

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LATİS MALZEMELERİN ENERJİ EMME VE EZİLME
DAVRANIŞLARININ STATİK VE DİNAMİK YÜKLEMELER ALTINDA
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Akın KARABATAK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cihan TEKOĞLU

AĞUSTOS 2023



ÖZET

Yüksek Lisans

LATİS MALZEMELERİN ENERJİ EMME VE EZİLME DAVRANIŞLARININ STATİK VE DİNAMİK YÜKLEMELER ALTINDA İNCELENMESİ

Akın KARABATAK

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cihan TEKOĞLU

Tarih: Ağustos 2023

Latis malzemeler, yoğun katılara kıyasla, hafiflik, yüksek mukavemet ve yüksek enerji emme kapasitesi gibi bir dizi üstün özelliklere sahiptir. Bu üstün özelliklerinden dolayı latis malzemeler makine, inşaat, havacılık, uzay, otomotiv, biyomedikal ve kişisel koruyucu ekipmanlar dâhil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yapısal bileşenler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerinde son yıllarda yaşanan ilerlemeler, geleneksel üretim metotları ile üretilmeyen geometriye sahip latis malzemelerin üretilebilir hale gelmesini mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, teknolojinin gelişmesiyle daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip malzemelere olan ihtiyaçların artması, farklı birim hücre geometrilerine sahip latis malzemelerin enerji emme ve ezilme davranışlarının incelenmesini önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir. Ancak, bu tür malzemeler üzerine yapılan çalışmalar, günden güne artmakla birlikte, genellikle Altıgen ve diğer klasik latis malzemelerle sınırlıdır. Bu çalışmada, üstün mekanik özelliklere sahip, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I, Değiştirilmiş Kagome-II ve Değiştirilmiş Kagome-III adında beş yeni izotropik latis malzemenin (C Tekoğlu. Truss-lattice materials consisting of mixed polygons, 2023. World Intellectual Property Organization, Başvuru numarası:

PCT/TR2022/051154.) düzlem içi enerji emme ve ezilme davranışları sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. Sonuçlar, Altıgen ve Üçgen-Üçgen latislere ait analizlerle karşılaştırılmıştır. Latislerin ezilme davranışları gözlemlenerek yükleme hızına göre 3 farklı deformasyon modu tanımlanmıştır: sanki statik, geçiş ve dinamik mod. Enerji emme ve ezilme davranışları, literatürde sıklıkla kullanılan beş farklı metrik kullanılarak karşılaştırılmıştır: yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi, tepe çarpışma gerilmesi, ortalama plato gerilmesi, toplam enerji emilimi ve ideallik parametresi. Sanki statik ve geçiş modlarında Üçgen-Üçgen latis ile birlikte Değiştirilmiş Kagome-II latis yapısı en düşük enerji emme kapasitesine sahiptirler. Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I ve Değiştirilmiş Kagome-III latis yapıları, Altıgen latisle kıyasla sanki statik modda sırasıyla, %19.6, %20.2, %19 ve %27, geçiş modunda ise sırasıyla, %17, %11.6, %10.8 ve %29.5 daha yüksek enerji emme kapasitesi sergilemiştir. Dinamik modda ise Altıgen latis en düşük enerji emme kapasitesine sahiptir. Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen- Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I, Değiştirilmiş Kagome-II ve Değiştirilmiş Kagome-III latis yapıları dinamik modda sırasıyla, Altıgen latisle kıyasla, %22.5, %5, %5.1, %9.9, %10.8 ve %26.1 daha yüksek enerji emme kapasitelerine sahiptir. Tüm deformasyon modlarında en yüksek enerji emme kapasitesine sahip latis Değiştirilmiş Kagome-III'tür. İdeallik parametresi açısından ise Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapısı ideal bir enerji emiciye en yakın davranışı sergilemiştir. Bu çalışma, tez kapsamında incelenen latislerin enerji emme ve ezilme uygulamalarında sıklıkla kullanılan Altıgen ve diğer klasik latis malzemelere önemli rakipler olduklarını açıkça ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Latis malzemeler, Sonlu elemanlar analizi, Ezilme davranışı, Enerji emme kapasitesi, Enerji emme metrikleri.

ABSTRACT

Master of Science

INVESTIGATION OF ENERGY ABSORPTION AND CRUSHING BEHAVIORS OF LATTICE MATERIALS UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

Akın KARABATAK

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Cihan TEKOĞLU

Date: August 2023

Lattice materials have a number of superior properties compared to dense solids, such as low weight, high strength and high energy absorption capacity. Because of these superior properties, lattice materials are widely used as structural components in various industries, including machinery, construction, aerospace, automotive, biomedical and personal protective equipment. In recent years, advancements in additive manufacturing technologies have made it possible to produce lattice materials with complex geometries that cannot be produced with traditional production methods. Furthermore, with the development of technology, the need for materials with higher energy absorption capacity has increased, making the study of energy absorption and crushing behavior of lattice materials with different unit cell geometries an important research area. However, although the research on such materials is growing rapidly, it is predominantly limited to hexagonal and other classical lattice materials. In this study, the in-plane energy absorption and crushing behaviors of five new isotropic lattice materials (C Tekoğlu. Truss-lattice materials consisting of mixed polygons, 2023. World Intellectual Property Organization, Application Number: PCT/TR2022/051154.) with superior mechanical properties, namely Mixed Hexagonal-2 Triangular, Hierarchical-3 Triangular, Modified

Kagome-I, Modified Kagome-II and Modified Kagome-III, were investigated by finite element analyses. The results were compared with analyzes of Hexagonal and Triangular-Triangular lattices. By observing crushing behaviors of lattice materials, three different deformation modes were defined according to the crushing velocity: quasi-static, transition and dynamic mode. The energy absorption and crushing behaviors were compared using five different metrics that are often used in the literature: densification strain, peak crushing stress, mean plateau stress, energy absorption and ideality parameter. Modified Kagome-II lattice together with Triangular-Triangular lattice structure have the lowest energy absorption capacity in quasi-static and transition modes. The Mixed Hexagonal-2 Triangular, Hierarchical-3 Triangular, Modified Kagome-I, and Modified Kagome-III lattice structures exhibited, compared to the Hexagonal lattice, approximately 19.6%, 20.2%, 19%, and 27% higher energy absorption capacities in static mode, and 17%, 11.6%, 10.8%, and 29.5% higher energy absorption capacities in transition mode, respectively. In dynamic mode, the hexagonal lattice has the lowest energy absorption capacity. The Mixed Hexagonal-2 Triangular, Hierarchical-3 Triangular, Triangular-Triangular, Modified Kagome-I, Modified Kagome-II, and Modified Kagome-III lattice structures have higher energy absorption capacities in dynamic mode compared to the Hexagonal lattice, 22.5%, 5%, 5.1%, 9.9%, 10.8%, and 26.1% higher energy absorption capacities, respectively. The lattice with the highest energy absorption capacity in all deformation modes is the Modified Kagome-III. In terms of the ideality parameter, the Hierarchical-3 Triangular lattice structure exhibited the closest behavior to an ideal energy absorber. Overall, this study clearly reveals that the lattices studied in the thesis are important competitors to Hexagonal and other classical lattice materials, which are frequently used in energy absorption and crushing applications.

Keywords: Lattice materials, Finite element analysis, Crushing behavior, Energy absorption capacity, Energy absorption metrics.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Doç. Dr. Cihan TEKOĞLU'na, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, tez çalıőmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Oğuz Aycan İÇKİN'e ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalıőmalarımı 219M296 numaralı projeyle destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xvi
SEMBOL LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	4
2. SAYISAL ÇALIŞMALAR	21
2.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....	21
2.2 Sonlu Elemanlar Analizleri ve Sonuçları.....	35
2.3 Latis Malzemelerin Enerji Emme ve Ezilme Davranışlarının Karşılaştırılması	56
3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	61
KAYNAKLAR	65
EKLER	75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Hüresel katıların doğada kullanım örnekleri: (a) insan femur kemiği kesit görüntüsü, (b) tukan kuş gagası ve kesiti görüntüsü, (c) bitki sistemi mikroyapısı ve bal peteği görüntüsü, (d) nilüfer çiçeği ve damarlı yapı görüntüsü, (e) kızıl geyik boynuzu ve enine kesit görüntüsü, (f) gergedan böceği ve dış kabuğunun iç yapısının görüntüsü	2
Şekil 1.2 : Enerji emici olarak kullanılan latis yapı ve patlama etkisinden korunmak istenen yapının şematik gösterimi	4
Şekil 1.3 : Latis malzemelerin farklı konfigürasyonları	5
Şekil 1.4: Pozitif Poisson oranına sahip bazı 2B latis malzeme örnekleri	6
Şekil 1.5 : Habib vd. tarafından yapılan çalışmada düşük hızlarda farklı pozitif Poisson oranına sahip latis yapıların düzlem içi enerji emme kapasiteleri ve ezilme davranışlarının karşılaştırılma grafiği	8
Şekil 1.6: Negatif Poisson oranına sahip bazı 2B latis malzeme örnekleri	9
Şekil 1.7 : Öksetik ve pozitif Poisson oranına sahip latis malzemelerin girinti dirençlerinin karşılaştırılması için yapılan SE analizi görüntüsü: (a) İçe Girintili Altıgen öksetik latis, (b) pozitif Poisson oranına sahip Altıgen	11
Şekil 1.8 : Yang vd. tarafından klasik alüminyum köpük ile öksetik İçe Girintili Latis malzemenin balistik yük altında enerji emme ve ezilme davranışlarının karşılaştırma görüntüsü: (a) SE analiz görüntüleri, (b) farklı hızlarda enerji emme kapasitesi grafiği	12
Şekil 1.9 : Hiyerarşik 2B latis yapılara ait örnekler	14
Şekil 1.10 : Hiyerarşik latis malzeme örnekleri: (a) Köşe tabanlı hiyerarşik latis, (b) hücre duvarı tabanlı hiyerarşik latis, (c) fraktal tabanlı hiyerarşik latis ..	15
Şekil 1.11 : Düzlem içi darbe yüklemesine maruz kalan bir latis malzemenin tipik nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi	17
Şekil 1.12 : Düzlem içi darbe yüklemesine maruz kalan bir Altıgen latis yapının farklı deformasyon modlarında oluşan ezilme davranışları: (a) sanki statik mod, (b) geçiş modu, (c) dinamik mod	18
Şekil 2.1 : Wang vd., Zhang vd. ve tez kapsamında düzenlenen dairesel hücrelerden oluşan bir latis yapının ezilme davranışını incelemek için kullanılan SE modelinin (a) şematik gösterimi, (b) modele uygulanan sınır koşulları	22
Şekil 2.2 : Düzenli dairesel hücrelerden oluşan latis yapının ezilme davranışı için elde edilen SE analizi sonuçları : (a) Wang vd., (b) Zhang vd., (c) tez kapsamında yapılan SE analizi.	23
Şekil 2.3 : Sanki statik mod için 2222.7 mm/s ezilme hızında, Zhang vd., Wang vd. ve tez kapsamında düzenli dairesel hücrelerden oluşan latis yapının SE analizleriyle elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafikleri.....	23
Şekil 2.4 : Sanki statik mod için 2222.7 mm/s ezilme hızında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan: (a) Zhang vd.'nin yaptığı ve (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = \%13.4$, $\epsilon = \%41.3$, $\epsilon = \%74.1$ 'dir.	24

Şekil 2.5 : Geçiş modu için 22227.2 mm/s ezilme hızında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan: (a) Zhang vd.'nin yaptığı ve (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = 13.4$, $\epsilon = 41.3$, $\epsilon = 74.1$ 'dir.	25
Şekil 2.6 : Dinamik mod için 66817.2 mm/s ezilme hızında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan: (a) Zhang vd.'nin yaptığı ve (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = 13.4$, $\epsilon = 41.3$, $\epsilon = 74.1$ 'dir.	25
Şekil 2.7 : Sanki statik modda Zhang vd. ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafiği.	26
Şekil 2.8 : Geçiş modunda Zhang vd. ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafiği.	27
Şekil 2.9 : Dinamik modda Zhang vd. ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafiği.	27
Şekil 2.10 : Habib vd. tarafından Düzenli Dairesel latis yapının ezilme davranışını incelemek için oluşturulan SE modeli.....	28
Şekil 2.11 : 1000 mm/s yükleme hızında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan (a) Habib vd.'nin yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen deforme oluş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = 20$, $\epsilon = 40$, $\epsilon = 60$, $\epsilon = 80$ 'dir.	29
Şekil 2.12 : Habib vd. ve tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafikleri.	29
Şekil 2.13 : Ruan vd. tarafından Altıgen latisin ezilme davranışlarını incelemek için oluşturulan SE modeli.	31
Şekil 2.14 : Sanki statik mod için, 3500 mm/s yükleme hızı altında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan (a) Ruan vd.'nin yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Soldan sağa doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = 7.4$, $\epsilon = 15.8$, $\epsilon = 24.2$, $\epsilon = 32.5$, $\epsilon = 45.2$, $\epsilon = 53.5$, $\epsilon = 62$, $\epsilon = 74.5$ 'tir.....	32
Şekil 2.15 : Geçiş modu için, 14000 mm/s yükleme hızı altında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan (a) Ruan vd.'nin yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Soldan sağa doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = 7.4$, $\epsilon = 15.8$, $\epsilon = 24.2$, $\epsilon = 32.5$, $\epsilon = 45.2$, $\epsilon = 53.5$, $\epsilon = 62$, $\epsilon = 74.5$ 'tir.....	33
Şekil 2.16 : Dinamik mod için, 70000 mm/s yükleme hızı altında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan (a) Ruan vd.'nin yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Soldan sağa doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = 7.4$, $\epsilon = 15.8$, $\epsilon = 24.2$, $\epsilon = 32.5$, $\epsilon = 45.2$, $\epsilon = 53.5$, $\epsilon = 62$, $\epsilon = 74.5$ 'tir.....	34
Şekil 2.17 : Geçiş modunda, Ruan vd. ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen kuvvet - yer değiştirme grafikleri.....	35

