirlenen bir referans noktası üzerinde tüm yönlerde sabitlenmiştir (encastre boundary condition). Üst plakanın merkezinde yer alan ayrı bir referans noktası üzerinden $-y$ yönünde %64 yer değiştirme uygulanmıştır ve deformasyon süreci incelenmiştir.

Analizlerde kullanılan oksetik çekirdek yapı, elastik-plastik davranışa sahip Polilaktik Asit (PLA+) malzemesiyle modellenmiştir. Malzemeye ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, ilgili referans çalışmada sunulan ve Şekil 3.3'te gösterilen verilerden sayısallaştırılarak ABAQUS ortamına tanımlanmıştır [38]. Çizelge 3.2'de, PLA+ malzemesinin temel mekanik özellikleri sunulmaktadır [38].



Şekil 3.3 : PLA+ malzemesinin gerilme–birim şekil değiştirme diyagramı [38].

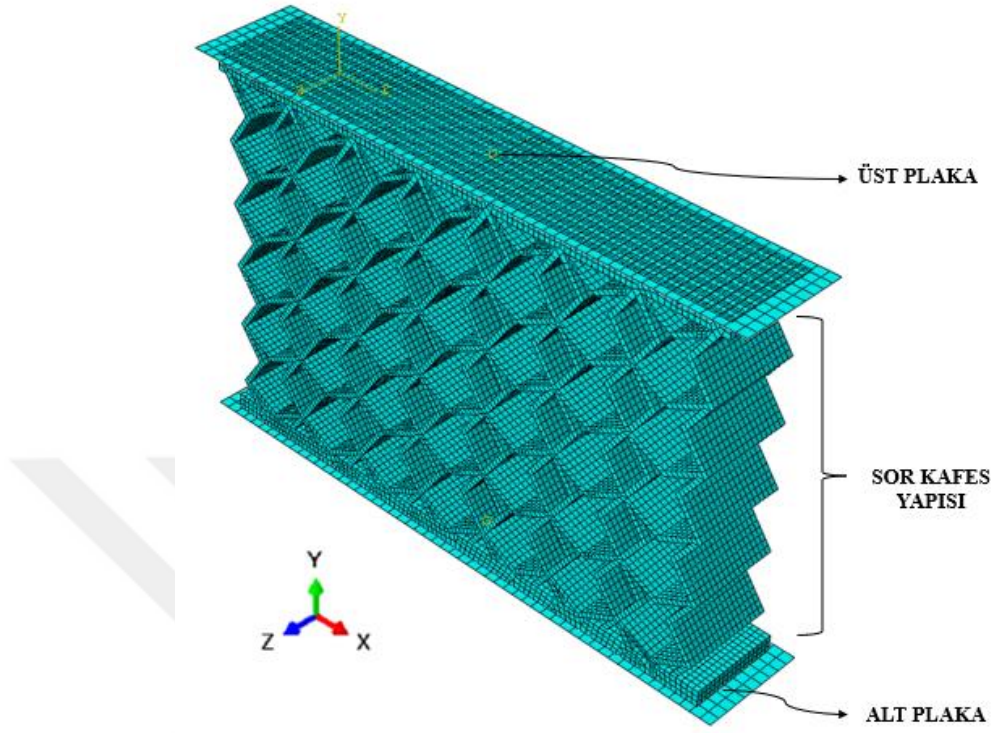
Çizelge 3.2 : PLA+ malzemesinin mekanik özellikleri [38].

Yoğunluk, ρ (g/cm ³)	1.21
Young modülü, E (GPa)	3.65
Poisson oranı	0.35
Akma gerilmesi, σ_y (MPa)	64

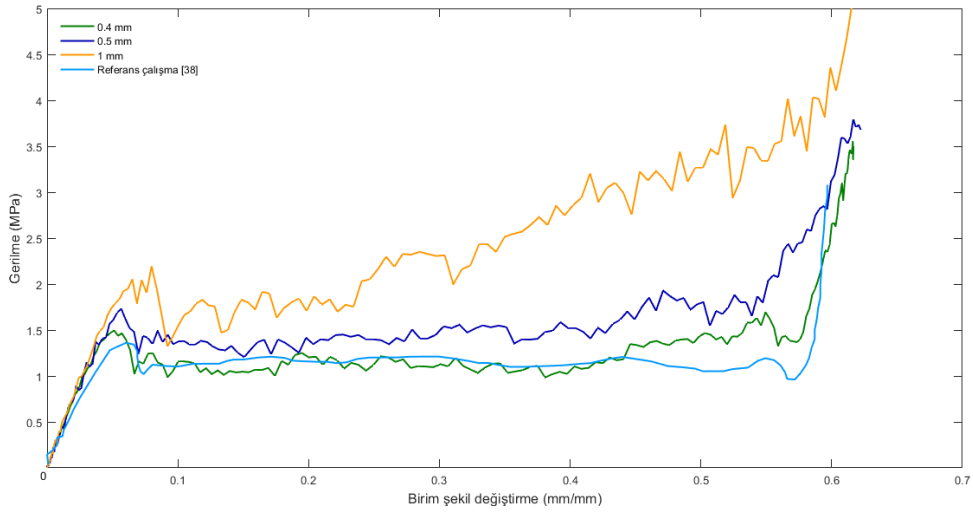
Yapının sayısal çözümünde, her biri sekiz düğüm noktasına sahip olan C3D8R tipi 3 boyutlu hexahedral (katı) elemanlar kullanılmıştır [40]. Bu elemanlar azaltılmış integrasyon (reduced integration) ve hourglass kontrolü (hourglass control) sayesinde hem karmaşık geometri hem de eğilme davranışlarını doğru şekilde temsil etme avantajı sunar. Yapının farklı bölgeleri arasındaki etkileşim “hard contact” tanımı ile modellenmiştir. Sürtünme katsayısı olarak 0.1 kabul edilmiştir.

Bu çalışmada, kullanılacak en uygun çözüm ağı boyutunu (mesh size) belirlemek amacıyla, ilgili referans makaledeki analiz temel alınarak 1 mm, 0.8 mm, 0.5 mm ve 0.4 mm çözüm ağı boyutlarında karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, en uygun çözüm ağı boyutu olarak 0.4 mm belirlenmiştir. Modelin 0.4 mm çözüm ağına sahip mesh görünümü ise Şekil 3.4'te sunulmaktadır. Elde edilen gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri, referans çalışma [38] ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma Şekil 3.5'te sunulmuştur. Bu karşılaştırma sonlu elemanlar modelinin

diğer analizler için uygunluğunu göstermekte ve yakın sonuçların alındığı gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : FEA Modeli.



Şekil 3.5 : Referans çalışma ile farklı mesh boyutlarının karşılaştırılması.

Kurulan FEA modeli, seçilen 0.4 mm çözüm ağı boyutuyla istenilen doğruluk ve kararlılığı sağlamıştır. Bu nedenle, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde gerçekleştirilecek diğer analizlerde de aynı model ve çözüm ağı boyutu kullanılacaktır. Böylece, analiz sonuçlarının tutarlılığı ve güvenilirliği korunacaktır.



4. MODEL, SİMÜLASYON VE SONUÇLAR

Bu bölümde, SOR çekirdek yapısının çeşitli tasarım parametreleri ile oluşturan latis yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. İncelenen mekanik özellikler arasında, basma modülü, basma dayanımı, yoğunlaşma gerinimi, ortalama ezilme gerilmesi, enerji emilimi ve özgül enerji emilimi değerleri bulunmaktadır.

4.1 SOR Birim Hücresinin Tasarım Parametreleri

Tüm tasarımlar, temel olarak $\theta_1=\theta_2$ eşitliği dikkate alınarak geliştirilmiştir. Tasarım varyasyonları Şekil 3.1’de detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Başlangıç tasarımı, yükseklik (h) ve genişlik (w) parametrelerinin eşitliği ($h=w$) koşulu sağlanarak oluşturulmuştur. Bu temel tasarımda, hücrenin yükseklik ve genişlik ölçüleri eşit tutulmuş, buna karşılık açısı parametreleri (θ) sabit kalmıştır. İlerleyen aşamada, açısı ve yükseklik parametreleri sabit tutularak, yükseklik/genişlik oranı (h/w) üzerinde sistematik değişiklikler yapılmıştır; söz konusu oran sırasıyla 1.2 ve 0.8 değerlerine ayarlanmış ve bu değişikliklerin hücre yapısının geometrik konfigürasyonuna olan etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Takip eden aşamada ise, yükseklik-genişlik eşitliği ($h=w$) korunmuş; bununla birlikte açısı parametreleri üzerinde çeşitli modifikasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, açısı değerleri önce 10 derece azaltılmış, ardından 10 derece artırılmıştır. Böylelikle, farklı açısı kombinasyonları altında yapının mekanik ve geometrik davranışları kapsamlı bir biçimde gözlemlenmiştir. Başlangıçta hücre duvar kalınlığı sabit olarak $t=1$ mm olarak alınmış ardından duvar kalınlıkları 0.5 mm ve 1.5 mm eklemeler yapılmıştır. Ayrıca üst ve alt plaka kalınlıkları ise 3 mm olarak belirlenmiştir. Tasarımlara ilişkin detaylı parametre değişiklikleri ve konfigürasyonlar, aşağıdaki Çizelge 4.1’de sistematik bir biçimde sunulmaktadır.

Çizelge 4.1 : SOR oksetik birim hücresine ait tasarım parametreleri.

Kodlar	h (mm)	w (mm)	θ (°)	t (mm)
SOR1-1	12	12	120	1
SOR2-1	12	10	120	1
SOR3-1	12	15	120	1
SOR4-1	12	12	110	1
SOR5-1	12	12	130	1
SOR1-05	12	12	120	0.5
SOR2-05	12	10	120	0.5
SOR3-05	12	15	120	0.5
SOR4-05	12	12	110	0.5
SOR5-05	12	12	130	0.5
SOR1-15	12	12	120	1.5
SOR2-15	12	10	120	1.5
SOR3-15	12	15	120	1.5
SOR4-15	12	12	110	1.5
SOR5-15	12	12	130	1.5

4.1.1 Latis yapılarının tasarım parametreleri

Bu bölümde, SOR birim hücreli latis yapıların tasarım parametreleri Çizelge 4.2’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Tasarımlarda, latis yapıların geometrik parametreleri belirlenirken özellikle bağıl yoğunluk ($\Delta\rho$) dikkate alınmıştır. Bağıl yoğunluk, bir latis yapının boşluk oranı ile katı kısmı arasındaki oranı ifade eder ve yapının mekanik özelliklerini anlamada yaygın olarak kullanılan bir ölçüttür. Latis yapılarda, bağıl yoğunluk arttıkça yapının yük taşıma kapasitesi ve dayanıklılığı da artabilir; ancak bu durum aynı zamanda ağırlığın da artmasına neden olur. Bu nedenle, her bir tasarımda birim hücre sayısı, yapının bağıl yoğunluk değeri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bağıl yoğunluk Denklem 4.1’deki gibi tanımlanmaktadır [41].