Şekil 2.18 : İki boyutlu latis malzemeler için altıgen birim hücreler: (a) Altıgen, (b) Karma Altıgen-2 Üçgen, (c) Hiyerarşik-3 Üçgen, (d) Üçgen-Üçgen, (e) Değiştirilmiş Kagome-I, (f) Değiştirilmiş Kagome-II, (g) Değiştirilmiş Kagome-III.	36
Şekil 2.19 : x_1 - x_2 doğrultularında (a) 32-29, (b) 16-15, (c) 12-11, (d) 8-7 birim hücre sayısına sahip Altıgen latis yapılar için normalize ortalama plato gerilmesinin hücre duvarı başına eleman sayısına göre değişimi.....	37
Şekil 2.20 : x_1 - x_2 doğrultularında farklı birim hücre sayılarına sahip Altıgen latis yapıların nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafikleri: (a) sanki statik mod için latis yapılar, (b) dinamik mod için latis yapılar.	38
Şekil 2.21 : x_1 - x_2 doğrultularında 12-11 birim hücre sayısına sahip (a) Karma Altıgen-2 Üçgen, (b) Hiyerarşik-3 Üçgen, (c) Üçgen-Üçgen, (d) DK-I, (e) DK-II, (f) DK-III latis yapılar için normalize ortalama plato gerilmesinin hücre duvarı başına eleman sayısına göre değişimi.....	39
Şekil 2.22 : Altıgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	40
Şekil 2.23 : Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	41
Şekil 2.24 : Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	42
Şekil 2.25 : Üçgen-Üçgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	42
Şekil 2.26 : DK-I latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	43
Şekil 2.27 : DK-II latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	43
Şekil 2.28 : DK-III latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	44
Şekil 2.29 : Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I, Değiştirilmiş Kagome-II ve Değiştirilmiş Kagome-III latis yapıların sanki statik deformasyon modunda (yükleme hızı=3500 mm/s) nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri.....	45
Şekil 2.30 : Altıgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	46
Şekil 2.31 : Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	47
Şekil 2.32 : Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.	47

Şekil 2.33 : Üçgen-Üçgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	48
Şekil 2.34 : DK-I latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	48
Şekil 2.35 : DK-II latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	49
Şekil 2.36 : DK-III latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	50
Şekil 2.37 : Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I, Değiştirilmiş Kagome-II ve Değiştirilmiş Kagome-III latis yapıların geçiş deformasyon modunda (yükleme hızı=14000 mm/s) nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri.	50
Şekil 2.38 : Altıgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	51
Şekil 2.39 : Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	52
Şekil 2.40 : Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	52
Şekil 2.41 : Üçgen-Üçgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	53
Şekil 2.42 : DK-I latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	54
Şekil 2.43 : DK-II latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	54
Şekil 2.44 : DK-III latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$	55
Şekil 2.45 : Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I, Değiştirilmiş Kagome-II ve Değiştirilmiş Kagome-III latis yapıların dinamik deformasyon modunda (yükleme hızı=70000 mm/s) nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri.	55
Şekil 2.46 : Tez kapsamında incelenen latis yapıların sanki statik, geçiş ve dinamik deformasyon modlarında yoğunlaşma bölgesine geçtikleri birim şekil değiştirme değerleri.	56
Şekil 2.47 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik ve geçiş deformasyon modlarında tepe çarpışma gerilme değerleri.	57
Şekil 2.48 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik, geçiş ve dinamik deformasyon modlarında ortalama plato gerilme değerleri.	57
Şekil 2.49 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik, geçiş ve dinamik deformasyon modlarında enerji emme kapasiteleri.	58

Şekil 2.50 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik ve geçiş deformasyon modlarında ideallik parametresi değerleri.	58
Şekil Ek. 1.1 : Tez kapsamında incenen Altıgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	76
Şekil Ek. 1.2 : Tez kapsamında incenen Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	76
Şekil Ek. 1.3 : Tez kapsamında incenen Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	76
Şekil Ek. 1.4 : Tez kapsamında incenen Üçgen-Üçgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	77
Şekil Ek. 1.5 : Tez kapsamında incenen DK-I latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	77
Şekil Ek. 1.6 : Tez kapsamında incenen DK-II latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	77
Şekil Ek. 1.7 : Tez kapsamında incenen DK-III latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	78
Şekil Ek. 2.1 : Tez kapsamında incenen Altıgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.....	79
Şekil Ek. 2.2 : Tez kapsamında incenen Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	79
Şekil Ek. 2.3 : Tez kapsamında incenen Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	79
Şekil Ek. 2.4 : Tez kapsamında incenen Üçgen-Üçgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	80
Şekil Ek. 2.5 : Tez kapsamında incenen DK-I latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.....	80
Şekil Ek. 2.6 : Tez kapsamında incenen DK-II latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.....	80
Şekil Ek. 2.7 : Tez kapsamında incenen DK-III latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.....	81
Şekil Ek. 3.1 : Tez kapsamında incenen Altıgen latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	82
Şekil Ek. 3.2 : Tez kapsamında incenen Karma Altıgen-2 latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	82

Şekil Ek. 3.3 : Tez kapsamında incenen Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	82
Şekil Ek. 3.4 : Tez kapsamında incenen Üçgen-Üçgen latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	83
Şekil Ek. 3.5 : Tez kapsamında incenen DK-I latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	83
Şekil Ek. 3.6 : Tez kapsamında incenen DK-II latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	83
Şekil Ek. 3.7 : Tez kapsamında incenen DK-III latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.	84



KISALTMALAR

2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
DK-I	: Değiştirilmiş Kagome-I
DK-II	: Değiştirilmiş Kagome-II
DK-III	: Değiştirilmiş Kagome-III
GPa	: GigaPascal
İP	: İdeallik Parametresi
kg	: Kilogram
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: MegaPascal
N	: Newton
NPO	: Negatif Poisson oranı
OPG	: Ortalama Plato Gerilmesi
s	: Saniye
SE	: Sonlu Elemanlar
TÇG	: Tepe Çarpışma Gerilmesi
TEE	: Toplam Enerji Emilimi
TEE_{ideal}	: İdeal bir enerji emici tarafından emilen enerji
TEE_{latis}	: Latis tarafından emilen enerji
YBŞD	: Yoğunlaşma Birim şekil Değiştirmesi



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
σ	Gerilme
σ_{pl}	Plato Gerilmesi
ε	Birim şekil değiştirme
ε_p	Plato rejimi başlangıcına denk gelen birim şekil değiştirme
ε_y	Yoğunlaşma birim şekil değiştirme
σ_{max}	Tepe çarpışma gerilmesi
ρ^*	Latis malzeme bağıl yoğunluğu
l	Latis malzeme birim hücre duvarı uzunluğu
t_{di}	Latis malzeme düzlem içi kalınlığı
t_{dd}	Latis malzeme düzlem dışı kalınlığı
V, V_0	Latis yapıyı ezen plaka hızı



1. GİRİŞ

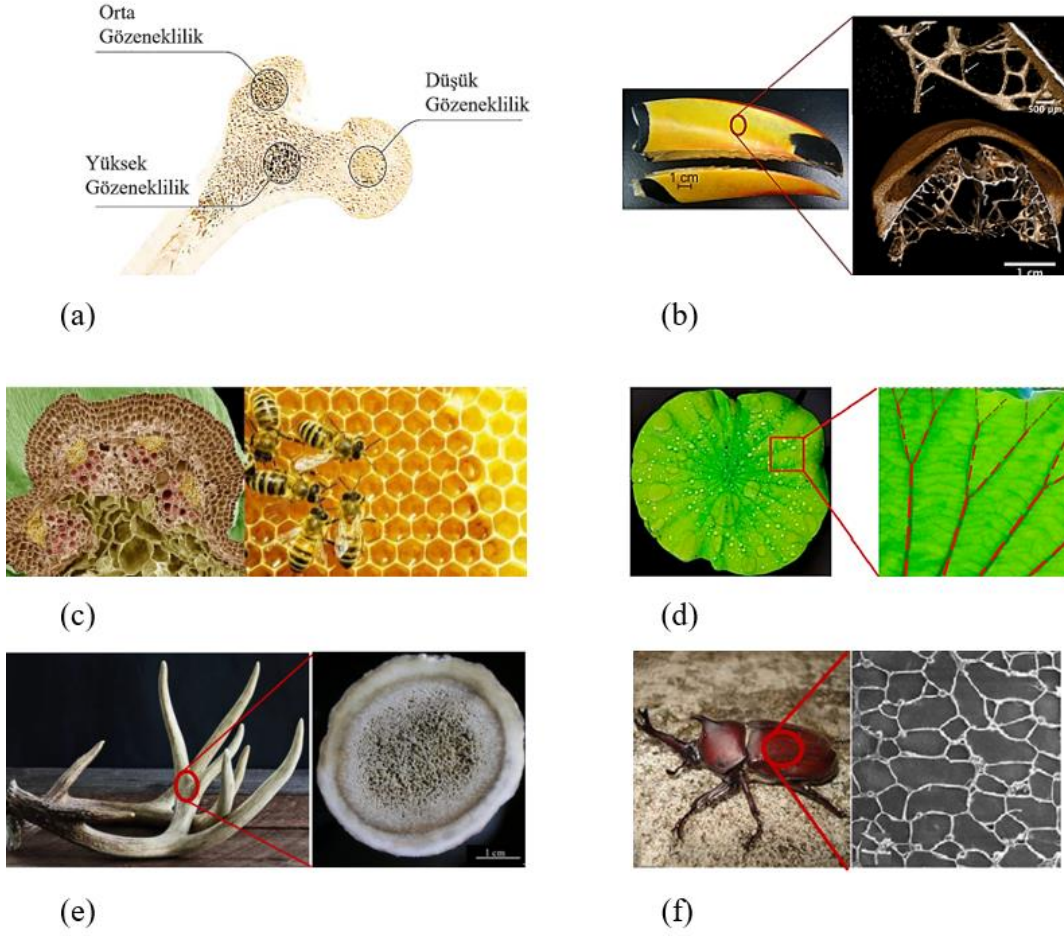
Ahşap, mantar, kemik, mercan gibi hücreli yapıya sahip malzemeler doğada yaygın olarak bulunur. Doğal hücreli malzemeler genellikle mekanik açıdan verimlidir. Örneğin, ahşabın petek benzeri mikroyapısı, eğilme ve burkulmaya karşı olağanüstü bir performans gösterir; kemik ve boynuz, mühendislik seramiklerine kıyasla daha yüksek tokluğa sahiptir; bambu sapları, modern mühendislik standartlarında bile dikkate değer bir narinlik oranına sahiptir [1,2].

Hücreli katılar alanına önemli katkılar sağlayan Michael F. Ashby, “Modern insan büyük yük taşıyan yapılar inşa ettiğinde yoğun katılar kullanır; çelik, beton, cam. Doğa aynısını yaptığında, genellikle hücreli katılar kullanır; ahşap, kemik, mercan. Bunun iyi nedenleri olmalıdır.” der. Bu doğal malzemelerin yüksek kırılma tokluğu ve düşük ağırlık gibi ayırt edici özellikleri, katının kendisinden ziyade hücrelerin düzeni ve geometrisi, yani malzemenin mikro-mimarisinden kaynaklıdır.

Hücreli malzemeler, Gibson ve Ashby tarafından “hücrelerin kenar ve yüzeyleri, birbirlerine bağlı bir katı çubuk veya plaka ağından oluşan malzemeler” olarak tanımlanmıştır [3]. Doğada yaygın olarak bulunan hücreli katıların örnekleri Şekil 1.1'de gösterilmektedir.

Hücreli katılar, çeşitli uygulamalar için fırsatlar sağlayan yoğun katıların ulaşamayacağı mekanik, termal ve akustik özelliklerin kombinasyonlarına sahiptir [10]. Doğal malzemelerin bu mikro-mimar yapılarından esinlenerek, farklı özelliklere sahip hücresel katıların üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi son yıllarda birçok bilim insanı ve mühendisler için ilgi çekici bir konu haline gelmiştir.

Latis malzemeler, birçok ince latis elemanı (çubuklar veya kirişler) içeren bir tür hücresel katıdır ve tekrarlayan bir yapı ile karakterize edilir. Bir latis malzemesindeki her hücre tamamen aynı şekil ve boyutlara sahiptir ve destek elemanları (*İng.* struts) olarak da adlandırılan ince elemanlar latis noktalarında buluşur. Bu, diğer hücresel katıların aksinedir. Doğal hücreli katılar ve köpükler, farklı boyutlara ve rastgele bir mikro-mimariye sahip elemanlar içerir [11].



Şekil 1.1 : Hüresel katıların doğada kullanım örnekleri: (a) insan femur kemiği kesit görüntüsü [4], (b) tukan kuş gagası ve kesiti görüntüsü [5], (c) bitki sistemi mikroyapısı ve bal peteği görüntüsü [6], (d) nilüfer çiçeği ve damarlı yapı görüntüsü [7], (e) kızıl geyik boynuzu ve enine kesit görüntüsü [8], (f) gergedan böceği ve dış kabuğunun iç yapısının görüntüsü [9].

Latis malzeme terimi, latisin bir malzeme gibi davrandığını, yani elastik modül ve akma dayanımı gibi makroskobik özelliklere sahip homojen bir süreklilik olarak ele alınabileceğini vurgulamak için kullanılır [12]. Bu, latisin global boyutlarının, birim hücrenin boyutlarından çok daha büyük olduğunda geçerlidir. Bu gereksinimlere uymayan latisler bir yapı gibi davranır.

Yoğun katılara kıyasla, hafiflik, yüksek mukavemet ve yüksek enerji emme kapasitesi gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı latis malzemeler, makine, inşaat, havacılık, uzay, otomotiv, biyomedikal ve kişisel koruyucu ekipmanlar dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde gelişmiş yapısal bileşenler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [13]. Bu uygulamalara örnek olarak, sensör cihazları [14]; enerji soğurucular [15-20]; termal koruyucular [21,22]; titreşim izolasyon sistemleri

[23,24]; yüksek mukavemete sahip yapılar [25-28]; düşük ısı genleşmeye sahip yapılar [29-31]; biyomateryaller [32-34] sayılabilir.

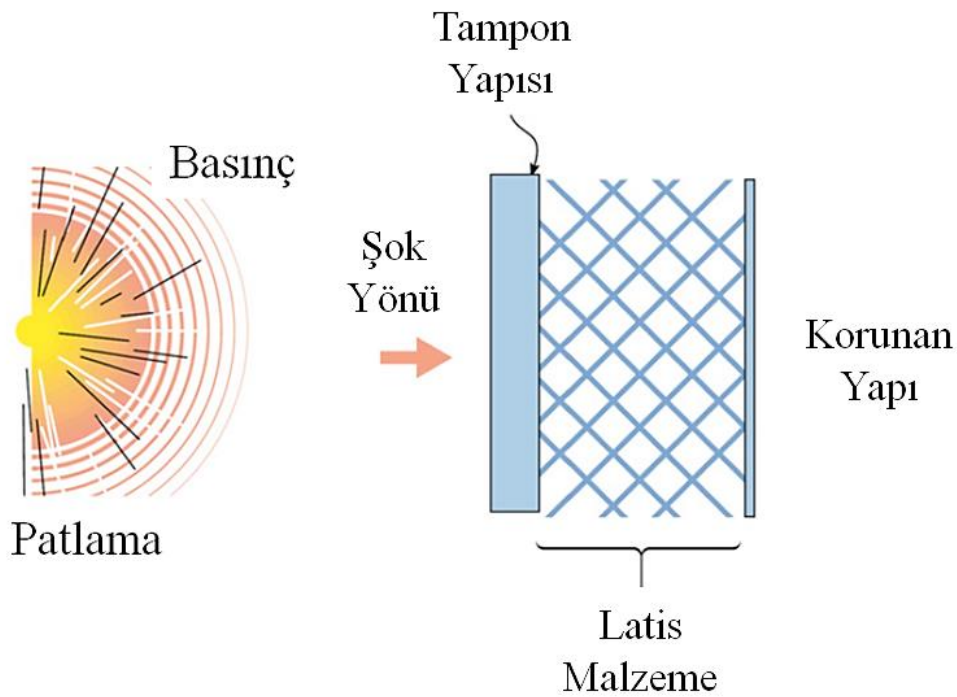
Latis malzemelerin mekanik özellikleri üç faktör tarafından belirlenir: latisin hücre duvarı malzemesi, latisin bağıl yoğunluğu ve latisin birim hücre geometrisi [3]. İlk iki faktörün malzeme özellikleri üzerindeki etkileri, makroskopik mekanik özellikleri kontrol etmek için temel tasarım özgürlüğü sunan latisin birim hücre geometrisine kıyasla sınırlıdır.

Yüksek enerji emme kapasitesi, diğer özelliklerinin yanı sıra, latis malzemeleri rekabetçi bir mühendislik malzemesi haline getiren önemli bir yapısal özelliktir. Eklemeli imalat teknolojisinin ilerlemesi, farklı birim hücre geometrilerine sahip latis malzemelerin üretilebilir hale gelmesini sağlamıştır. Bu nedenle, son zamanlarda yüksek enerji emme kapasitesi sağlamak amacıyla yeni latis malzemelerin tasarlanması ve incelenmesi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bununla birlikte, bu tür malzemeler üzerine yapılan çalışmalar genellikle Altıgen ve diğer geleneksel latis malzemelerle sınırlı kalmıştır [35].

Bu tezin amacı, üstün mekanik özelliklere sahip, düzlem içi izotropik iki boyutlu, beş farklı latis malzemenin düzlem içi enerji emme ve ezilme davranışlarını sonlu elemanlar analizleri ile incelemek ve sonuçları literatürde sıklıkla kullanılan, yüksek enerji emme kapasitesine sahip Altıgen ve Üçgen-Üçgen latislere ait sonuçlar ile karşılaştırmaktır. Bu hedef doğrultusunda ilk olarak, latis malzemelerin ezilme davranışlarını simule edebilecek bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Öncelikle, literatürde latis malzemelerin enerji emme ve ezilme davranışlarını inceleyen araştırmacıların SE çalışmaları tekrarlanmış ve tez kapsamında tekrar edilen sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Tutarlı sonuçlar veren sonlu elemanlar modeli ile çalışmalara devam edilmiştir. Geliştirilen SE modeli kullanılarak, farklı deformasyon hızları altında latis malzemelerin ezilme davranışları incelenmiştir. Farklı ezilme hızlarında oluşan deformasyon davranışları incelenerek, üç farklı deformasyon modu tanımlanmıştır: sanki statik, geçiş ve dinamik. Sonuçlar, enerji emme ve ezilme davranışlarının incelemesinde literatürde sıklıkla kullanılan beş farklı metrik kullanılarak karşılaştırılmıştır: yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi, tepe çarpışma gerilmesi, ortalama plato gerilmesi, toplam enerji emilimi ve ideallik parametresi.

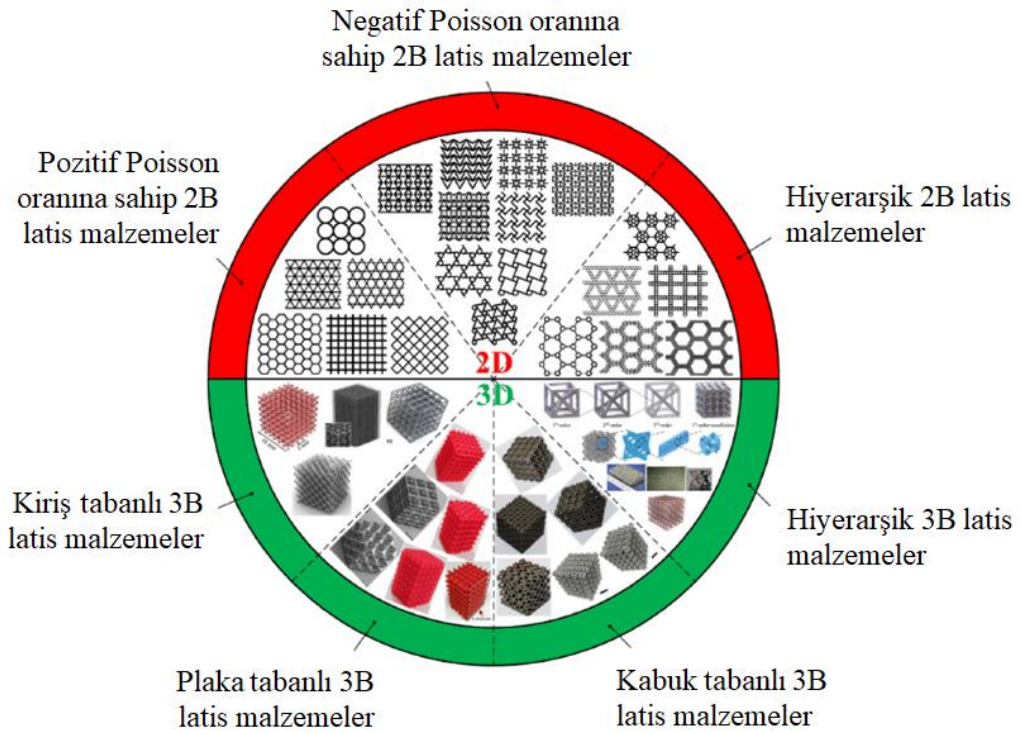
1.1 Literatür Araştırması

Latis malzemelerin enerji emme ezilme davranışlarının incelenmesi son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Enerji emme kapasitelerinin yoğun malzemelere kıyasla daha yüksek olması, latis malzemelerin enerji emici olarak kullanılmasını cazip kılmaktadır. Bu yüzden, otomobil tamponlarında kullanılan çarpışma kutuları içerisinde, ulaşım ve nakliye endüstrisinde, ürün ambalajlama endüstrisinde ve kişisel koruyucu ekipmanlarda latis malzemeler giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [36-38]. Şekil 1.2’de latis malzemelerin enerji emici olarak kullanıldığı bir örnek gösterilmiştir. Burada, patlama sonucu oluşan basınç etkisinden korunmak istenen yapının önüne bir latis malzeme yerleştirilmiştir. Latis malzeme şok etkisinden kaynaklı oluşan enerjiyi ne kadar fazla emebilirse, korunmak istenen yapıya aktarılan kuvvet ve dolayısıyla tahribat da o kadar az olacaktır. Bu durum araştırmacıları, korunmak istenen yapıların tahribatını en aza indirmek adına enerji emme kapasitesi yüksek latis malzemeler geliştirmeye teşvik etmektedir. Bu yüzden, hâlihazırda kullanılan enerji emici yapılara kıyasla daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip latis malzemeler tasarlayarak enerji ve ezilme davranışlarını araştırmak, aktif bir çalışma alanıdır.



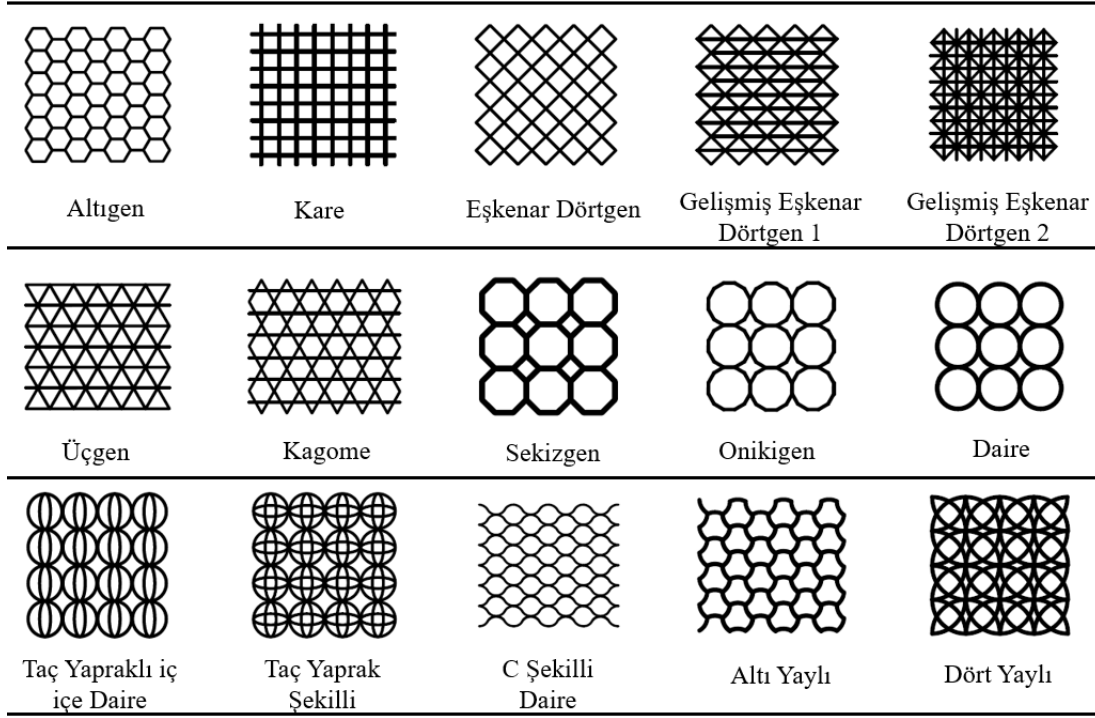
Şekil 1.2 : Enerji emici olarak kullanılan latis yapı ve patlama etkisinden korunmak istenen yapının şematik gösterimi [38].