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{latis yapı}}}{\rho_{\text{katı malzeme}}} \quad (4.1)$$

Burada, $\rho_{\text{latis yapı}}$, latis yapının boşlukları da içeren toplam hacme göre hesaplanan ortalama yoğunluğudur, $\rho_{\text{katı malzeme}}$, aynı malzemenin gözeneksiz, tam yoğunluğudur. Bağıl yoğunluk hesaplamaları, ilgili literatürde belirtilen yöntemler ve SolidWorks yazılımı kullanılarak [42] numaralı kaynaktan faydalanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tasarım parametreleri kapsamında yer alan toplam yükseklik (H), genişlik (W) ve derinlik ($D = 17$ mm) gibi temel boyutlar, latis yapının işlevsel gereksinimleri ve tasarım hedefleri doğrultusunda belirlenmiştir. Hücre sayıları, farklı konfigürasyonlarda yaklaşık olarak benzer bağıl yoğunluk değerleri elde edebilmek

amacıyla hesaplanmıştır. Analizler sırasında bazı yapıların bağıl yoğunluk değerleri oldukça yüksek veya düşük gözlemlenmiştir; bunun temel nedeni özellikle duvar kalınlığı (t) değişimidir. Bu çalışmada, kalınlık etkisini ayrıca incelemek amacıyla, ilgili yapılardaki bağıl yoğunluk değerleri mekanik performans analizlerinde kritik bir ölçüt olarak değerlendirilmemiştir. Sonlu eleman analizlerinde her model için belirtilen eleman sayısı, Abaqus ortamında yapılan meshleme sonucunda oluşan toplam eleman adedini temsil etmektedir.

Çizelge 4.2 : Latis yapısı tasarım parametreleri ve hücre sayıları.

Kodlar	H (mm)	W (mm)	Bağıl yoğunluk	Hücre Sayısı	Eleman sayısı
SOR-1	70.0	85.35	0.335	35	631727
SOR-2	69.4	71.48	0.364	35	570653
SOR-3	70.2	91.15	0.304	30	636557
SOR-4	70.0	85.22	0.344	35	671674
SOR-5	69.3	85.34	0.325	35	628588
SOR1-05	69.6	84.64	0.217	35	318956
SOR2-05	69.0	70.57	0.234	35	301258
SOR3-05	70.3	90.55	0.199	30	326540
SOR4-05	70.1	84.61	0.222	35	394027
SOR5-05	69.0	84.61	0.213	35	323753
SOR1-15	70.0	86.04	0.440	35	810349
SOR2-15	69.8	72.22	0.480	35	754392
SOR3-15	70.5	91.80	0.398	30	806146
SOR4-15	70.5	85.93	0.449	35	840965
SOR5-15	69.5	85.95	0.429	35	808285

4.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Bu bölümde, SOR çekirdek yapısının mekanik performansı, çeşitli tasarım parametrelerinin etkileri doğrultusunda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Tasarım parametreleri, yapının yük altındaki davranışını doğrudan etkileyen temel değişkenler olup, bu değişkenlerde yapılan sistematik değişiklikler aracılığıyla çekirdek yapının mekanik karakteristiği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen analizlerde, özellikle basma modülü, basma dayanımı, yoğunlaşma gerinimi, ortalama ezilme gerilmesi, enerji emilimi (EA) ve özgül enerji emilimi (SEA) gibi kritik performans göstergeleri dikkate alınmıştır. Bu göstergeler ilerleyen alt başlıklarda detaylandırılmakta ve ilgili formülleri verilerek tanımları yapılmaktadır. Söz konusu parametreler, yapının darbe dayanımı, enerji sönmleme kapasitesi ve yapısal stabilitesi gibi özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu göstergeler yardımıyla, farklı geometrik ve yapısal tasarım değişikliklerinin, çekirdek yapının

enerji emme yeteneği ve mekanik dayanımı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sayesinde, hangi tasarım değişkenlerinin yapının genel performansı üzerinde pozitif veya negatif etkiler yarattığı tespit edilerek, optimize edilmiş bir tasarım için yol gösterici bulgular elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen tüm mekanik performans göstergelerine ait sayısal veriler, karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.3'te detaylı biçimde verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Tüm tasarımların mekanik özellikleri sonuçları.

Kodlar	Basma modülü (MPa)	Basma dayanımı (MPa)	Yoğunlaşma gerinimi	Ortalama ezilme gerilmesi (MPa)	Enerji emilimi (MJ/m ³)	Özgül enerji emilimi (kJ/kg)
SOR-1	70.46	2.18	0.570	1.62	0.91	2.24
SOR-2	85.87	3.15	0.505	2.33	1.14	2.58
SOR-3	53.77	1.88	0.579	1.32	0.76	2.06
SOR-4	48.37	2.33	0.538	1.67	0.87	2.09
SOR-5	96.51	2.52	0.574	1.72	0.98	2.49
SOR1-05	7.59	0.81	0.546	0.49	0.25	0.95
SOR2-05	8.17	0.95	0.516	0.59	0.28	0.98
SOR3-05	5.43	0.57	0.514	0.33	0.16	0.66
SOR4-05	4.61	0.54	0.554	0.37	0.19	0.70
SOR5-05	13.87	0.60	0.429	0.27	0.12	0.46
SOR1-15	217.84	4.96	0.468	3.78	1.75	3.28
SOR2-15	258.32	6.56	0.426	4.86	2.04	3.51
SOR3-15	178.04	3.90	0.460	2.95	1.35	2.80
SOR4-15	172.86	4.49	0.449	3.63	1.60	2.94
SOR5-15	268.58	5.82	0.442	3.86	1.70	3.27

4.2.1 Genişliğin basma modülüne etkisi

Basma modülü (E_c), malzemenin elastik deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Basma modülü, basma gerilmesi (σ_{basma}) ile basma şekil değiştirmesi (ϵ_c) arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu çalışmada, basma modülü, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden MATLAB [43] yazılımı kullanılarak, eğrinin başlangıcındaki doğrusal kısmın eğimi hesaplanmıştır. Bu değer, malzemenin basma altındaki katılığı temsil etmektedir.

Basma modülü üzerindeki genişlik etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 70.46 MPa, SOR2-1 için 85.87 MPa ve SOR3-1 için 53.77 MPa değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 7.59 MPa, SOR2-05 için 8.17 MPa ve SOR3-05 için 5.43 MPa değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 217.84 MPa, SOR2-15 için 258.32 MPa ve SOR3-15 için 178.04 MPa değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, genişlik arttıkça basma modülünün azaldığını göstermektedir. En yüksek

basma modülü değeri, SOR2-15, SOR2-1 ve SOR2-05 tasarımlarında ortaya çıkmıştır. Bu durum, daha küçük genişliklerin hücre yapısının rijitliğini artırarak, daha etkili yük taşıma ve deformasyona karşı direnç sağladığını işaret etmektedir.

4.2.2 Açının basma modülüne etkisi

Basma modülü üzerindeki açının etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 70.46 MPa, SOR4-1 için 48.37 MPa ve SOR5-1 için 96.51 MPa değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 7.59 MPa, SOR4-05 için 4.61 MPa ve SOR5-05 için 13.87 MPa değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 217.84 MPa, SOR4-15 için 172.86 MPa ve SOR5-15 için 268.58 MPa değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, açı arttıkça basma modülünün de anlamlı şekilde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek açı değeri olan SOR5-15, SOR5-1 ve SOR5-05 tasarımlarında ortaya çıkmıştır. Bu durum, açının artmasıyla birlikte yapının daha rijit bir hale geldiğini açıkça göstermektedir.

4.2.3 Genişliğin basma dayanımına etkisi

Basma dayanımı (σ_c), bir yapının plastik deformasyon başlamadan önce taşıyabileceği maksimum yükü ifade eder ve basma altındaki performansın temel göstergelerinden biridir. Bu çalışmada, ABAQUS yazılımından elde edilen kuvvet–yer değiştirme verileri, MATLAB [43] aracılığıyla gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerine dönüştürülmüş ve dayanım değeri, yoğunlaşma başlamadan önceki maksimum gerilme noktası olarak tanımlanmıştır. Basma dayanımı üzerindeki genişlik etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 2.18 MPa, SOR2-1 için 3.15 MPa ve SOR3-1 için 1.88 MPa değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 0.81 MPa, SOR2-05 için 0.95 MPa ve SOR3-05 için 0.57 MPa değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 4.96 MPa, SOR2-15 için 6.56 MPa ve SOR3-15 için 3.90 MPa değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, hücre genişliği arttıkça basma dayanımının azaldığını göstermektedir. Yani daha dar hücre yapıları yüksek dayanım sunarken, geniş hücre geometrileri yapının taşıma kapasitesini zayıflatmaktadır.

4.2.4 Açının basma dayanımına etkisi

Bu bölümde, basma dayanımı üzerindeki açının etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 2.18 MPa, SOR4-1 için 2.33 MPa ve SOR5-1 için 2.52 MPa değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 0.81 MPa, SOR4-05 için 0.54

MPa ve SOR5-05 için 0.60 MPa değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 4.96 MPa, SOR4-15 için 4.49 MPa ve SOR5-15 için 5.82 MPa değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, basma dayanımının aç parametresiyle doğrusal bir ilişki sergilemediğini göstermektedir.

4.2.5 Genişliğin ortalama ezilme gerilmesine etkisi

Ortalama ezilme gerilmesi, hücresel malzemelerin plato bölgesindeki ortalama gerilme değerini temsil eder. Bu değer, malzemenin sürekli deformasyon altında sabit bir yükü taşıma yeteneğini gösterir. Matematiksel olarak, Denklem 4.2'de ifade edilmektedir [44].

$$\text{Ortalama ezilme gerilmesi} = \frac{1}{\Delta\varepsilon} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.2)$$

Bu denklemde, $\sigma(\varepsilon)$ gerilme-birim şekil değiştirme fonksiyonunu temsil ederken, ε_0 ve ε_1 sırasıyla plato bölgesinin başındaki ve sonundaki şekil değiştirme değerlerini ifade etmektedir. $\Delta\varepsilon$, plato bölgesinin genişliğini, yani bu iki değer arasındaki farkı temsil eder. Bu parametrenin hesaplanması, malzemenin deformasyon bölgesinde sabit bir yük taşıma yeteneğini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır.

Bu bölümde, ortalama ezilme gerilmesi üzerindeki genişlik etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 1.62 MPa, SOR2-1 için 2.33 MPa ve SOR3-1 için 1.32 MPa değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 0.49 MPa, SOR2-05 için 0.59 MPa ve SOR3-05 için 0.33 MPa değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 3.78 MPa, SOR2-15 için 4.86 MPa ve SOR3-15 için 2.95 MPa değerleri elde edilmiştir. Sonuçlara göre en yüksek ezilme gerilmesi, en dar genişliğe sahip olan konfigürasyonlarda elde edilmiştir. Buna karşın, genişliği en fazla olduğu konfigürasyonlarda en düşük ezilme gerilmeleri görülmüştür. Bu durum, hücre genişliği arttıkça ortalama ezilme gerilmesinin azaldığını ortaya koymaktadır. Geniş hücre yapısının yerel stabiliteyi azaltarak gerilme birikimine karşı daha zayıf bir direnç gösterdiği söylenebilir. Dolayısıyla, dar hücre yapılarının ezilme davranışı açısından daha avantajlı olduğu sonucuna varılabilir.

4.2.6 Açının ortalama ezilme gerilmesine etkisi

Bu bölümde, ortalama ezilme gerilmesi üzerindeki açının etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 1.62 MPa, SOR4-1 için 1.67 MPa

ve SOR5-1 için 1.72 MPa değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 0.49 MPa, SOR4-05 için 0.37 MPa ve SOR5-05 için 0.27 MPa değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 3.78 MPa, SOR4-15 için 3.63 MPa ve SOR5-15 için 3.86 MPa değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, basma dayanımının aç parametresiyle doğrusal bir ilişki sergilemediğini göstermektedir.