Latis malzemeler, yapısal konfigürasyon özelliklerine bağlı olarak Şekil 1.3'te gösterildiği üzere 2B ve 3B olarak ayrılmaktadır. 2B latis malzemeler kendi içerisinde, pozitif Poisson oranına sahip, negatif Poisson oranına sahip ve hiyerarşik olmak üzere üç gruba ayrılır. 3B latis malzemeler ise kendi içerisinde, kiriş tabanlı, plaka tabanlı, kabuk tabanlı ve hiyerarşik 3B latis malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır [6]. Bir düzleme dik doğrultudaki kalınlıkları, bu düzlemindeki boyutlarına kıyasla oldukça küçük olan latisler literatürde “iki boyutlu (2B)” veya “düzlemsel” latis olarak tanımlanmaktadır. Tez kapsamında incelenecek latis malzemeler 2B olduğundan dolayı, literatür araştırmasında 2B latis malzemelerin enerji emme ve ezilme davranışları üzerine odaklanılmış ve aşağıda literatür özeti sunulmuştur.



Şekil 1.3 : Latis malzemelerin farklı konfigürasyonları [5].

Pozitif Poisson oranına sahip malzemeler, bir doğrultuda çekildiklerinde, bu doğrultuya dik diğer iki doğrultuda büzüşmekte, bir doğrultuda basıldıklarında ise, bu doğrultuya dik diğer iki doğrultuda genişlemektedir. Bu durum Negatif Poisson oranına sahip malzemelerde tam tersidir. Şekil 1.4'te, literatürde incelenen pozitif Poisson oranına sahip bazı 2B latis malzemeler gösterilmektedir. Bu malzemeler arasında arı kovana taklit edilerek oluşturulan ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Altıgen latis en eski ve en bilinenidir [5].



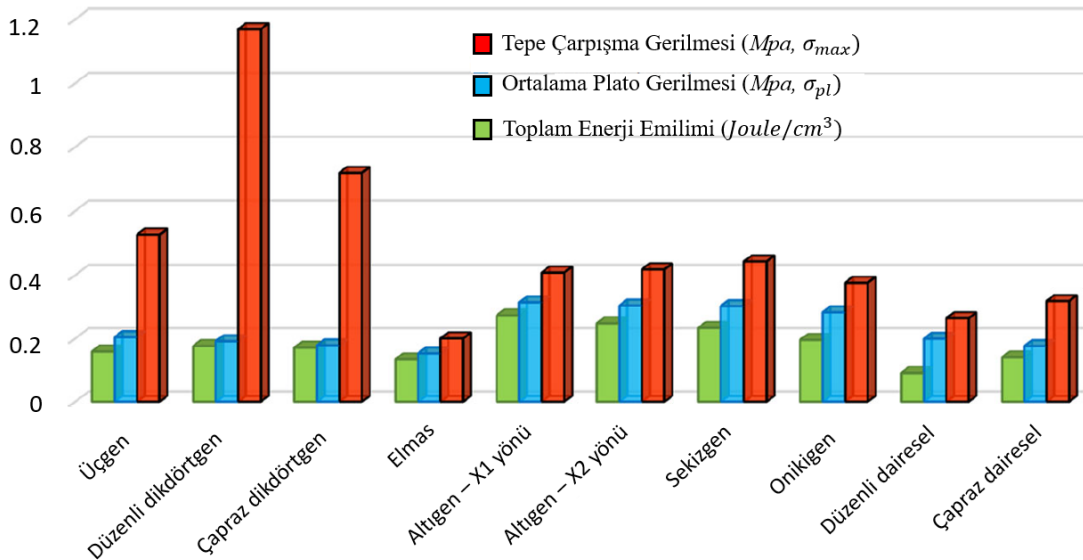
Şekil 1.4: Pozitif Poisson oranına sahip bazı 2B latis malzeme örnekleri [5].

Altıgen latisin enerji emme ve ezilme davranışının incelenmesi birçok deneysel [bkz. 39-41], teorik [bkz. 42-44] ve numerik [bkz. 45-48] çalışmaya konu olmuştur. Deneysel çalışmaların neredeyse tamamı, ezilmenin düşük hızlarda gerçekleştiği ve atalet etkilerinin ihmal edilebilir olduğu statik modda gerçekleştirilmiştir. Papka vd. Altıgen latisin sanki statik modda düzlem içi ezilme davranışını deneysel olarak incelemişler ve ezilme davranışının esas olarak hücre boyutundan etkilendiğini belirlemişlerdir [39]. Khan vd. Altıgen latisin düzlem içi ve düzlem dışı ezilme davranışını karşılaştırmışlar ve düzlem dışı ezilme mukavemetinin düzlem içi ezilmesinden daha yüksek olduğunu göstermişlerdir [40]. Becerra vd. farklı bağıl yoğunluktaki Altıgen latisler ile basma testi yapmışlar ve mekanik özellikler ile bağıl yoğunluk arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulmuşlardır [41]. Altıgen latisin düzlem içi ezilmesini inceleyen teorik araştırmalar ise genel olarak, ortalama plato gerilmesinin hesaplanabilmesine odaklanmıştır. Hu vd. hücre deformasyon mekanizmasına dayanarak, düşük hızlı ezilme altında Altıgen latisin düzlem içi ortalama plato gerilmesini hesaplamışlardır [42]. Hu vd. [43] ve Reid vd. [44], sırasıyla hücre ezilme sistemi ve tek boyutlu şok dalgası teorisine dayalı olarak dinamik deformasyon modunda Altıgen latisin düzlem içi ortalama plato gerilmesini teorik olarak ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, numerik çalışmalarda, Altıgen latisin ezilme davranışını ve enerji emme kapasitesini incelemek için doğrusal

olmayan sonlu elemanlar analizleri yapmışlardır. Ruan vd. Altıgen latisin birim hücre duvarı kalınlığı ve darbe hızının ortalama plato gerilmesi üzerindeki etkilerini SE analizleriyle araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar, hücre duvarı kalınlığının ve darbe hızının artmasıyla, ortalama plato gerilmesinin de arttığını göstermiştir [45]. Hu vd. hücre duvarı açısının, Altıgen latisin enerji emme kapasitesi ve ortalama plato gerilmesi üzerindeki etkilerini SE analizleriyle incelemişlerdir. Sonuçlar, latislerin bağıl yoğunluklarının eşit tutulması durumunda, yaklaşık 45° hücre duvarı açısına sahip Altıgen latisin düzlem içi ezilme altında en yüksek ortalama plato gerilmesi ve enerji emme kapasitesini sağladığını göstermiştir [46]. Ivañez vd. çalışmalarında Altıgen latisin ezilme ve enerji emme davranışını SE analizleri kullanarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, hücre duvarı kalınlığının ve malzemesinin akma gerilmesini artırmanın daha yüksek ezilme direnci sağladığını ve böylece emilen enerjinin arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, sonuçlara göre hücre boyutunun artması, emilen enerjiyi azaltmıştır [47]. Li vd. Altıgen latisin ezilme yönünün ortalama plato gerilmesi üzerindeki etkilerini incelemek için hem sanki statik hem de dinamik modda SE analizleri gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, ezilme yönünün ortalama plato gerilmesini etkilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, ezilme hızı kritik bir değere ulaştığında veya bu değeri aştığında, ortalama plato gerilmesinin ezilme yönünden bağımsız bir değer aldığı tespit edilmiştir [48].

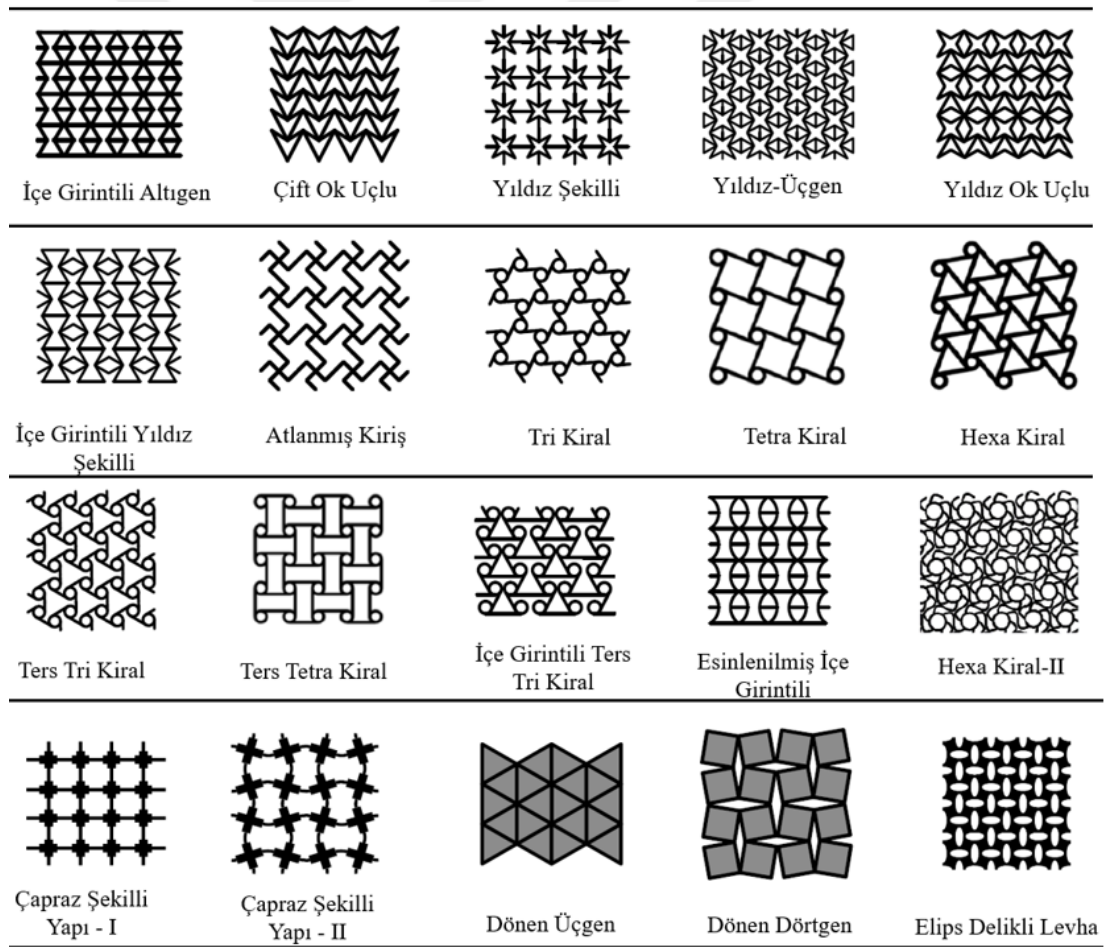
Altıgen olmayan pozitif Poisson oranına sahip latislerin birim hücre şekilleri genel olarak üçgen, dikdörtgen, elmas, sekizgen, onikigen, daire ve dörtgen şeklindedir. Pehlivan ve Baykasoğlu, Kare, Dairesel ve Altıgen latislerin düzlem dışı enerji emme özelliklerini sanki statik modda basma testi ile incelemişlerdir. Hücre duvarı kalınlığının, latisin enerji emme kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve Altıgen latislerin Kare ve Dairesel latislere göre daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [49]. Chung ve Waas, Dairesel latis yapıların düzlem içi sanki statik ve dinamik modda ezilme davranışlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, latisin dinamik yüklemde daha yüksek ortalama plato gerilmesi sergilediğini göstermiştir [50]. Lin vd. [51], Gotkhindi ve Simha [52] Dairesel latislerin, Hedayati vd. [53] ise Sekizgen latis malzemelerin düzlem içi yüklem altında elastik modül, Poisson oranı ve plastik akma mukavemetinin teorik çözümlerini çıkarmışlar ve SE analizleri ile doğrulamışlardır. Zhang vd. Dört Yaylı adında yeni bir latis tasarlamış ve düzlem içi ezilme davranışını sanki statik, geçiş ve

dinamik modda SE çalışmalarıyla incelemişlerdir. Ezilme davranışlarına göre 3 farklı deformasyon modu bulmuşlar ve enerji emme kapasitelerini karşılaştırmışlardır. Dairesel latise kıyasla, Dört Yaylı latisin enerji emme kapasitesinin sırasıyla sanki statik, geçiş ve dinamik modlar için %56, %40 ve %6 daha yüksek olduğunu göstermişlerdir [54]. Yang vd. Taç Yaprak Şekilli latisin düzlem içi sanki statik ve dinamik ezilme davranışını incelemek için doğrusal olmayan SE analizleri yapmıştır. Dairesel latise kıyasla, Taç Yaprak Şekilli latisin birim kütlesi başına enerji emiliminin sırasıyla sanki statik ve dinamik modda %71 ve %84 daha yüksek olduğunu bulmuşlardır [55]. Wang vd. SE analizleriyle Kare, Üçgen, Dairesel, Altıgen ve Kagome latislerin düşük hızlarda düzlem içi enerji emme kapasitelerini ve tepe çarpışma gerilme değerlerini karşılaştırmıştır. Kagome latis yapının birim kütle başına en yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu; fakat Altıgen latise göre daha yüksek tepe çarpışma gerilmesi ürettiğini göstermiştir [56]. Habib vd. SE analizleriyle Üçgen, Kare, Elmas, Altıgen, Sekizgen, Onikigen ve Dairesel latis yapıların sanki statik modda düzlem içi enerji emme ve ezilme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında tüm latis yapıların, tepe çarpışma gerilmeleri, ortalama plato gerilmeleri ve enerji emme kapasitelerini karşılaştırılmıştır. Şekil 1.5'te gösterildiği gibi sonuçlar, Altıgen latis yapının düşük hızlarda en yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir [35].