Genel olarak, hücre açısındaki küçük değişimlerin ezilme dayanımı üzerinde büyük farklar yaratmadığı söylenebilir. Bu durum, açının tek başına belirleyici bir parametre olmadığını ve hücre geometrisinin diğer faktörlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.2.7 Genişliğin yoğunlaşma gerinimine etkisi

Yoğunlaşma gerinimi (ε_d), özellikle gözenekli yapılarda basma yüklemesi sırasında malzemenin yoğunluğun artması olarak tanımlanabilir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde ani dikleşmenin meydana geldiği nokta ve bu noktadan yoğunlaşma bölgesine geçiş olan noktadır [45,46]. Yoğunlaşma gerinimi, Li vd. [45] tarafından sunulan formül ve metodoloji esas alınarak MATLAB ortamında kodlanmış ve malzemenin yoğunlaşma davranışının başladığı kritik deformasyon seviyesi, kuvvet-yer değiştirme eğrileri ile enerji emilimi verimliliği $h(x)$ analizleri temelinde hesaplanmıştır. Enerji emilimi verimliliği, aşağıda Denklem 4.3'te verilen ifadeyle tanımlanmıştır:

$$h(x) = \frac{1}{F(x) \cdot H} \int_{x_y}^x F(t) dt \quad (4.3)$$

Burada $F(x)$, uygulanan kuvveti (N); H , numune yüksekliğini (mm); x_y , akma yer değiştirmesini (yield displacement); x , belirli bir yer değiştirme değerini; $h(x)$ ise bu noktaya kadar olan enerji emilimi verimliliğini temsil etmektedir. Enerji emilimi verimliliği fonksiyonu olan $h(x)$, sistemin mekanik performansını değerlendirmede önemli bir ölçüt olup, bu fonksiyonun maksimum değerine ulaştığı yer değiştirme noktası, yoğunlaşma yer değiştirmesi (x_d) olarak tanımlanmaktadır. Bu kritik nokta, enerji yutma verimliliğinin artışı tamamladığı ve yoğunlaşma bölgesinin başladığı noktayı göstermekte olup, $dh(x)/d(x) = 0$ koşulunu sağlamaktadır. Yoğunlaşma gerinimi Denklem 4.4'te verildiği gibi kritik yer değiştirme üzerinden hesaplanmıştır.

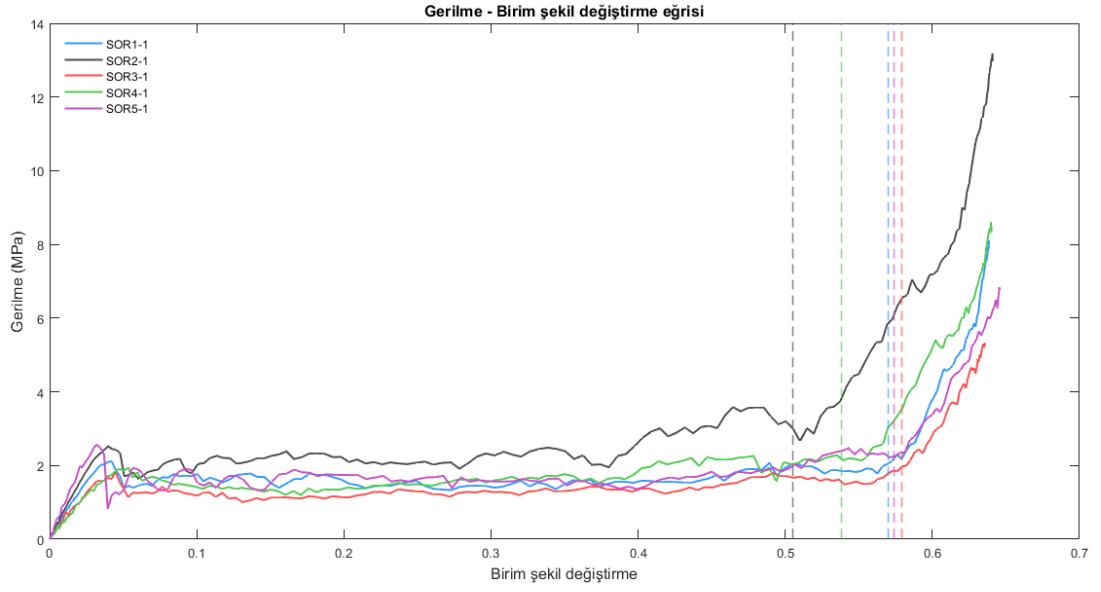
$$\varepsilon_d = \frac{x_d}{H} \quad (4.4)$$

Bu bölümde, genişliğin yoğunlaşma gerinimi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 0.570, SOR2-1 için 0.505 ve SOR3-1 için 0.579 değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 0.546, SOR2-05 için 0.516 ve SOR3-05 için 0.514 değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 0.468, SOR2-15 için 0.426 ve SOR3-15 için 0.460 değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar, hücre genişliğinin artması ve buna bağlı olarak h/w oranının azalmasıyla birlikte yoğunlaşma geriniminin bazı durumlarda arttığını göstermektedir. Fakat doğrusal bir artış veya azalma gözlemlenmemektedir.

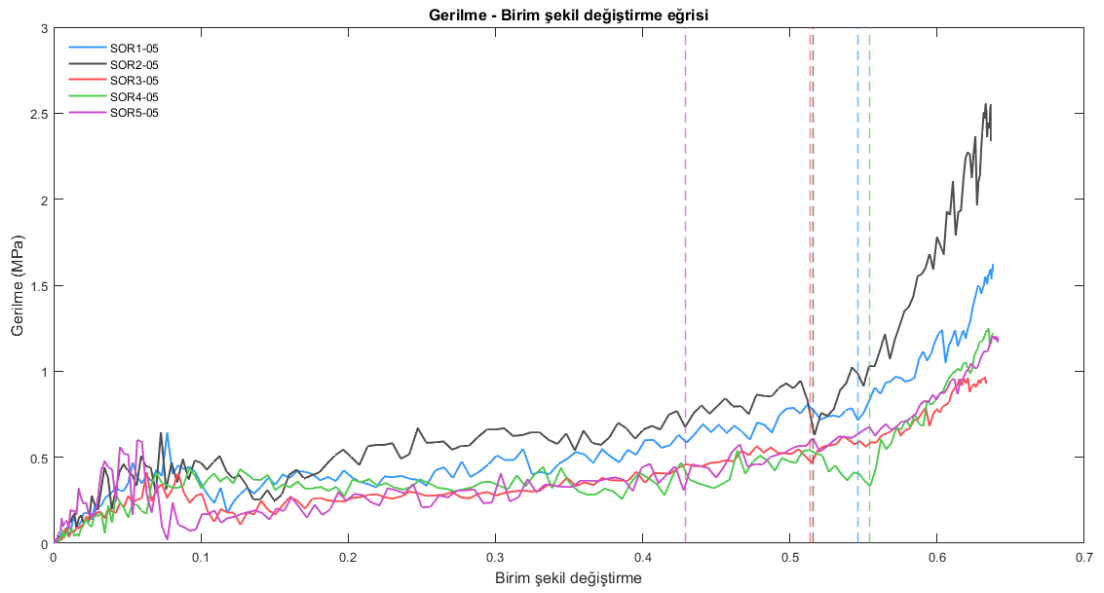
4.2.8 Açının yoğunlaşma gerinimine etkisi

Bu bölümde, açının yoğunlaşma gerinimi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, SOR1-1 için 0.570, SOR4-1 için 0.538 ve SOR5-1 için 0.574 değeri elde edilmiştir. SOR1-05 için 0.546, SOR4-05 için 0.554 ve SOR5-05 için 0.429 değerleri elde edilmiştir. SOR1-15 için 0.468, SOR4-15 için 0.449 ve SOR5-15 için 0.442 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, hücre açısındaki artışın doğrusal olarak etki ettiği söylenemez.

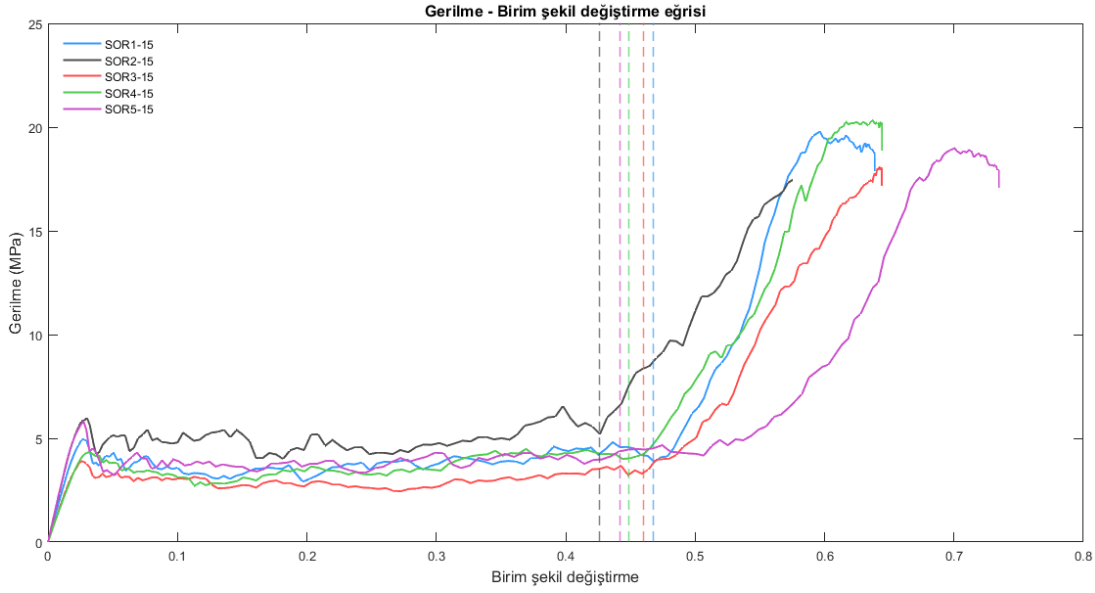
Şekil 4.1'de 1mm duvar kalınlığına Şekil 4.2' de 0.5 mm duvar kalınlığı Şekil 4.3'te 1.5 mm duvar kalınlığına sahip konfigürasyonlar için gerilme-şekil değiştirme eğrileri sunulmuştur. Ayrıca, her test için yoğunlaşma noktaları belirtilmiş ve karşılaştırmalı analiz için gösterilmiştir. Eğriler, her bir konfigürasyonun farklı özelliklerini temsil etmekte olup, yoğunlaşma noktaları kesik dikey çizgilerle işaretlenmiştir. Bu noktalar, her konfigürasyon için belirli şekil değiştirme seviyelerinde elde edilen gerilme değerlerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.1 : Tüm 1 mm duvar kalınlığındaki yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve yoğunlaşma bölgeleri.



Şekil 4.2 : Tüm 0.5 mm duvar kalınlığındaki yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve yoğunlaşma bölgeleri.



Şekil 4.3 : Tüm 1.5 mm duvar kalınlığındaki yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve yoğunlaşma bölgeleri.

4.2.9 Genişliğin enerji emilimi ve özgül enerji emilimine etkisi

Enerji emilimi, bir malzemenin deformasyon süresince absorbe ettiği toplam enerjiyi ifade eder ve gerilme– birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan ile temsil edilir. Belirli bir şekil değiştirme aralığında emilen enerji, bu aralığa karşılık gelen eğri altındaki alan olarak hesaplanır.