Şekil 1.5 : Habib vd. tarafından yapılan çalışmada düşük hızlarda farklı pozitif Poisson oranına sahip latis yapıların düzlem içi enerji emme kapasiteleri ve ezilme davranışlarının karşılaştırılma grafiği [35].

Son yıllarda, bazı yeni 2B latis yapıların negatif Poisson oranına sahip olduğu bulunmuştur [5]. Negatif Poisson oranına sahip malzemeler, bir doğrultuda çekildiklerinde, bu doğrultuya dik diğer iki doğrultuda genişlemekte, bir doğrultuda basıldıklarında ise, bu doğrultuya dik diğer iki doğrultuda büzümektedir. Öksetik veya metamalzeme olarak da adlandırılan bu malzemeler, mükemmel girinti direnci [57], yüksek kesme sertliği [58], olağanüstü kırılma tokluğu [59] ve yüksek enerji emme yetenekleri gibi geleneksel malzemelere göre bir dizi üstün özellik gösterir [60]. Üstün özellikleri nedeniyle, negatif Poisson oranına sahip 2B latis malzemelerin enerji emme ve ezilme davranışlarının incelemesi ve koyurucu yapı uygulamalarında kullanımının araştırılması son yıllarda birçok bilim insanı ve mühendisler için ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Şekil 1.6'da literatürde yer alan bazı 2B öksetik latis malzemeler gösterilmektedir.



Şekil 1.6: Negatif Poisson oranına sahip bazı 2B latis malzeme örnekleri [5].

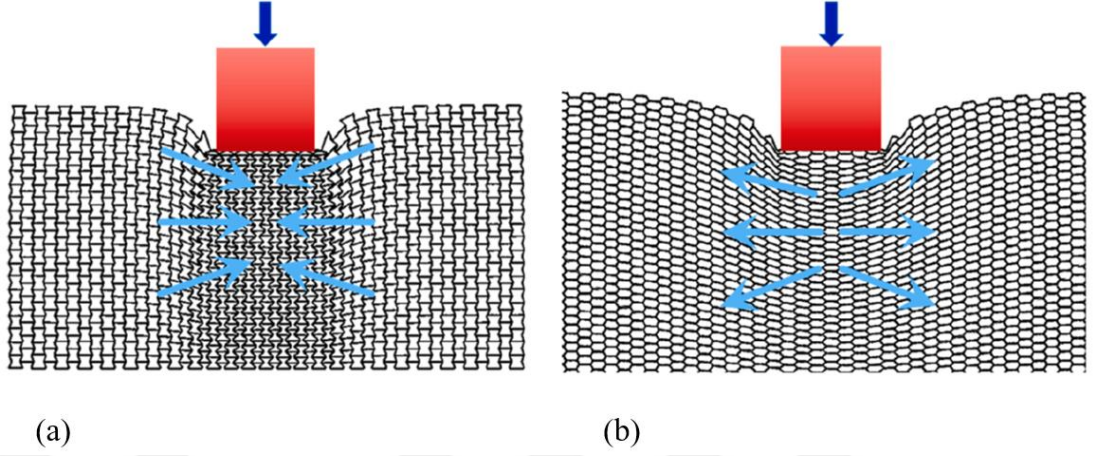
Negatif Poisson oranının, 2B latis malzemelerin enerji emme ve ezilme davranışları üzerindeki etkilerini araştırmak için son yıllarda deneysel [bkz. 61,62], teorik [bkz. 63,64] ve sayısal olarak [bkz. 65-74] kapsamlı çalışmalar yapılmıştır.

Lakes vd. aynı bağıl yoğunluğa sahip latis malzemeler için yaptıkları deneysel çalışmalarla, genel olarak öksetik latislerin geleneksel latislere kıyasla daha yüksek akma mukavemetine, daha yüksek enerji emme kapasitesine ve daha düşük sertliğe sahip olduğunu göstermişlerdir [61]. Allen vd. negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin düşük hızlarda darbe tepkisi üzerindeki etkilerini deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Öksetik latislerin, pozitif Poisson oranına sahip latislere kıyasla, tepe çarpışma gerilmesini 6 kat azalttığını göstermişlerdir [62].

Hu vd. teorik çalışmalarla öksetik latis malzemelerin, pozitif Poisson oranına sahip olanlardan her zaman üstün girinti direncine sahip olmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yaptıkları SE analizleriyle, İçe Girintili Altıgen latis için hücre duvarı arasındaki açının negatif Poisson oranının belirlenmesinde temel etken olduğunu ortaya koymuşlardır [63]. Photiou vd. teorik ve numerik çalışmaları birleştirerek İçe Girintili Altıgen latislerde Poisson oranının ve latis hücre duvarları arasındaki açının, öksetik malzemelerde girinti davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, hücre duvarı açısının artmasının latisin ezilme direncini artırdığını göstermektedir [64].

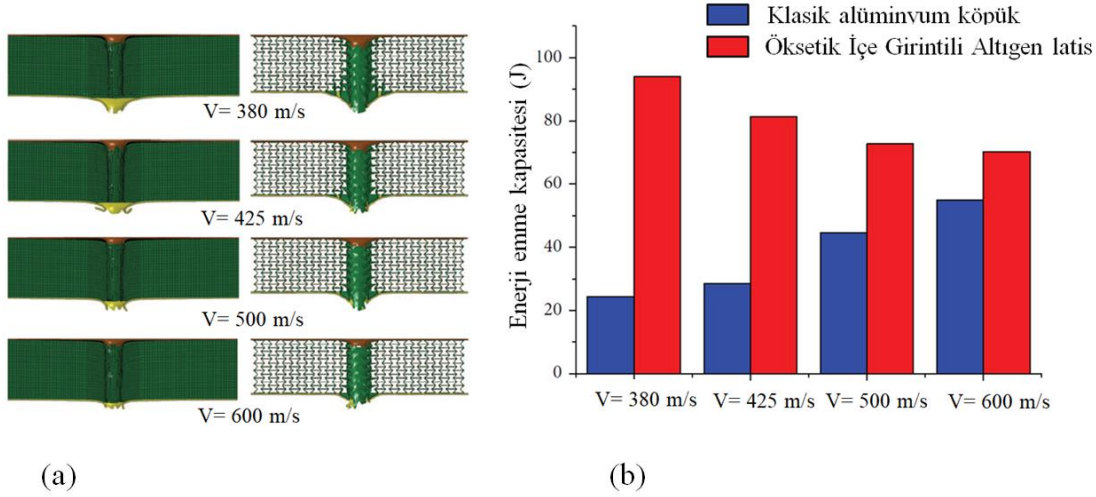
Wei vd. çalışmalarında, Yıldız Şekilli latislerin, yatay ve dikey bağlarının üçgen yapılarla değiştirildiği Yıldız-Üçgen adı verilen yeni bir öksetik latis malzeme önermiştir. Sonuçlara göre, Yıldız-Üçgen latisin enerji emme kapasitesinin Yıldız Şekilli latis göre, düşük hızlı ezilme altında %110, orta hızlı ezilme altında %95 daha yüksek olduğunu SE analizleriyle göstermişlerdir [65]. Wang vd. Yıldız Şekilli, Çift Ok Uçlu ve Yıldız Ok Uçlu latislerin düzlem içi ezilme davranışlarını sanki statik, geçiş ve dinamik mod için SE analizleriyle incelemişlerdir. Ezilme hızlarına bağlı olarak latisler için bir deformasyon haritası oluşturarak, aynı bağıl yoğunlukta farklı ezilme hızlarında Yıldız Şekilli latisin, Yıldız Ok Uçlu latis ile kıyaslandığında daha az enerji emdiğini ve bu durumun düşük hızlarda daha belirgin olduğunu göstermişlerdir [66]. Li vd. çalışmalarında negatif Poisson oranına sahip İçe Girintili Altıgen latis ile pozitif Poisson oranına sahip Altıgen latisin girinti dirençlerini karşılaştırmıştır. Şekil 1.7’de gösterildiği gibi sanki statik modda bölgesel yükleme davranışlarını SE analizleriyle incelemişlerdir. Sonuçlar, negatif Poisson oranına

sahip İçe Girintili Altıgen latisin, Altıgen latise kıyasla daha yüksek girinti direnci sağladığını göstermiştir [67]. Bu ezilme davranışı, malzemenin yerel olarak darbe alan bölgede negatif Poisson oranının etkisiyle büzüşmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1.7 : Öksetik ve pozitif Poisson oranına sahip latis malzemelerin girinti dirençlerinin karşılaştırılması için yapılan SE analizi görüntüsü: (a) İçe Girintili Altıgen öksetik latis, (b) pozitif Poisson oranına sahip Altıgen latis [67].

Qi vd. İçe Girintili Altıgen latislerin ağırlık düşürme ve yakın patlama altında ezilme davranışını değerlendirmek amacıyla SE analizleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, öksetik İçe Girintili Altıgen latis malzemenin koruyucu tarafa aynı deformasyon seviyesinde, Dikdörtgen ve Altıgen latislere kıyasla olağanüstü bir kuvvet azaltma ve patlama direnci sunduğunu göstermiştir [68]. Yang vd. Altıgen, İçe Girintili Altıgen ve Çift Ok Uçlu latislerin 0.01 saniye süreyle düzlem içi bölgesel darbe altında ezilme davranışlarını SE analizleri ile incelemişlerdir. Negatif Poisson oranına sahip İçe Girintili Altıgen ve Çift Ok Uçlu latis malzemelerin korunmuş bölgeye gelen kuvveti azalttığını göstermişlerdir [69]. Öksetik latis malzemelerin balistik çarpma direnci ile ilgili başka bir çalışma Yang vd. tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında klasik alüminyum köpükler ile İçe Girintili Altıgen latislerin balistik çarpışma sırasında enerji emme kapasitelerini SE analizleri ile incelemişlerdir. Sonuçlar, negatif Poisson oranı sayesinde balistik çarpışmadan etkilenen alandaki malzeme konsantrasyonunun artmasıyla, İçe Girintili Altıgen latislerin, klasik alüminyum köpüklere göre üstün ezilme davranışı sergilediğini göstermişlerdir. Şekil 1.8'de SE analiz görüntüleri ve enerji emme kapasitelerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Dört çarpışma hızında da öksetik latis malzemenin enerji emme kapasitesi klasik alüminyum köpüklere göre daha yüksektir [70].



Şekil 1.8 : Yang vd. tarafından klasik alüminyum köpük ile öksetik İçe Girintili Latis malzemenin balistik yük altında enerji emme ve ezilme davranışlarının karşılaştırma görüntüsü: (a) SE analiz görüntüleri, (b) farklı hızlarda enerji emme kapasitesi grafiği [70].

Poisson oranının çarpışma dayanımını nasıl etkileyeceğini inceleyen Hou vd., yüksek tepe çarpışma kuvveti oluşturması nedeniyle mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerde aşırı Poisson oranlarından kaçınılması gerektiğini belirtmişlerdir [71]. Bu, öksetik latis malzemelerin düşük tepe çarpışma gerilmesi istenen uygulamalarda kullanılmasını cazip hale getirmektedir. Zhou vd. İçe Girintili Altıgen latisler üzerine yaptıkları çalışmada, öksetik latislerin hücre duvarı birleşim yerlerinin menteşe görevi görmesiyle kuvveti dağıttığını ve düzlem içi ezilmede ortalama plato gerilmesini artırırken ilk tepe gerilme değerini azalttığını belirtmişlerdir. Bu da düşük tepe kuvveti ve yüksek enerji emme kapasitesine ihtiyaç duyan uygulamalar için önemli bir özelliktir [72].