Bu çalışmada, oksetik sandviç yapıların basma yüklemesi altındaki toplam enerji emilimi (U), gerilme-şekil değiştirme diyagramının ikinci bölgenin (plato evresi) sonuna kadar olan kısmının altında kalan alanın integrali alınarak, Denklem 4.5 kullanılarak değerlendirilmiştir [46].

$$U = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.5)$$

$\sigma(\varepsilon)$, gerilme–birim şekil değiştirme fonksiyonunu temsil ederken, ε_0 ve ε_1 ise dikkate alınan şekil değiştirme aralığının sınırlarını ifade etmektedir. Bu formülasyon, belirli deformasyon seviyelerinde emilen enerjinin hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, enerji emilimi hesaplamaları MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Özgül Enerji Emilimi (SEA), deformasyon sürecinde birim kütle başına emilen enerjiyi temsil eden bir malzeme özelliğidir. Özellikle darbe veya çarpışma gibi uygulamalarda, malzemenin enerji emme kapasitesinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ayrıca, SEA değeri Denklem 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır [46]. Bu denklemde $\Delta\rho$ yapının bağıl yoğunluğunu, ρ ise malzeme yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$SEA = \frac{U}{\rho\Delta\rho} \quad (4.6)$$

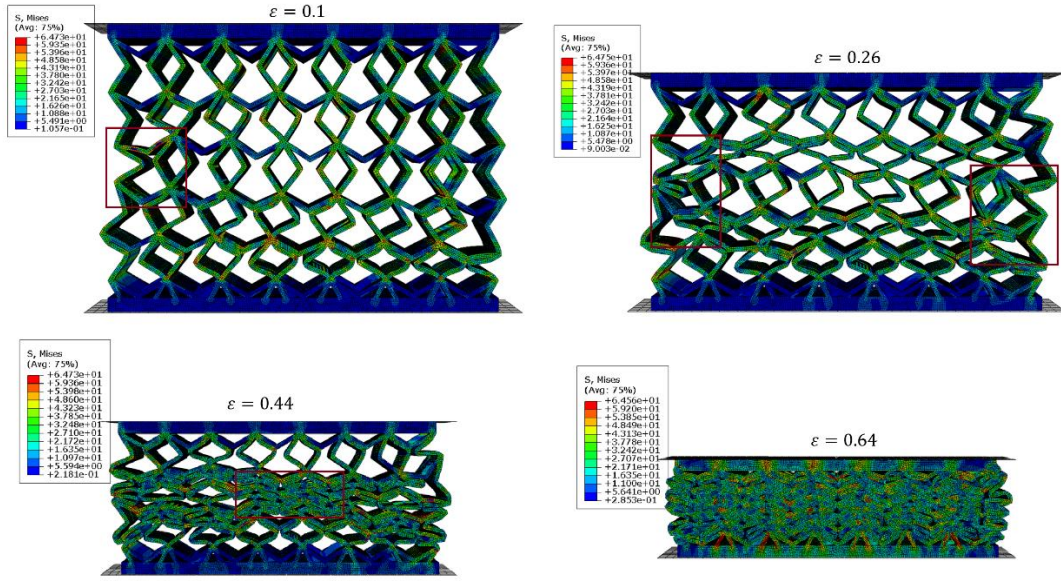
Genişliğin, enerji Emilimi ve özgül enerji Emilimi üzerindeki etkisi; genişlik (w) parametresi değiştirilerek ve farklı h/w oranlarına sahip SOR1-1, SOR2-1, SOR3-1, SOR1-05, SOR2-05, SOR3-05, SOR1-15, SOR2-15 ve SOR3-15 konfigürasyonları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4 : Enerji Emilimi ve SEA sonuçları.

Kodlar	$\Delta\rho$	$U(\text{MJ/m}^3)$	SEA(kJ/kg)
SOR1-1	0.335	0.91	2.24
SOR2-1	0.364	1.14	2.58
SOR3-1	0.304	0.76	2.06
SOR1-05	0.217	0.25	0.95
SOR2-05	0.234	0.28	0.98
SOR3-05	0.199	0.16	0.66
SOR1-15	0.440	1.75	3.28
SOR2-15	0.480	2.04	3.51
SOR3-15	0.398	1.35	2.80

Genişliğin artmasıyla birlikte h/w oranının düşmesi hem enerji Emilimi hem de özgül enerji Emilimi değerlerinde azalmaya neden olmuştur.

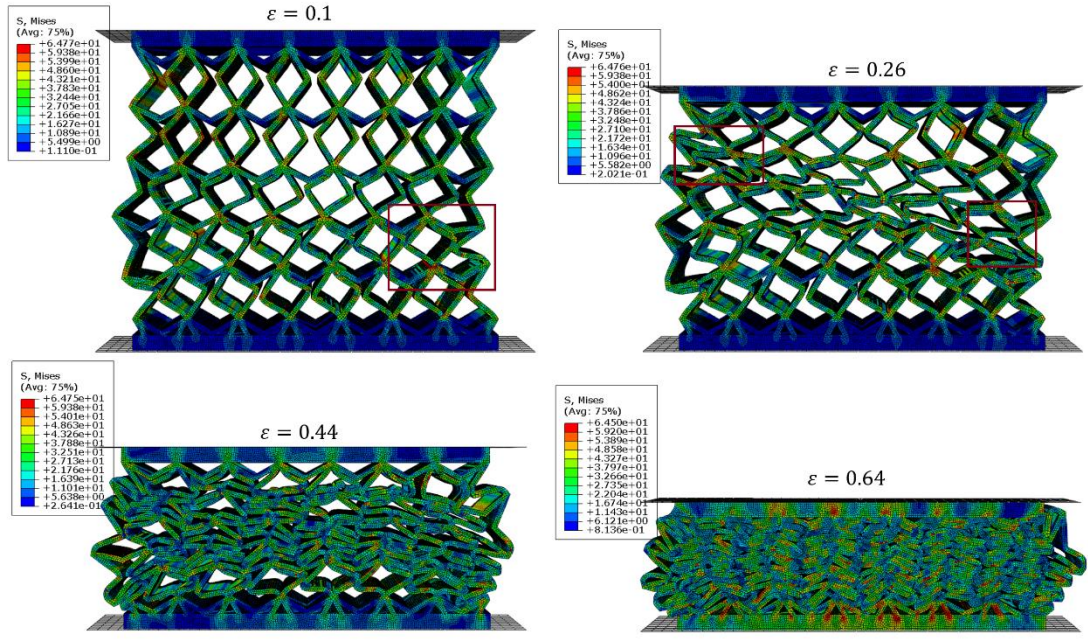
Şekil 4.4'te, SOR1-1 yapısına ait farklı deformasyon seviyelerindeki şekil değiştirme modları verilmektedir.



Şekil 4.4 : SOR1-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

İlk aşamada yapı genel olarak köşe bağlantı noktalarında yoğunlaşmıştır. Yapı henüz büyük bir deformasyon göstermez, bütünlüğünü korur. Gerinim arttıkça, yapıda kademeli olarak burkulmalar ve lokal çökmeler başlıyor. Özellikle orta kısımlardan başlayan bu deformasyonlar, yapının enerji emmeye başladığını gösterir. Son seviyede, yapı tamamen yoğunlaşmış, birim hücreler birbirine kenetlenmiş ve kompakt bir kütle haline gelmiştir. Bu, yapının maksimum enerji emilimi kapasitesine ulaştığı noktadır. SOR-1 yapısı, tipik bir hücresel malzemenin enerji emilim süreçlerini sergileyerek, kademeli bir deformasyon ve yoğunlaşma davranışı göstermiştir.

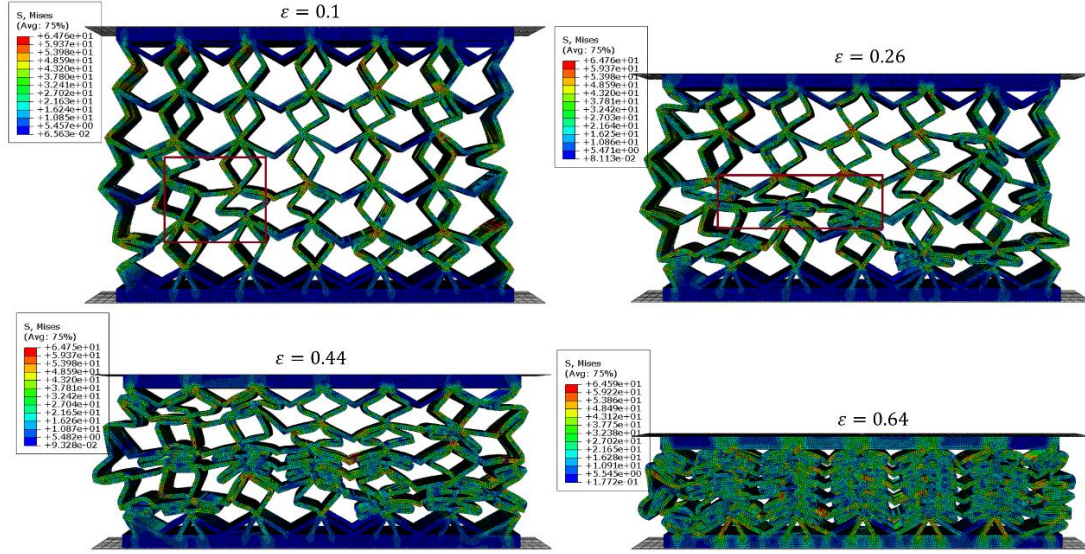
Şekil 4.5'te, SOR2-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.5 : SOR2-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

SOR2-1 yapısı, daha dar genişliğe sahip birim hücre geometrisi ile karakterize edilmektedir. Düşük deformasyon seviyelerinde birim hücre duvarlarında iç çökmeler gözlemlenmeye başlamıştır. Gerinim arttıkça burkulma ve lokal çökmeler ortaya çıkmaktadır. Daha dar birim hücreler, daha erken ve daha düzenli bir burkulma eğilimi sergileyebilir. Bu durum, yapının yük altında daha kararlı bir şekilde katlanmasına ve enerjinin daha homojen dağıtılmasına olanak tanımaktadır. Yüksek gerinimde, yapı tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hâle gelmiştir. SOR-1'e kıyasla, dar hücrelerin daha sıkı bir şekilde bir araya geldiği ve daha yoğun bir nihai yapı oluşturduğu tespit edilmiştir.