Chen vd. yaptıkları çalışmayla, öksetik malzemelerin üstün ezilme davranışını belirli bir kritik ezilme hızına kadar seçilebileceğini belirtmiştir. Yaptıkları çalışmada Çift Ok Uçlu latis malzemelerin farklı ezilme hızlarında deformasyon davranışını incelemişler ve üstün ezilme davranışının belirli bir hızdan sonra kaybolduğunu göstermişlerdir. Ek olarak dinamik modda ezilme sırasında öksetik latis malzemenin pozitif Poisson oranına sahip latis malzemeler gibi katman katman çökeceği ve “I” şeklinde deformasyon davranışı sergileyeceğini SE analizleri ile göstermişlerdir [73]. Benzer bir çalışma Gao vd. tarafından Çift Ok Uçlu latis malzemeler üzerinde gösterilmiştir. Çalışmalarında, Çift Ok Uçlu latis malzemelerin farklı hızlarda ezilme davranışını SE analizleri ile incelemişler ve atalet etkisinin artmasıyla birlikte

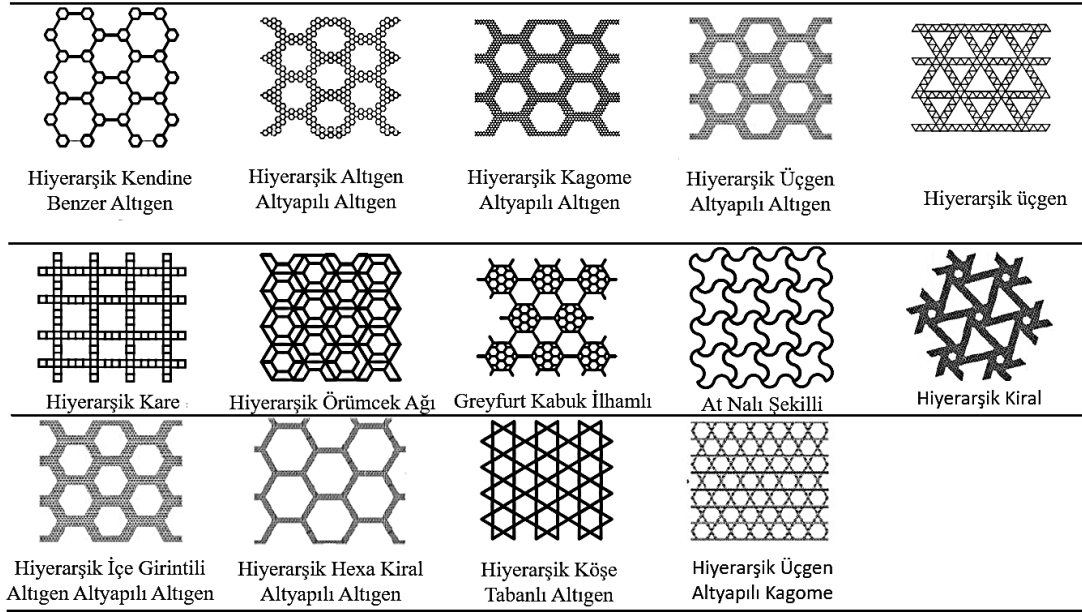
dinamik modda büzüşen ezilme davranışının kaybolduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak ezilme hızının ve latisin bağıl yoğunluğunun artmasının ezilme direncini artırdığını analitik çözümler ile göstermişler ve sonuçları SE analizleri ile doğrulamışlardır.

Negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin üstün ezilme davranışı ve pozitif Poisson oranına sahip latis malzemelere göre düşük tepe çarpışma gerilme değeri sağlaması, bu alanda yapılan araştırmaların günden güne artmasını sağlamaktadır. Bu çalışmalara rağmen, Poisson oranının çarpışma dayanıklılığı üzerindeki nicel etkisi ve yüksek Poisson oranlarından düşük Poisson oranlarına kadar olan bir aralıkta en uygun değer ne olduğu hala belirsizliğini korumaktadır [71].

Doğal olarak biyolojik materyallerde birçok hiyerarşik yapılar bulunur. Karmaşık yapısal hiyerarşinin, biyomalzemelerin yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve yüksek enerji emme verimliliği gibi mükemmel mekanik özellikler elde etmesi için temel faktör olduğu kanıtlanmıştır [75]. Bu doğal biyomalzemelerden ilham alınan hiyerarşi özelliği, son zamanlarda latis malzemelere dahil edilmiştir [76]. Şekil 1.9'da literatürde yer alan bazı 2B hiyerarşik latis malzemeler gösterilmektedir [5]. Çok sayıda çalışma, yapısal hiyerarşinin latis malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde geliştirebileceğini ve farklı kombinasyonlardaki özellikleri sağlayabileceğini göstermiştir [75]. Hiyerarşik latis yapılar, negatif Poisson oranına sahip olabileceği gibi pozitif Poisson oranına da sahip olabilirler.

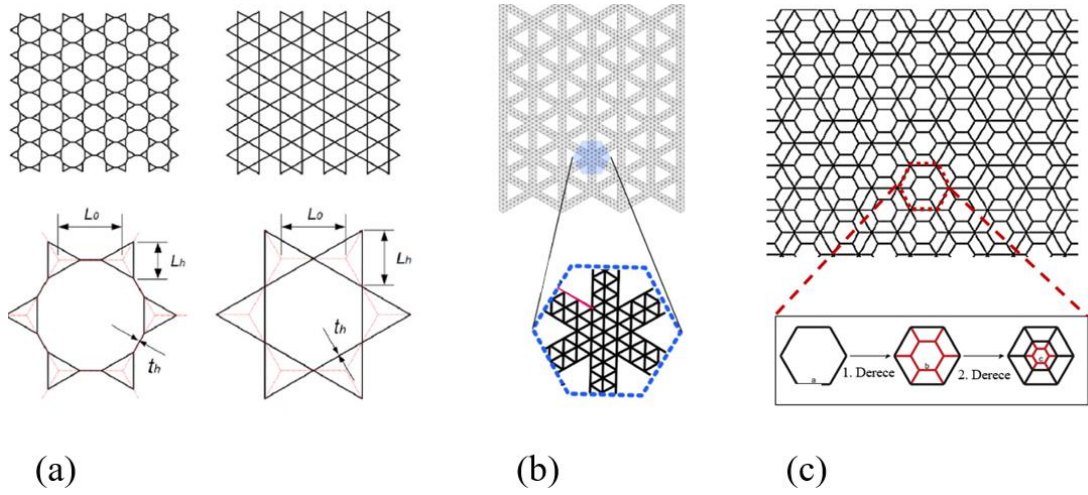
Genel olarak, hiyerarşik latis malzemeler, birim hücreleri küçük ölçekli konfigürasyonlarla dolu olan büyük ölçekli bir konfigürasyondan oluşur. Büyük ölçekli ve küçük ölçekli konfigürasyonlar tutarlıysa, yani birbirine benzer bir geometriye sahiplerse, bu latis malzemelere kendine benzer hiyerarşik denir; aksi takdirde, kendi kendine benzer olmayan hiyerarşik yapılardır [76].

Hiyerarşiyi oluşturan birim hücrelerdeki küçük ölçekli konfigürasyonların farklı konumlarına göre, genel olarak hiyerarşik latisler, Şekil 1.10'da gösterildiği gibi, köşe tabanlı hiyerarşi, hücre duvarı tabanlı hiyerarşi ve fraktal tabanlı hiyerarşiyi içerirler [75].



Şekil 1.9 : Hiyerarşik 2B latis yapılara ait örnekler [5].

Köşe tabanlı hiyerarşi, büyük ölçekli konfigürasyonun köşelerindeki malzememenin, küçük ölçekli konfigürasyonlarla değiştirildiği anlamına gelir. Örnek bir çalışma Zhang vd. tarafından yapılmıştır. Şekil 1.10 (a)'da gösterildiği gibi Altıgen latis yapının her bir köşesine üçgen konfigürasyonu eklemişler ve SE analizleriyle düzlem içi ve düzlem dışı yönde ezilme davranışlarını incelemişlerdir. Sonuçlar, düzlem içi ezilmede ortalama plato gerilmesinin ve birim kütle başına enerji emme kapasitesinin sırasıyla %127 ve %109 arttığını, düzlem dışı ezilmede sırasıyla %30 ve %34 arttığını göstermektedir [77]. Bu, hiyerarşik düzenin latis yapıların enerji emme kapasitesini artırdığını açık bir şekilde göstermektedir. Diğer bir çalışma He vd. tarafından yapılmıştır. Klasik Altıgen latis yapının hiyerarşi parametrelerini kademeli olarak artırarak farklı hiyerarşik seviyelerde köşe tabanlı kendine benzer Hiyerarşik Altıgen latis yapıları oluşturmuş ve bunların dinamik ezilme davranışını incelemek için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Sonuçlar, hiyerarşik latislerin geleneksel Altıgen latisten daha üstün enerji emme özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Ek olarak latis malzemenin hiyerarşik parametresini makul bir şekilde artırmanın, “I” harfine benzer lokalize deformasyon bandının oluşturulmasına yardımcı olduğunu ve bunun da, daha büyük plato gerilimi ve daha yüksek enerji emme kapasitesi ile sonuçlandığını göstermektedir. Çalışmalarının sonunda, çarpışma hızlarına göre optimum hiyerarşi seviyelerini belirlemişlerdir [78].



Şekil 1.10 : Hiyerarşik latis malzeme örnekleri: (a) Köşe tabanlı hiyerarşik latis [77], (b) hücre duvarı tabanlı hiyerarşik latis [79], (c) fraktal tabanlı hiyerarşik latis [82].

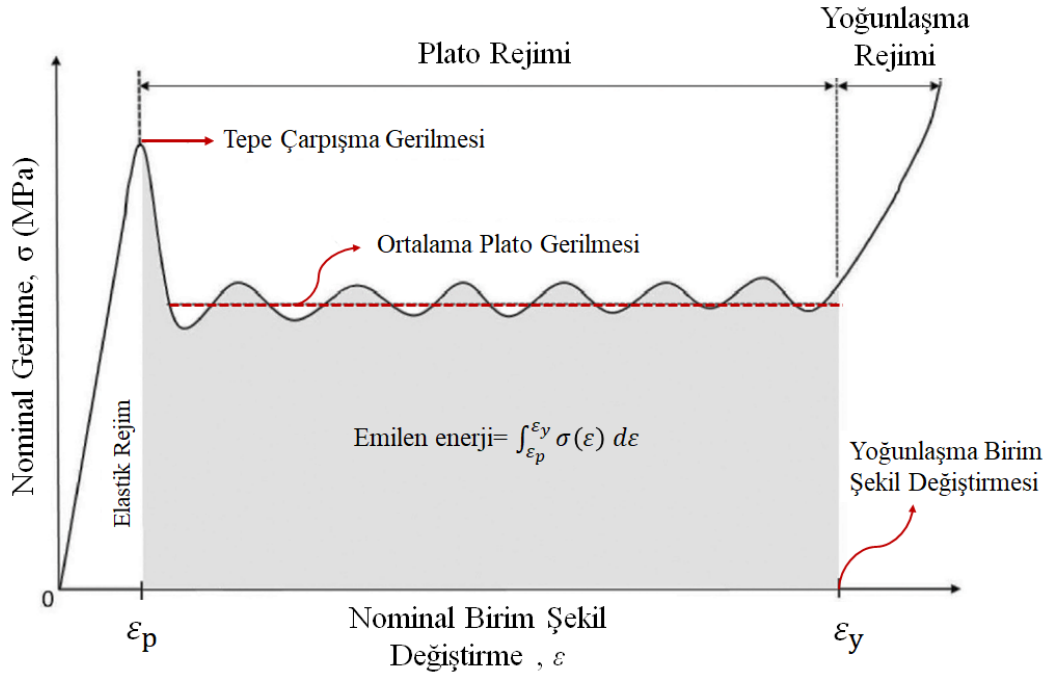
Hücre duvarı tabanlı hiyerarşi, büyük ölçekli bir konfigürasyonun mevcut hücre duvarını, küçük ölçekli bir konfigürasyonla değiştirilmesi anlamına gelmektedir. Örnek bir çalışma Zhang vd. tarafından yapılmıştır. Üçgen latis yapının orijinal hücre duvarı üzerinde bir dizi benzer alt üçgen konfigürasyonu düzenleyerek kurulan, Şekil 1.10 (b)'de gösterildiği gibi hücre duvarı tabanlı Hiyerarşik Üçgen latis yapı sunmuşlardır. Üçgen latis ile karşılaştırıldığında, hiyerarşik yapının, daha yüksek ortalama plato gerilmesi seviyesi ve daha yüksek enerji emme kapasitesi sergilediğini göstermişlerdir [79]. Hücre duvarı tabanlı hiyerarşinin incelenmesi için bir diğer çalışma Yin vd. tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında, Altıgen latis yapının hücre duvarlarını Altıgen latis yapı, Kagome latis yapı ve Üçgen latis yapı ile değiştirerek, Şekil 1.9'da gösterildiği üzere Hiyerarşik Altıgen Altyapılı, Hiyerarşik Kagome Altyapılı ve Hiyerarşik Üçgen Altyapılı Altıgen latisler tasarlamışlardır. Oluşturdukları bu üç hiyerarşik yapının düzlem içi ezilme davranışlarını SE analizleri ile incelemişler ve sonuçları hiyerarşik olmayan klasik Altıgen latis ile karşılaştırmışlardır. SE analiz sonuçları, Üçgen Hiyerarşik latislerin diğer iki hiyerarşik latislere kıyasla en iyi performansı sağladığını ve benzer yükleme koşulları altında Altıgen latis tarafından emilen enerjinin iki katından fazla enerji emme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir [80].