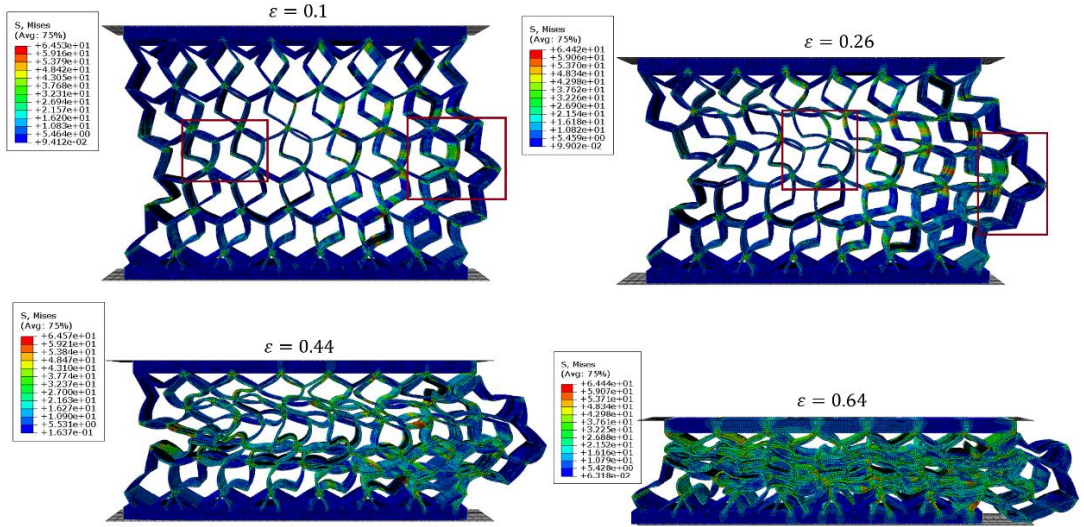
Şekil 4.6'te, SOR3-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.6 : SOR3-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Daha geniş hücre geometrisi nedeniyle, erken aşamalarda gerilmelerin hücreler üzerinde daha yaygın dağıldığı ve yapının başlangıçta daha esnek bir tepki verdiği gözlemlenmektedir. Gerinim arttıkça, SOR3-1 modelinde burkulma ve lokal çökmeler başlamaktadır. Daha geniş hücreler, daha az kontrollü veya düzensiz bir burkulma paterni sergileyebilir; hücrelerin birbirine kenetlenmesi yerine, yanal deformasyona daha eğilimli oldukları görülmektedir. Son aşamada, yapı yoğunlaşmıştır. Önceki modellere kıyasla, hücrelerin tamamen sıkışarak kompakt hale gelmesi daha zor veya düzensiz gerçekleşmektedir. Görsellerde, hücreler arasında bazı boşlukların kalma eğilimi veya tam sıkışmanın farklı bir patern izlediği gözlemlenebilmektedir.

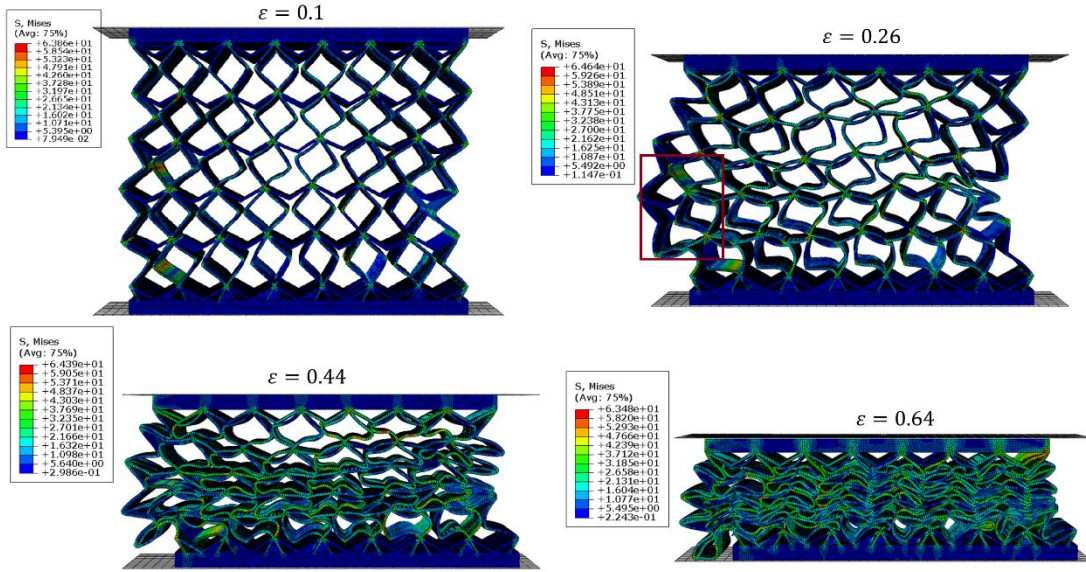
Şekil 4.7’de, SOR1-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.7 : SOR1-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Başlangıçta daha geniş hücre geometrisi nedeniyle gerilmeler yapı boyunca daha yaygın dağılmaktadır. Bu durum, modele başlangıçta daha esnek bir tepki kazandırmakta ve lokal gerilme yoğunlaşmalarını azaltmaktadır. Gerinim arttıkça hücre kollarında burkulma ve lokal çökmeler meydana gelmektedir. Dar hücreli modellere kıyasla, burkulma paterni daha düzensiz ve kontrolsüz gelişmektedir. Hücrelerin birbirine kenetlenerek kompaktlaşması yerine, daha çok yanal deformasyon eğilimi sergilediği gözlemlenmektedir. Bu durum, yapının enerji absorpsiyon davranışını farklılaştırmakta ve deformasyon sürecinde asimetric şekil bozulmalarına yol açmaktadır. Yapı genel olarak yoğunlaşmış olsa da, daha küçük hücreli modellere kıyasla tamamen kompakt hale gelmesi daha güç gerçekleşmektedir. Hücreler arasında yer yer boşlukların kalması veya tam sıkışmanın düzensiz ilerlemesi, yoğunlaşmanın heterojen bir patern izlemesine neden olmaktadır.

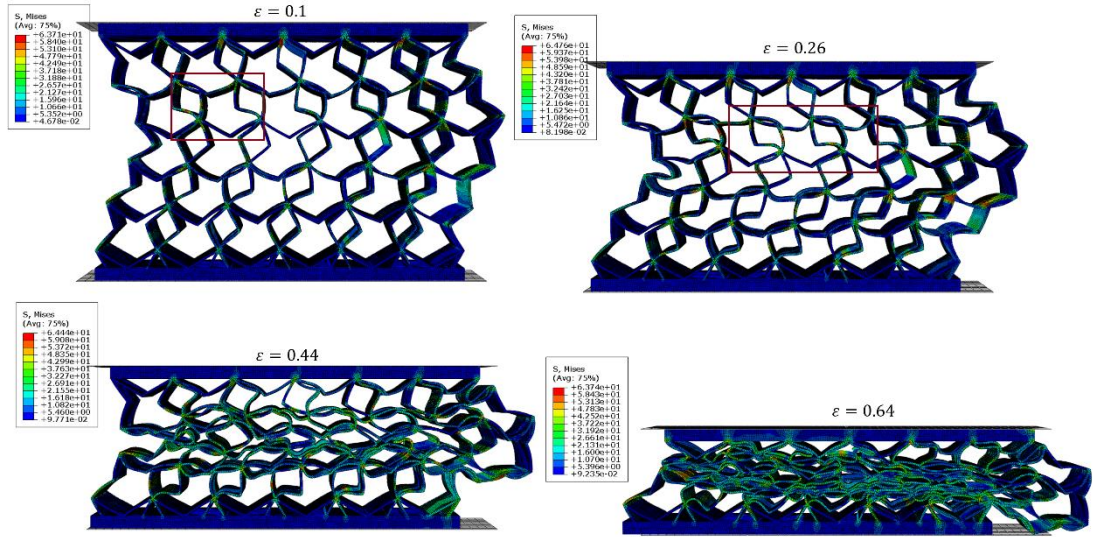
Şekil 4.8'de, SOR2-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.8 : SOR2-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Düşük deformasyon seviyelerinde özellikle birim hücre duvarlarının üst kısmında içe çökmeler gözlemlenmeye başlamıştır. Gerinim arttıkça burkulma ve lokal çökmeler meydana gelmektedir. SOR1-05 modelinde deformasyon, diğer modellere kıyasla ters yönde gerçekleşmektedir. Yüksek gerinimde yapı tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hâle gelmiştir. SOR1-05 modeline kıyasla, bu dar hücreler daha sıkı bir şekilde bir araya gelmiş ve daha yoğun bir nihai yapı oluşturmuştur.

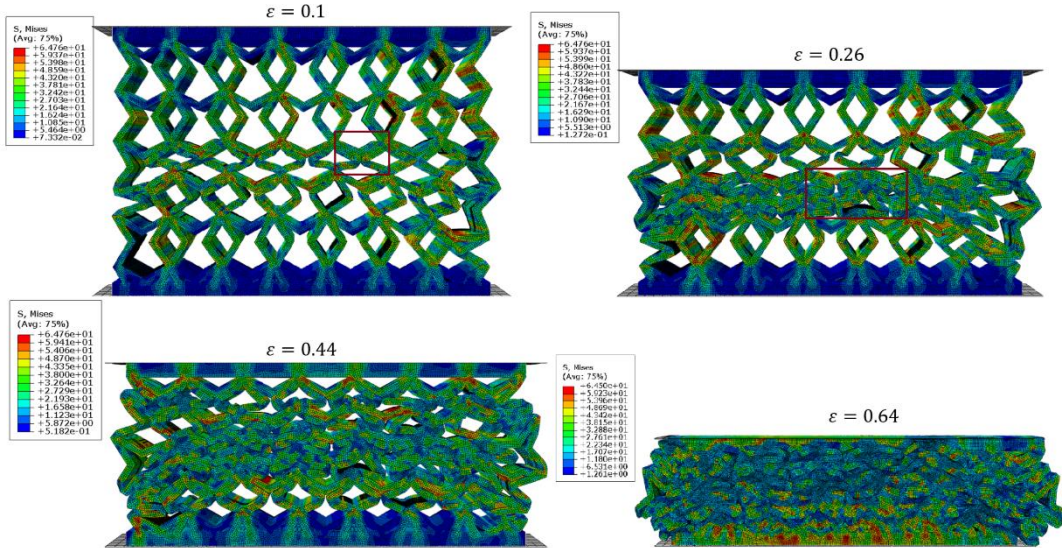
Şekil 4.9'da, SOR3-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.9 : SOR3-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Daha geniş hücre geometrisi nedeniyle, erken aşamada dahi gerilmelerin hücreler üzerinde daha yaygın dağıldığı ve yapıya başlangıçta daha esnek bir tepki kazandırdığı gözlemlenmiştir. Gerinim arttıkça, SOR3-05'te de burkulma ve çökmeler başlamaktadır. Ancak burada önemli bir fark vardır: Daha geniş hücreler, daha az kontrollü veya daha düzensiz bir burkulma patterni sergileyebilir. Hücrelerin birbirine kenetlenmesi yerine, daha çok yanal deformasyon eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Son seviyede yapı yoğunlaşmıştır; ancak önceki modellere kıyasla hücrelerin tamamen sıkışması ve kompakt hale gelmesi biraz daha zor veya düzensiz gerçekleşebilir. Görselde de hücreler arasında bazı boşlukların kalma eğilimi veya tam sıkışmanın farklı bir pattern izlediği gözlemlenmektedir.