Negatif Poisson oranı ve hiyerarşinin latislere üstün mekanik özellikler kazandırması, araştırmacılar için bu iki özelliğin birleştirilerek yeni latis malzemelerinin tasarımını önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir. Bu konuda örnek bir çalışma Tan vd.

tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında negatif Poisson oranı ve hiyerarşik yapıların özelliklerini birleştirerek, İçe Girintili Altıgen latis yapıların hücre duvarlarını düzenli Altıgen latis yapı ve Eşkenar Üçgen latis yapı ile değiştirerek hücre duvarı tabanlı iki yeni hiyerarşik latis sunmuşlar ve sonuçları klasik İçe Giren Altıgen latis yapılar ile karşılaştırmışlardır. SE analiz sonuçları, hiyerarşinin latislerin ezilme davranışını önemli ölçüde etkilediğini ve ortalama plato gerilmesi üzerinde %300'e varan artış olduğunu göstermiştir. Ek olarak bu çalışmanın tüm bulguları, önerilen iki hiyerarşik latisin gelişmiş bir ezilme performansı sergilediğini ve tüm numuneler arasında en yüksek enerji emme kapasitesini sağladığını göstermektedir. SE analizleri sonucunda ek olarak, Üçgen Hücre Duvarı Tabanlı İçe Girintili Altıgen latisin en yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu göstermişlerdir [81].

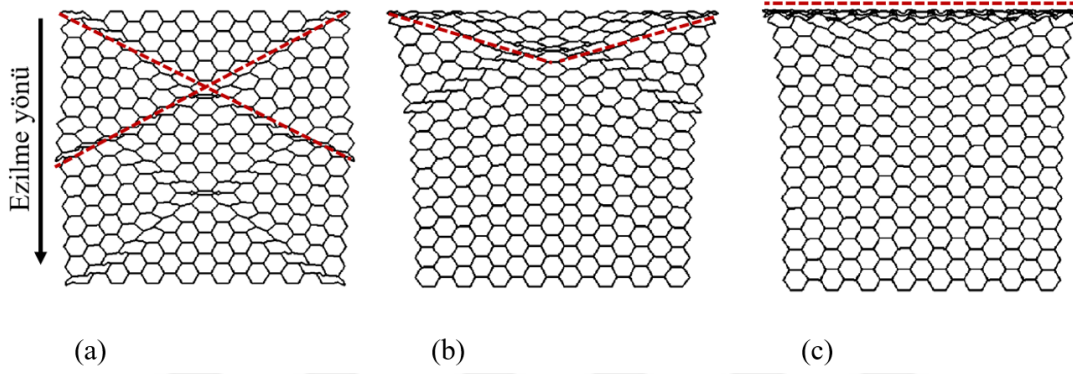
Fraktal tabanlı hiyerarşi, küçük ölçekli konfigürasyonların büyük ölçekli konfigürasyonların merkezine doldurulması anlamına gelir. Mousanezhad vd. örümcek ağı topolojisinden ilham alan Şekil 1.10 (c)'de gösterilen yeni bir fraktal tabanlı hiyerarşik latis malzemenin düzlem içi ezilme davranışını, ayrıntılı bir şekilde SE analizleri ve deneysel testlerle incelemişlerdir. Küçük deformasyon sonuçları, elastik modülü ve Poisson oranının, örümcek ağının hiyerarşik modelindeki boyut oranları tarafından kontrol edildiğini ve şekil değişikliğinin eğilme baskından (*Ing.* bending-dominated) uzama baskına (*Ing.* stretching-dominated) kadar değişebileceğini göstermektedir. Büyük deformasyonlarda sonuçlar, birinci ve ikinci dereceden hiyerarşik latislerin birim kütle başına enerji emme kapasitesinin Altıgen latisle kıyasla sırasıyla %62.1 ve %82.4 arttığını göstermektedir [82]. Fraktal tabanlı hiyerarşik latis malzemeler üzerine yapılan diğer bir çalışmada ise Tsang vd., kastan ilham alarak fraktal tabanlı Hiyerarşik Dairesel bir latis önermiştir. Sonuçlar, aynı birim şekil değiştirme değerinde, yapısal hiyerarşiye sahip numunelerin yüksek ezilme direnci ve yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Hiyerarşik seviyenin artması, latislere daha üstün performans kazandırabilmektedir. Çalışmada üçüncü derece hiyerarşik yapının, klasik Dairesel latislere göre ezilme direncinin %258'e kadar ve enerji emiliminin de %172'ye kadar arttığı gözlemlenmiştir [83].

Düzlem içi basma şeklinde darbe yüklemesine maruz kalan bir latis yapının nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 1.11’de gösterildiği gibi üç farklı rejim içerir: doğrusal elastik rejim, plato rejimi ve yoğunlaşma rejimidir. Doğrusal elastik bölgede latis yapının hücre duvarları elastik bir şekilde bükülür ve sıkışmaya başlar. Sonrasında latis hücre duvarlarındaki gerilme artar ve latisin hücre duvarı malzemesinin akma gerilmesine ulaşır. Bu noktadan itibaren, geri dönüşü olmayan biçimde, hücre duvarlarının plastik deformasyona uğradığı plato rejimi gözlemlenir. Hücre duvarlarının plastik burkulma ve çökmesinin hakim olduğu bu plato rejimi boyunca hücre duvarları arasındaki boşluklar azalır ve hücre duvarları birbiriyle temas eder hale gelir. Hücre içi boşlukların tümüyle kapanmasıyla hızlı bir gerilme artışı gözlenir. Bu aşama, yoğunlaşma rejimi olarak adlandırılır. Nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisinde enerji emme kapasitesiyle doğrudan ilişkili rejim plato rejimidir. Elastik rejim sonundaki nominal birim şekil değiştirme, plato rejiminin bitimindeki (ya da yoğunlaşma rejiminin başlangıcındaki) nominal birim şekil değiştirmeye kıyasla ihmal edilebilecek düzeyde düşük olduğu için ($\epsilon_p \ll \epsilon_y$), latis yapının emdiği toplam enerji, nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisinde plato rejiminin altında kalan alan olarak alınır. Yani, plato rejimi altında kalan alan ne kadar fazla ise, latis malzemesinin enerji emme kapasitesi de o kadar yüksektir.



Şekil 1.11 : Düzlem içi darbe yüklemesine maruz kalan bir latis malzemenin tipik nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi [84].

Latislerin ezilme davranışları, sanki statik, geçiş ve dinamik olarak adlandırılan farklı deformasyon modlarına göre değişmektedir. Düzlem içi darbe yüklemesine maruz kalan Altıgen bir latis yapının farklı deformasyon modlarında oluşan ezilme görüntüleri Şekil 1.12’de verilmiş, her bir moda karşılık gelen ezilme davranışı aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 1.12 : Düzlem içi darbe yüklemesine maruz kalan bir Altıgen latis yapının farklı deformasyon modlarında oluşan ezilme davranışları: (a) sanki statik mod, (b) geçiş modu, (c) dinamik mod [45].

Sanki statik mod, deformasyon hızının, atalet etkisinin göz ardı edilebileceği kadar düşük olduğu durumdur. Ezilme ilk olarak, kusurların yoğun olduğu en zayıf sıra veya hücre bandında gerçekleşir. Şekil değişikliğinin yoğun olduğu bölgeler, latis içerisinde “X” harfine benzer şekilde bir dağılım gösterir.

Geçiş modu, sanki statik moda kıyasla daha yüksek bir deformasyon hızında gerçekleşen, atalet etkisinin gözlenmeye başladığı deformasyon modudur. Latis yapıda, çarpma kenarına yakın olan birim hücreler daha fazla deformasyona uğrarken bu etki sabit kenara doğru azalarak ilerler. Şekil değişikliğinin yoğun olduğu bölgeler, latis içerisinde “V” harfine benzer şekilde bir dağılım gösterir.

Dinamik mod, diğer iki moda kıyasla atalet etkisinin çok daha önemli olduğu deformasyon modudur. Latis malzeme, düzlem içi darbe yüklemesine maruz kaldığı taraftan ezilmeye başlar. Yüklemeye dik doğrultuda, yan yana dizilmiş hücreler ezilerek latis içerisinde “I” harfine benzer bir şekil oluşturur. Yükleme ilerledikçe, yan yana dizilmiş hücreler sıra sıra ezilirler.

Darbe yüklemesine maruz kalan bir latis malzemenin enerji emme ve ezilme davranışını belirlemek için literatürde farklı enerji emme metrikleri kullanılmaktadır. En sık kullanılan metrikler arasında, yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi (YBŞD, *İng.* densification strain), tepe çarpışma gerilmesi (TÇG, *İng.* peak crushing stress), ortalama plato gerilmesi (OPG, *İng.* mean plateau stress), toplam enerji emilimi (TEE, *İng.* energy absorption) ve ideallik parametresi (İP, *İng.* ideality parameter) gelmektedir [bkz. örn. 35, 56, 85-108].

Latis malzemelerin düzlem içi ezilmesinde yoğunlaşma birim şekil değiştirme değeri (YBŞD), ezilme sırasında deformasyonun artarak hücreler arasındaki boşlukların kapanmasıyla hücre duvarlarının birbiriyle teması sonrası hızlı bir gerilme artışı başlangıcını temsil eder. Latisin enerji emme kapasitesinin belirlendiği plato rejiminin bitmesi, yoğunlaşma birim şekil değiştirme değeriyle belirlenmektedir. Genel olarak uygulama ve analizlerde plato rejiminde sabit bir gerilme değerinin elde edilememesi, yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerinin tam olarak saptanmasını zorlaştırmaktadır [109]. Literatürde yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerinin belirlenmesi için farklı metotlar kullanılmaktadır. İlk metot, ortalama plato gerilmesine ait eğri ile sıkıştırmanın ileri safhalarında meydana gelen ve hızla artan gerilme eğrisine ait teğetlerinin kesiştirilmesi ve bu kesişim noktasına tekabül eden birim şekil değiştirme değerinin kabul edilmesidir [110,111]. İkinci metot, gerilmenin hızla yükselmeden hemen önceki birim şekil değiştirme değerini kabul etmektir [112]. Üçüncü metot ise deformasyon verimliliği tanımlamaktır. Deformasyon verimliliği eğrisinin tepe noktasına ulaştığı birim şekil değiştirme değeri, yoğunlaşma birim şekil değiştirme olarak kabul edilir [92,113,114]. Tez kapsamında anlamlı sonuç veren ikinci metot kullanılarak yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir.

Şekil 1.11’de, tipik bir nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde, tepe çarpışma gerilmesi (TÇG, σ_{max}) gösterilmektedir. Bir enerji emici tasarlanırken, tepe çarpışma gerilmesinin ortalama plato gerilmesine yakın bir değer alması hedeflenir. Bu sayede, korunmak istenen yapıya iletilen kuvvet ve buna bağlı tahribat azalacaktır.

Ortalama plato gerilmesi (OPG), Şekil 1.11’de gösterildiği üzere, plato rejimi boyunca ortalama nominal gerilme olarak tanımlanır. Ortalama plato gerilmesi Denklem 1.1’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Şekil 1.11’de gösterilen ortalama

plato gerilmesi ne kadar yüksek olursa, plato rejiminde nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi altında kalan alan, yani latis malzemenin emdiği enerji o kadar fazla olacaktır. Bu sebeple, enerji emici yapıların yüksek ortalama plato gerilme değerlerine sahip olmaları hedeflenir.

$$OPG = \frac{1}{\epsilon_y - \epsilon_p} \int_{\epsilon_p}^{\epsilon_y} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1.1)$$

ϵ_y yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerini, ϵ_p ise plato rejimi başlangıcını ifade etmektedir. Düzlem içi ezilme sırasında ϵ_p çok küçüktür ve sıfır olarak kabul edilir [115,116]. Bu nedenle tez kapsamında yapılan hesaplamaların tamamında da ϵ_p sıfır olarak kabul edilmiştir.

Düzlem içi darbe yüklemesine maruz kalan bir latis malzemenin toplam enerji emme kapasitesi, Denklem 1.2’de tanımlandığı üzere, nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisinde plato rejimi altında kalan alana eşittir.

$$TEE = \int_{\epsilon_p}^{\epsilon_y} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1.2)$$

Miltz ve Ramon [95] tarafından tanımlanan İdeallik parametresi (İP), bir latis malzemenin basma yükü altında, yoğunlaşma rejimi başlangıcına kadar emdiği toplam enerjinin (TEE_{latis}), bu latis malzemeyle aynı yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi değerlerine sahip ideal bir malzemenin emdiği enerjinin (TEE_{ideal}) yüzde kaçına karşılık geldiğini ölçmektedir. İdeal malzemenin basma yükü altında gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, tepe çarpışma gerilmesine ulaştıktan sonra sabit kalmakta, yani plato bölgesinde gerilme değeri tepe çarpışma gerilmesine eşit olmaktadır. Dolayısıyla, Denklem 1.3’te gösterildiği gibi ideal malzemenin toplam enerji emme kapasitesi, yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi ile tepe çarpışma gerilmesinin çarpımına eşittir.

$$TEE_{ideal} = \sigma_{max} \epsilon_y \quad (1.3)$$

İdeallik parametresi (İP) Denklem 1.4’te verilmiştir,

$$İP = \frac{TEE_{latis}}{TEE_{ideal}} = \frac{\int_{\epsilon_p}^{\epsilon_y} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma_{max} \epsilon_y} \times 100, \quad (1.4)$$

ve ideal bir enerji emici için değeri, $İP=100\%$ ’dür [35].

2. SAYISAL ÇALIŞMALAR

2.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

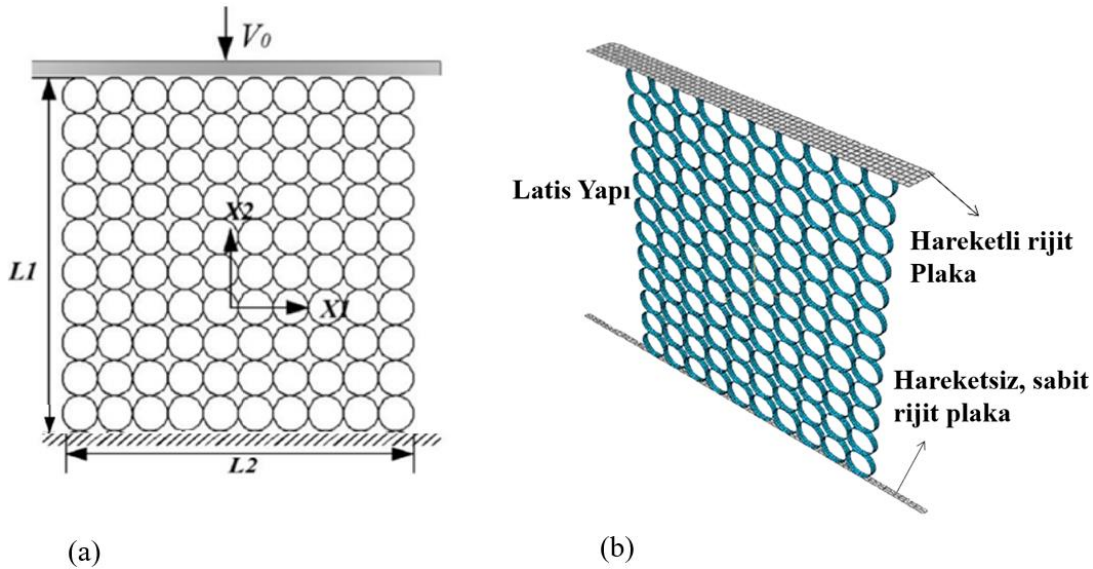
Tez kapsamında, farklı birim hücre konfigürasyonlarına sahip latis malzemelerin düzlem içi enerji emme ve ezilme davranışlarının incelenmesi SE analizleri ile gerçekleştirilecektir. Ancak, bu analizlere başlamadan önce, tez kapsamında geliştirilen SE yöntemlerinin tutarlılığını belirlemek amacıyla, literatürde latis yapıların enerji emme ve ezilme davranışlarını inceleyen araştırmacıların çalışmaları tekrarlanmıştır. Literatürde elde edilen sonuçlar ile tez kapsamında tekrarlanan SE analizlerinin sonuçları karşılaştırılarak, anlamlı sonuç veren SE modeli ile analizler yapılmıştır.

SE analizleri, ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS'un açık çözüm yöntemi (*İng.* explicit method) kullanılarak yapılmıştır. Tekrarlanan tüm analizlerde, ilgili makaledeki SE modeline ait parametreler kullanılmıştır. Yapılan tüm SE analizlerinde doğrusal olmayan geometri ve malzeme özellikleri hesaba katılmıştır (ABAQUS terminolojisinde NLGOEM=YES). SE analizlerinde, latis yapılar iki adet rijit plaka arasında basmaya maruz bırakılmıştır. Plakalardan birisi için basma yönünde hız sınır koşulu tanımlanmış, diğeri ise latisin basma yönünde hareketine izin vermeyecek biçimde sabitlemiştir. Latis hücre duvarlarının kendileriyle ve plakalarla temas eden yüzeylerin penetrasyonunu önlemek için temas algoritmaları tanımlanmıştır. ABAQUS, iki boyutlu düzlem şekil değiştirme elemanları için temas tanımlamasına izin vermemektedir. Bu sebeple, SE analizlerinde kum saati kontrollü indirgenmiş integrasyona sahip (*İng.* reduced integration with hourglass control) dört düğüm noktalı kabuk elemanlar (ABAQUS eleman kütüphanesinin S4R isimli elemanı) kullanılmıştır. Kabuk elemanlarla modellenen latis yapıların düzlem dışı burkulmasını önlemek için latisin düzlem dışı doğrultuda hareketi kısıtlanmıştır. Bu sınır koşulları, düzlem şekil değiştirme sınır koşullarına karşılık gelmektedir. Aşağıda, tez kapsamında SE analizleri tekrar edilen makaleler ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

İlk olarak Zhang vd. [54] tarafından düzenli dairesel hücrelerden oluşan bir latis yapının düzlem içi ezilme davranışının incelenmesi için yapılan çalışmada kullanılan

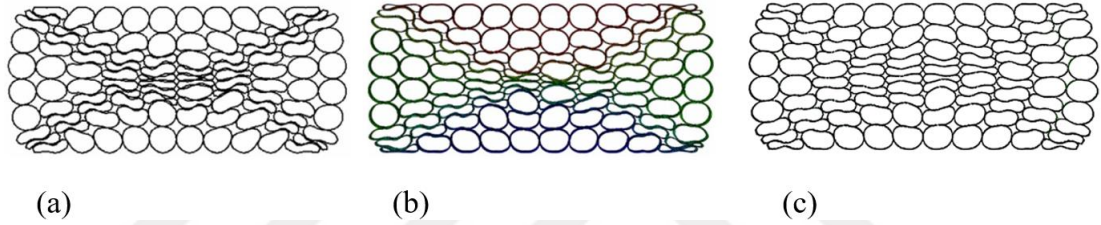
SE analizleri tez kapsamında tekrarlanmıştır. Zhang vd. [54] çalışmalarında, öncelikle kendi SE modellerinin tutarlığını, Wang vd. [56] tarafından yapılan çalışma içeriğindeki SE analizi sonuçları ile kıyaslamışlardır. Bu doğrultuda, çalışma içeriğinde düzenli dairesel hücrelerden oluşan bir latis yapının ezilme davranışını incelemek için kullanılan SE modelinin şematik görüntüsü Şekil 2.1 (a)'da gösterilmektedir.

Latis yapı x_1 ve x_2 doğrultularında onar hücreden meydana gelmektedir. Latis yapıyı oluşturan hücrelerin çapları 7.9 mm, hücre duvarının düzlem içi kalınlığı 0.3 mm ve düzlem dışı kalınlığı 2 mm olarak verilmiştir. Hücrelerin kendi kendine temasını simule etmek için genel temas (*İng.* general contact) algoritması benimsenirken, latis ve rijit plakalar arasındaki teması simule etmek için yüzeyden yüzeye temas (*İng.* surface to surface contact) algoritması benimsenmiştir. Latisle rijit plakalar arasındaki ve hücre duvarlarının kendi aralarındaki sürtünme katsayısı 0.3 alınmıştır. Latis yapının hücre duvarı malzemesi; elastik modülü 69 GPa, akma dayanımı 76 MPa, Poisson oranı 0.33 ve yoğunluğu 2700 kg/m³ olacak biçimde izotropik ve elastik-mükemmel plastik olarak modellenmiştir. Latis yapı sanki statik modda 2222.7 mm/s hızla rijit plaka tarafından ezilmiştir. Ağ yakınsama analizleri sonucunda, hücre duvarı başına 30 eleman kullanılmıştır.

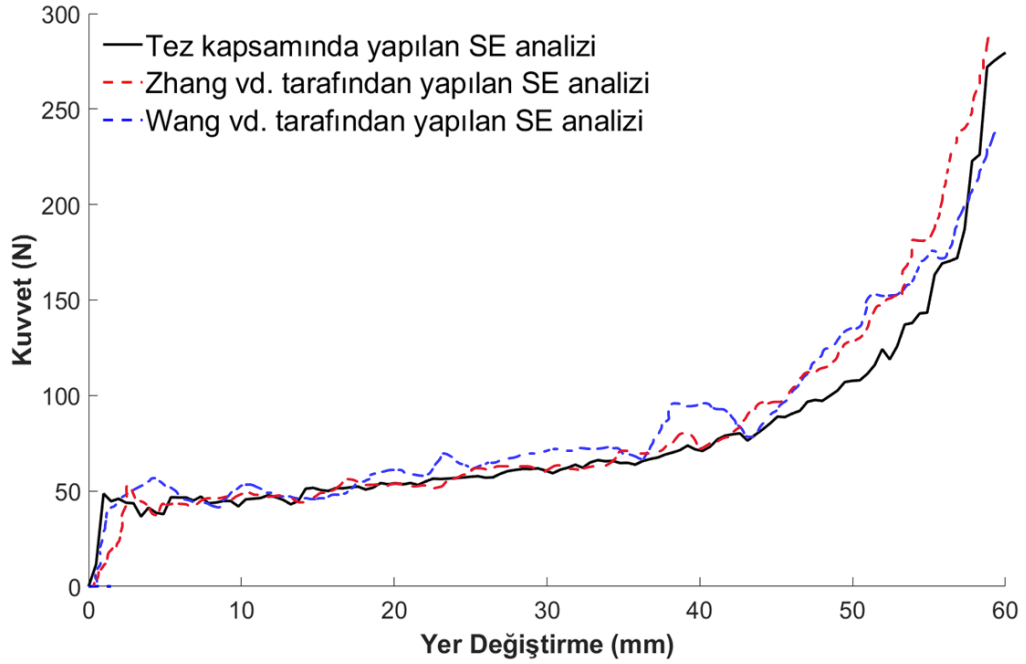


Şekil 2.1 : Wang vd. [56], Zhang vd. [54] ve tez kapsamında düzenlenen dairesel hücrelerden oluşan bir latis yapının ezilme davranışını incelemek için kullanılan SE modelinin (a) şematik gösterimi, (b) modele uygulanan sınır koşulları [54].

Model boyutunu küçük tutmak ve dolayısıyla analiz süresini kısaltmak için düzlem dışı doğrultuda 2 eleman kullanılmıştır. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te Zhang vd. [54], Wang vd. [56] ve tez kapsamında yapılan SE analizlerinin sonuçları karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.2'de SE analiz sonuçlarına göre aynı birim şekil değiştirme değerinde deformasyon görüntüleri verilmiştir. Ezilme davranışları karşılaştırıldığında, üç SE analizinde de deformasyon şekilleri büyük oranda benzerlik göstermektedir. Zhang vd. [54] ile Wang vd. [56] tarafından yapılan çalışmaya ait SE analiz sonuçlarında olduğu gibi, tez kapsamında yapılan SE analizinde de "X" şeklinde global bir deformasyon oluştuğu ve latisin merkezinde ezilmiş benzer hücre yapılarının meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.3'te gösterildiği üzere, kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırıldığında, tez kapsamında yapılan SE analiz sonuçları diğer iki çalışmayla tam bir uyum içindedir.



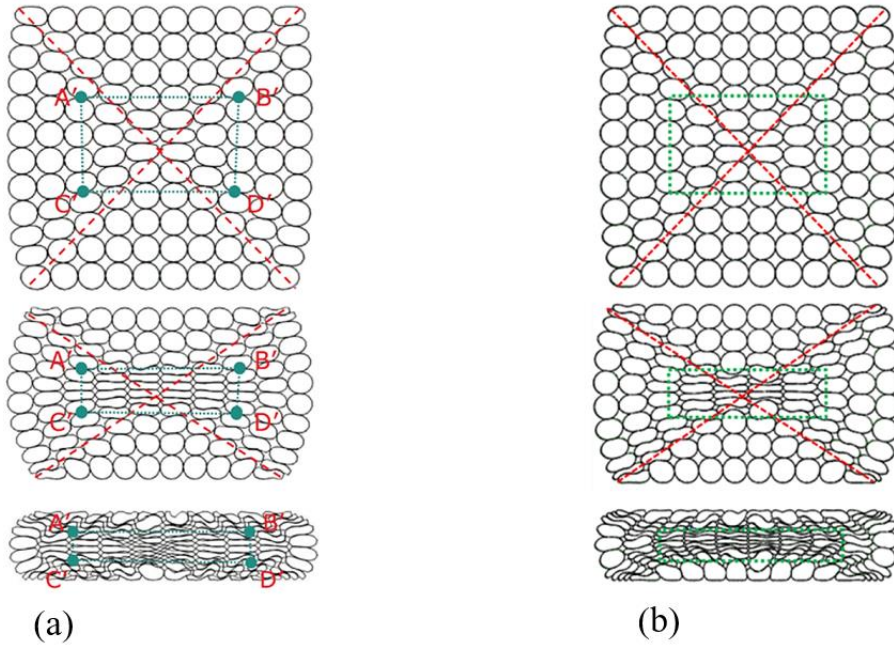
Şekil 2.2 : Düzenli dairesel hücrelerden oluşan latis yapının ezilme davranışı için elde edilen SE analizi sonuçları : (a) Wang vd. [56], (b) Zhang vd. [54], (c) tez kapsamında yapılan SE analizi.