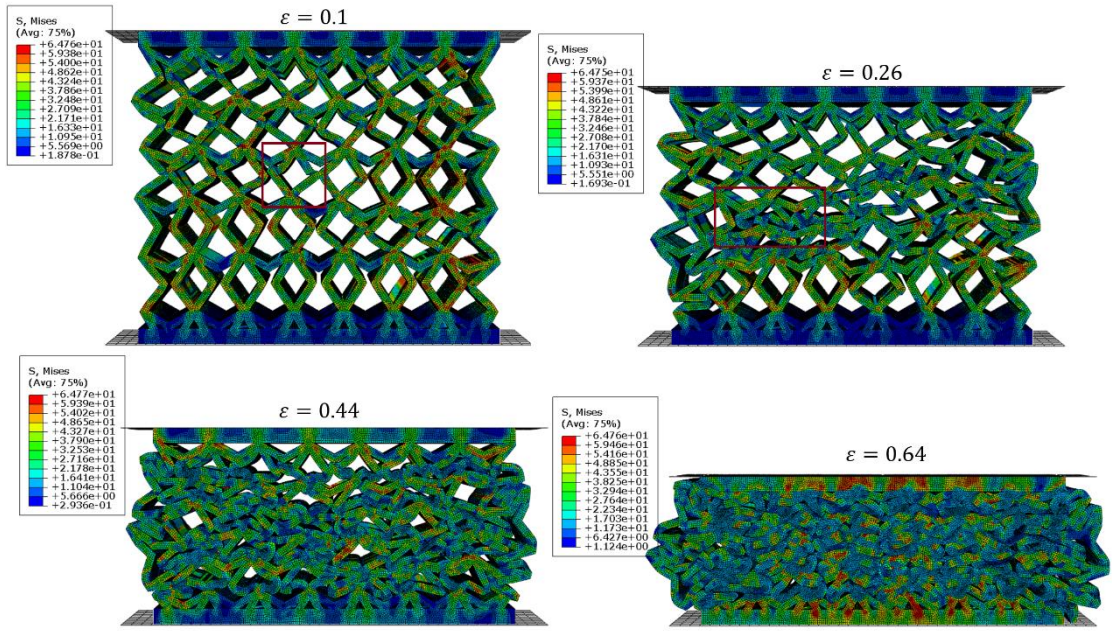
Şekil 4.10'da, SOR1-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.10 : SOR1-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

İlk aşamada yapı genel olarak köşe bağlantı noktalarında yoğunlaşmıştır. Yapı henüz büyük bir deformasyon göstermez, bütünlüğünü korur. Birim hücrenin üst kısımlarında çökmeler başlamıştır. Gerinim arttıkça, yapıda kademeli olarak burkulmalar ve lokal çökmeler başlıyor. Özellikle orta kısımlardan başlayan bu deformasyonlar, yapının enerji emmeye başladığını gösterir. Son seviyede, yapı tamamen yoğunlaşmış, birim hücreler birbirine kenetlenmiş ve kompakt bir kütle haline gelmiştir. Bu, yapının maksimum enerji emilimi kapasitesine ulaştığı noktadır. SOR1-15 yapısı, tipik bir hücresel malzemenin enerji emilim süreçlerini sergileyerek, kademeli bir deformasyon ve yoğunlaşma davranışı göstermiştir.

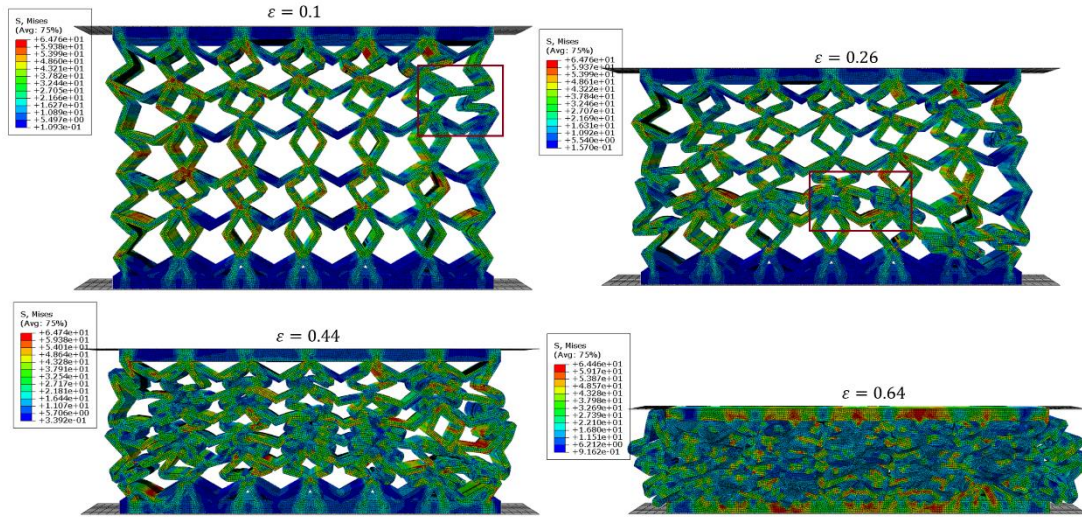
Şekil 4.11'de, SOR2-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.11 : SOR2-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Düşük deformasyon seviyelerinde, birim hücre duvarlarının özellikle üst kısımlarında içe çökmeler gözlemlenmeye başlamıştır. Gerinim arttıkça, yapıda kademeli burkulmalar ve lokal çökmeler meydana gelmektedir. Özellikle orta kısımlardan başlayan çapraz deformasyonlar, yapının enerji emmeye başladığını göstermektedir. Son seviyede ise yapı tamamen yoğunlaşmış, birim hücreler birbirine kenetlenmiş ve kompakt bir kütle haline gelmiştir. Bu durum, yapının maksimum enerji emilimi kapasitesine ulaştığı noktayı temsil etmektedir.

Şekil 4.12'de, SOR3-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.12 : SOR3-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Daha geniş hücre geometrisi nedeniyle, bu erken aşamada dahi gerilmenin hücreler üzerinde daha yaygın dağıldığı ve yapının başlangıçta daha esnek bir tepki verdiği gözlemlenebilir. Gerinim arttıkça, SOR-3 modelinde de burkulma ve lokal çökmeler meydana gelmektedir. Ancak burada önemli bir fark söz konusudur: Daha geniş hücreler, daha az kontrollü veya düzensiz bir burkulma paterni sergileyebilir. Hücrelerin birbirine kenetlenmesi yerine, daha çok yanal deformasyona eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Son seviyede, yapı tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hale gelmiştir.

4.2.10 Açının Enerji emilimi ve Özgül enerji emilimine etkisi

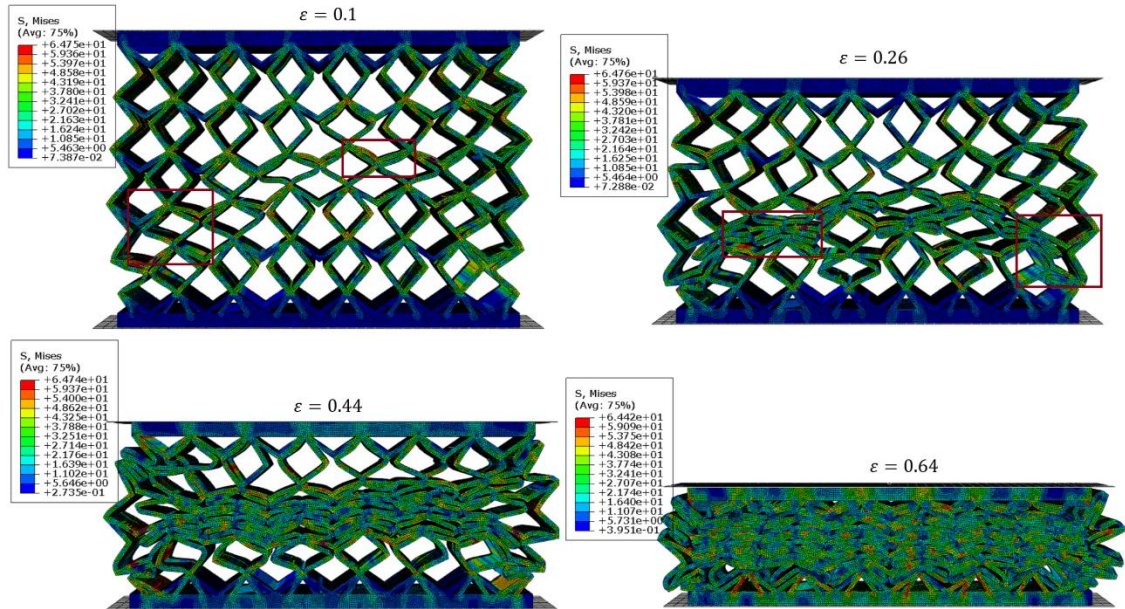
Enerji emilimi ve SEA üzerindeki açı etkileri, SOR1-1, SOR4-1, SOR5-1, SOR1-05, SOR4-05, SOR5-05, SOR1-15, SOR4-15 ve SOR5-15 konfigürasyonları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 : Enerji emilimi ve SEA sonuçları.

Kodlar	$\Delta\rho$	$U(\text{MJ/m}^3)$	SEA(kJ/kg)
SOR1-1	0.335	0.91	2.24
SOR4-1	0.344	0.87	2.09
SOR5-1	0.325	0.98	2.49
SOR1-05	0.217	0.25	0.95
SOR4-05	0.222	0.19	0.70
SOR5-05	0.213	0.12	0.46
SOR1-15	0.440	1.75	3.28
SOR4-15	0.449	1.60	2.94
SOR5-15	0.429	1.70	3.27

Açının enerji emilimi üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, 1 mm duvar kalınlığına sahip yapıların enerji emilimi ve özgül enerji emilimi değerlerinin açı arttıkça yükseldiği gözlemlenmiştir. En yüksek SEA değeri, SOR5-1 konfigürasyonunda elde edilmiştir. Ayrıca, bağıl yoğunluk azaldıkça SEA'nın arttığı da tespit edilmiştir. Bu bulgular, daha büyük açılara sahip yapıların, daha düşük yoğunlukla daha verimli bir enerji emilimi sağladığını göstermektedir. Diğer duvar kalınlıklarında ise doğrusal bir artış veya azalma gözlenmemiştir. Şekil 4.5'te SOR-4 yapısının, Şekil 4.6'da ise SOR-5 yapısının deformasyon modları sunulmuştur.

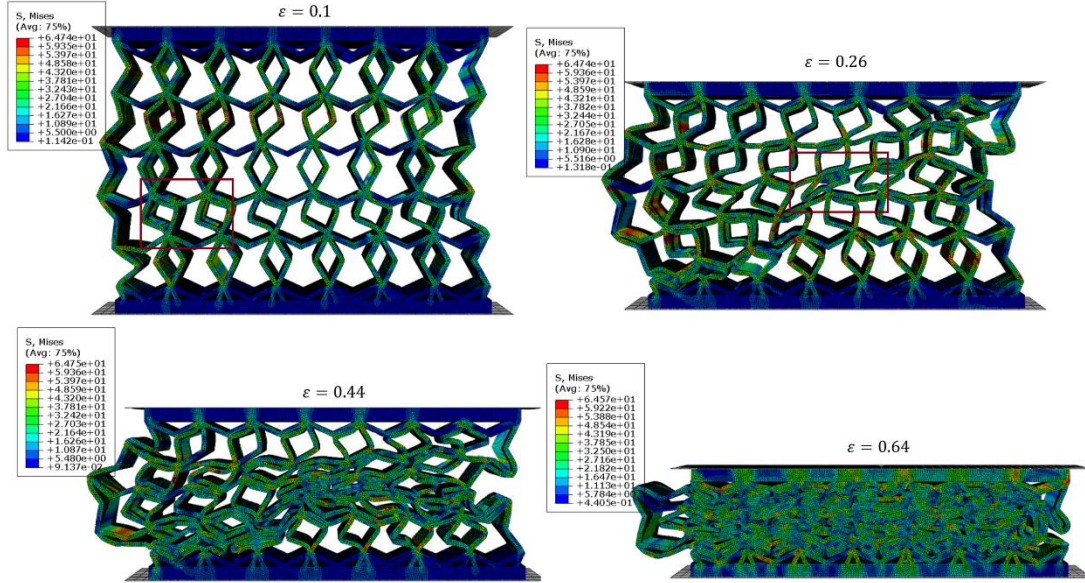
Şekil 4.13'de SOR4-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.13 : SOR4-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Gerilme yoğunlukları yine bağlantı noktalarında toplanmıştır. Bununla birlikte, 110°'lik daha dar açının, erken aşamada hücrelerin içe doğru bükülme eğilimini artırabileceği değerlendirilebilir. Gerinim arttıkça, SOR-4 yapısında da burkulma ve hücre çökmeleri gözlemlenmektedir. Dikkat çekici olan nokta, daha dar açılı hücrelerin, basma yüklemesi altında daha hızlı ve belirgin bir şekilde içe doğru katlanma eğilimi göstermesidir. Son aşamada, yapı tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hâle gelmiştir. Daha dar açılı hücrelerin, tam yoğunlaşma aşamasında daha düzenli bir istiflenme davranışı sergilediği gözlemlenebilir.

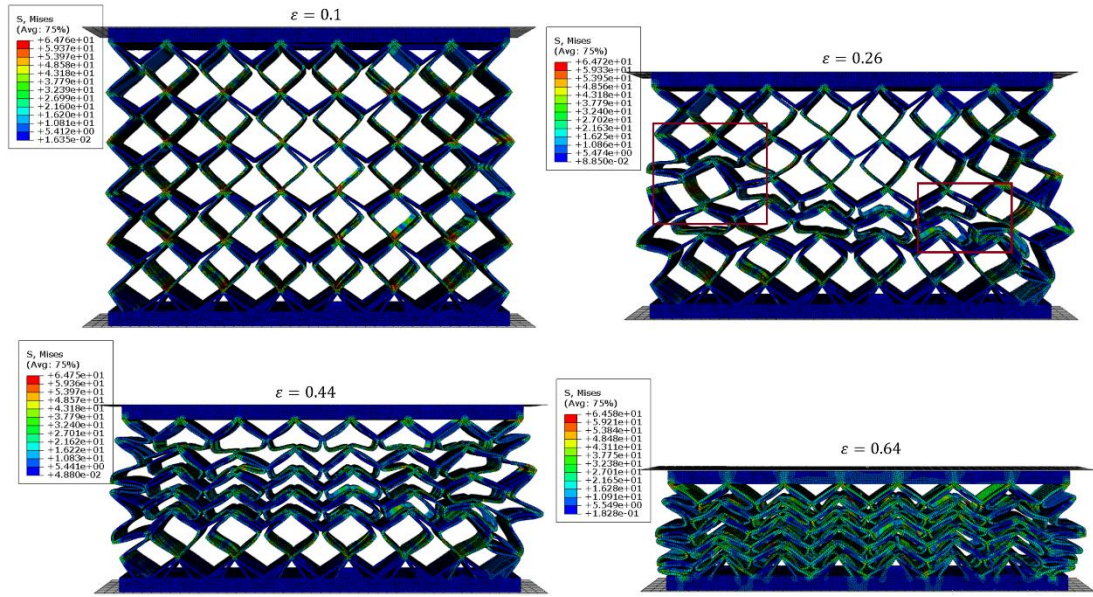
Şekil 4.14'te, SOR5-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.14 : SOR5-1 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Başlangıçta gerilme yoğunlukları yine bağlantı noktalarında toplanmıştır. Bununla birlikte, 130°'lik daha geniş açının, hücre duvarlarının basma yüküne karşı daha dik bir pozisyon almasını sağladığı gözlemlenmektedir. Bu aşamada, yapının başlangıçtaki rijitliği ve gerilme dağılımı üzerindeki etkileri değerlendirilebilir. Gerinim arttıkça, SOR-5 yapısında da burkulma ve hücre çökmeleri ortaya çıkmaktadır. Daha geniş açının etkisiyle, hücrelerin burkulma paterni daha farklı ve ani bir karakter sergileyebilir. Yapının genel stabilitesi, bu geniş açı nedeniyle etkilenmektedir. Gerilme dağılımında, yoğunlaşmış bölgelerde gerilmenin toplandığı ve bunun bazı noktalarda erken hasara yol açabileceği gözlemlenebilir. Yüksek gerinim seviyelerinde, yapı tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hâle gelmiştir. Görsel incelemeler, hücreler arasındaki boşlukların kapandığını ve yapının neredeyse katı bir blok gibi davrandığını göstermektedir.

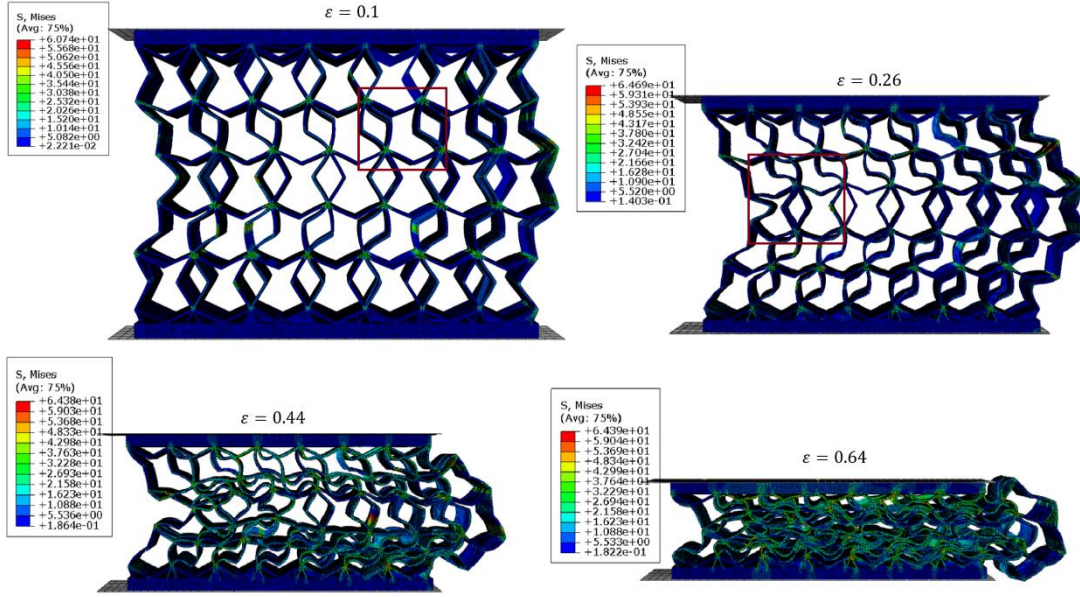
Şekil 4.15'te, SOR4-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.15 : SOR4-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Gerilme yoğunlukları yine bağlantı noktalarında toplanmıştır. Bununla birlikte, 110°'lik daha dar açının, erken aşamada özellikle hücrelerin üst kısımlarında içe doğru bükülme eğilimini artırdığı gözlemlenmektedir. Gerinim arttıkça, SOR4-05 yapısında da burkulma ve hücre çökmeleri ortaya çıkmaktadır. Daha dar açının etkisiyle, hücrelerin basma altında daha lokal ve belirgin bir şekilde içe doğru katlandığı görülmektedir. Yüksek gerinim seviyelerinde, yapı neredeyse tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hâle gelmiştir. Ayrıca, daha dar açılı hücrelerin tam yoğunlaşma aşamasında daha düzenli bir istiflenme sergileme eğiliminde olduğu gözlenmektedir.

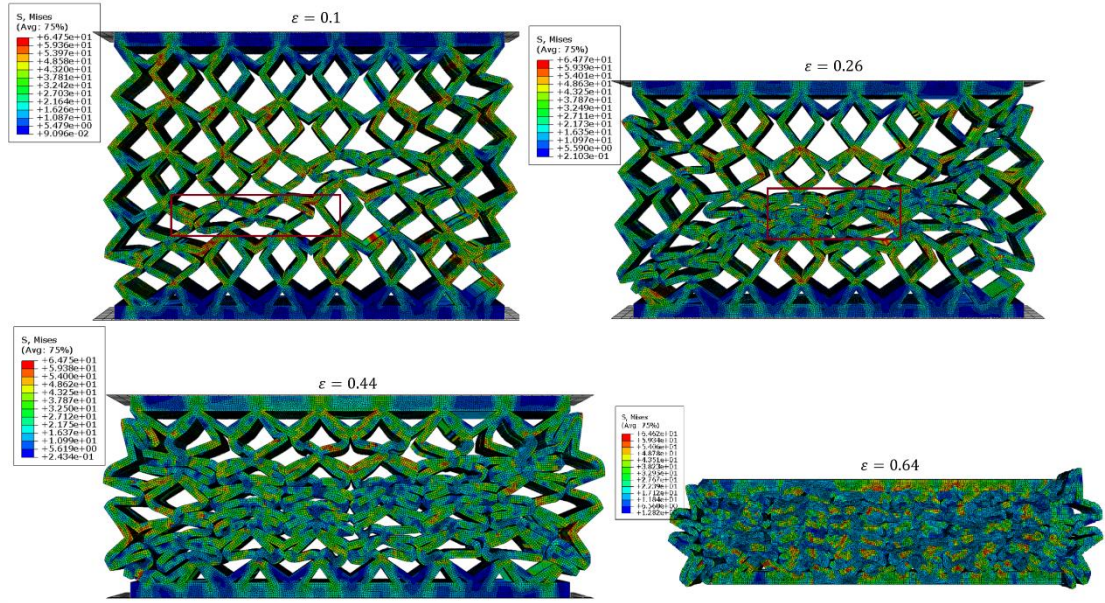
Şekil 4.16'da, SOR5-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.16 : SOR5-05 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Başlangıçta, gerilme yoğunlukları yine bağlantı noktalarında toplanmıştır. Ancak, 130°'lik daha geniş açının, hücre duvarlarının basma yüküne karşı daha dik bir pozisyon almasını sağladığı gözlemlenmiştir. Bu aşamada, yapının başlangıçtaki rijitliği ve gerilme dağılımı etkilenmektedir. Gerinim arttıkça, SOR5-05'te burkulma ve hücre çökmesi meydana gelmektedir. Daha geniş açının etkisiyle, hücrelerin burkulma paterni daha farklı ve daha ani olabilir; geniş açıdan kaynaklı deforme şekilleri daha dağınık bir görünüm sergilemektedir. Son seviyede, yapının hücreleri büyük ölçüde sıkışmış ve yapısal olarak kompakt hale gelmiştir.

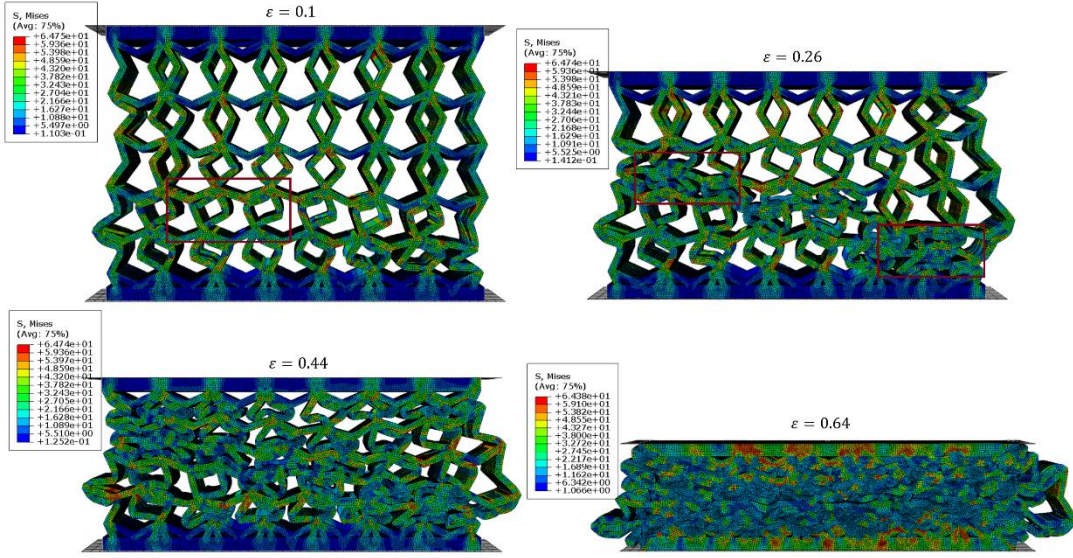
Şekil 4.17'de, SOR4-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.17 : SOR4-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Gerilmeler yine bağlantı noktalarında yoğunlaşmıştır. Ancak 110 derecelik daha dar açının, erken aşamada hücrelerin içe doğru bükülme eğilimini artırabileceğini düşünebiliriz. Gerinim arttıkça, SOR4-15'te de burkulma ve hücre çökmesi başlıyor. Burada dikkat çekici olan, orta kısımda daha lokal çökmelerin meydana gelmesidir. Son seviyede, yapı tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hale gelmiştir. Daha dar açılı hücrelerin, tam yoğunlaşma aşamasında daha düzenli bir istiflenme sergileme eğiliminde olduğunu görebiliriz.

Şekil 4.18'de, SOR5-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları verilmektedir.



Şekil 4.18 : SOR5-15 kodlu modelin (a) %10, (b) %26, (c) %44 ve (d) %64'lik birim şekil değiştirme seviyelerinde gözlenen deformasyon modları.

Başlangıçta, gerilme yoğunlukları yine bağlantı noktalarında toplanmıştır. Bazı birim hücrelerde ise daha dağınık deformasyonlar gözlemlenmiştir. Gerinim arttıkça, SOR5-15'te burkulma ve hücre çökmesi meydana gelmektedir. Daha geniş açının etkisiyle, hücrelerin burkulma paterni daha farklı ve daha ani olabilir; özellikle belirli bölgelerde lokal çökmeler gözlemlenmiştir. Bu geniş açı, yapının genel stabilitesini etkileyebilir. Gerilme dağılımında, yoğunlaşmış alanlarda gerilmenin biriktiği ve bunun bazı noktalarda erken hasara yol açabileceği görülmektedir. Yüksek gerinim seviyesinde, yapı tamamen yoğunlaşmış ve kompakt hale gelmiştir. Görsellerde de görüldüğü gibi, hücreler arasındaki boşluklar kapanmış ve yapı neredeyse katı bir blok gibi davranmaktadır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, savunma teknolojilerinde potansiyel uygulamalara sahip oksetik yapıların mekanik davranışları optimize edilmiştir. Hücre geometrisinde yapılan değişikliklerin – özellikle genişlik, h/w oranı, duvar kalınlığı ve açının – performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, geometrik parametrelerin malzeme davranışını belirleyici şekilde etkilediğini göstermiştir.

Genişliğin azaltılması, basma modülü, dayanım ve enerji emilimini artırırken; genişliğin artması bu özellikleri zayıflatmıştır. Açının büyütülmesi modülde artış sağlamış ancak enerji emiliminde sınırlı katkı sunmuştur. Duvar kalınlığının artması ise dayanım ve enerji sönümlene kapasitesini yükseltmiş, fakat yoğunlaşma gerinimini düşürmüştür.

Genel olarak, geometrik optimizasyon ile oksetik yapıların savunma sanayisinde hafif, darbe dayanımlı ve enerji emici bileşenler olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur.



KAYNAKLAR

- [1] Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchinson, I. J., & Rogers, S. C. (1991). Molecular network design. *Nature*, 353(6340), 124-124.
- [2] Liu, K., Han, L., Hu, W., Ji, L., Zhu, S., Wan, Z., ... & Tao, R. (2020). 4D printed zero Poisson's ratio metamaterial with switching function of mechanical and vibration isolation performance. *Materials & Design*, 196, 109153.
- [3] Lakes, R. (1993). Advances in negative Poisson's ratio materials.
- [4] Li, T., Liu, F., & Wang, L. (2020). Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 198, 108229.
- [5] Hu, L. L., Zhou, M. Z., & Deng, H. (2019). Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation. *Composite Structures*, 207, 323-330.
- [6] Jiang, W., Zhang, Y., Zhang, X. G., Han, D., Chen, W. Q., Xie, Y. M., ... & Ren, X. (2025). Synclastic behavior of auxetic metamaterials. *Engineering Structures*, 326, 119607.
- [7] Naboni, R., & Mirante, L. (2016). Computational design and simulation of bending-active auxetic structures. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, 11(2), 59-72.
- [8] Evans, K. E., & Alderson, K. L. (2000). Auxetic materials: the positive side of being negative. *Engineering Science and Education Journal*, 9(4), 148-154.
- [9] Oh, J. H., Kim, J. S., & Oh, I. K. (2020). Auxetic graphene oxide-porous foam for acoustic wave and shock energy dissipation. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107817.
- [10] Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G. S., & Robertson, C. I. (1982). The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 382(1782), 25-42.
- [11] Robert, F. (1985). An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio = -1. *J. Elast*, 15(4), 427-430.
- [12] Gibson, L. J. (1989). Modelling the mechanical behavior of cellular materials. *Materials Science and Engineering: A*, 110, 1-36.
- [13] Evans, K. E., Nkansah, M. A., & Hutchinson, I. J. (1994). Auxetic foams: modelling negative Poisson's ratios. *Acta metallurgica et materialia*, 42(4), 1289-1294.

- [14] **Alderson, A., & Alderson, K. L.** (2007). Auxetic materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 221(4), 565-575.
- [15] **Grima, J. N., Gatt, R., Alderson, A., & Evans, K. E.** (2005). On the potential of connected stars as auxetic systems. *Molecular Simulation*, 31(13), 925-935.
- [16] **Prall, D., & Lakes, R. S.** (1997). Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of—1. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(3), 305-314.
- [17] **Lorato, A., Innocenti, P., Scarpa, F., Alderson, A., Alderson, K. L., Zied, K. M., ... & Evans, K. E.** (2010). The transverse elastic properties of chiral honeycombs. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1057-1063.
- [18] **Rossiter, J., Takashima, K., Scarpa, F., Walters, P., & Mukai, T.** (2014). Shape memory polymer hexachiral auxetic, 23(4), 045007.
- [19] **Grima, J. N., Alderson, A., & Evans, K. E.** (2005). Auxetic behaviour from rotating rigid units. *Physica status solidi (b)*, 242(3), 561-575.
- [20] **Grima, J. N., & Evans, K. E.** (2000). Auxetic behavior from rotating squares. *Journal of materials science letters*, 19, 1563-1565.
- [21] **Smith, C. W., Grima, J. N., & Evans, K.** (2000). A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model. *Acta materialia*, 48(17), 4349-4356.
- [22] **Yang, W., Huang, R., Liu, J., Liu, J., & Huang, W.** (2022). Ballistic impact responses and failure mechanism of composite double-arrow auxetic structure. *Thin-Walled Structures*, 174, 109087.
- [23] **Masters, I. G., & Evans, K. E.** (1996). Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite structures*, 35(4), 403-422.
- [24] **Paik, J. K., Thayamballi, A. K., & Kim, G. S.** (1999). The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-walled structures*, 35(3), 205-231.
- [25] **Zhu, F., Wang, Z., Lu, G., & Zhao, L.** (2009). Analytical investigation and optimal design of sandwich panels subjected to shock loading. *Materials & Design*, 30(1), 91-100.
- [26] **Pannikottu, A., & Bandaru, S.** (2009). *Flexible Honeycomb Composite Vehicle Armor* (No. 2009-01-0601). SAE Technical Paper.
- [27] **Lakes, R. S., & Elms, K.** (1993). Indentability of conventional and negative Poisson's ratio foams. *Journal of Composite Materials*, 27(12), 1193-1202.
- [28] **Lee, J., Choi, J. B., & Choi, K.** (1996). Application of homogenization FEM analysis to regular and re-entrant honeycomb structures. *Journal of Materials Science*, 31, 4105-4110.
- [29] **Rad, M. S., Prawoto, Y., & Ahmad, Z.** (2014). Analytical solution and finite element approach to the 3D re-entrant structures of auxetic materials. *Mechanics of Materials*, 74, 76-87.

- [30] **Fu, M., Chen, Y., Zhang, W., & Zheng, B.** (2016). Experimental and numerical analysis of a novel three-dimensional auxetic metamaterial. *physica status solidi (b)*, 253(8), 1565-1575.
- [31] **Hou, X., Deng, Z., & Zhang, K.** (2016). Dynamic crushing strength analysis of auxetic honeycombs. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29(5), 490-501.
- [32] **Liu, W., Wang, N., Luo, T., & Lin, Z.** (2016). In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure. *Materials & Design*, 100, 84-91.
- [33] **Fu, M. H., Chen, Y., & Hu, L. L.** (2017). A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength. *Composite Structures*, 160, 574-585.
- [34] **Imbalzano, G., Tran, P., Ngo, T. D., & Lee, P. V.** (2017). Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19(3), 291-316.
- [35] **Yang, S., Qi, C., Wang, D., Gao, R., Hu, H., & Shu, J.** (2013). A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 589216.
- [36] **Wang, H., Lu, Z., Yang, Z., & Li, X.** (2019). A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance. *Composite Structures*, 208, 758-770.
- [37] **Wu, D., Zhai, W., & Lee, H. P.** (2021). Equivalent theories and tension properties of semi-reentrant structures. *Meccanica*, 56, 2053-2082.
- [38] **Etemadi, E., Bashtani, M., & Hu, H.** (2024). Novel auxetic metamaterials inspired from geometry patterns of an Iranian Mosque with improved energy absorption capability. *Materials Today Communications*, 41, 110470.
- [39] **Dassault Systèmes Simulia Corp.** (2024). *ABAQUS 2024* [Computer software].
- [40] **Tarfaoui, M., Gning, P. B., & Hamitouche, L.** (2008). Dynamic response and damage modeling of glass/epoxy tubular structures: Numerical investigation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(1), 1-12.
- [41] **Yamada, M., Suzuki, T., Kanamori, T., Hachiya, H., & Sugiyama, M.** (2013). Relative density-ratio estimation for robust distribution comparison. *Neural computation*, 25(5), 1324-1370.
- [42] **Dassault Systèmes.** (2024). *SolidWorks* (Version 2024) [Computer software]. Dassault Systèmes.
- [43] **MathWorks.** (2023). *MATLAB* (Version R2023b) [Computer software]. The MathWorks, Inc.
- [44] **Yao, S., Chen, Z., Xu, P., Li, Z., & Zhao, Z.** (2021). Experimental and numerical study on the energy absorption of polyurethane foam-filled metal/composite hybrid structures. *Metals*, 11(1), 118.

- [45] **Li, Q., Zhi, X., & Fan, F.** (2022). Quasi-static compressive behaviour of 3D-printed origami-inspired cellular structure: experimental, numerical and theoretical studies. *Virtual and Physical Prototyping*, 17(1), 69-91.
- [46] **Li, D., Liao, W., Dai, N., & Xie, Y. M.** (2019). Comparison of mechanical properties and energy absorption of sheet-based and strut-based gyroid cellular structures with graded densities. *Materials*, 12(13), 2183.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Şenay YENER

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği.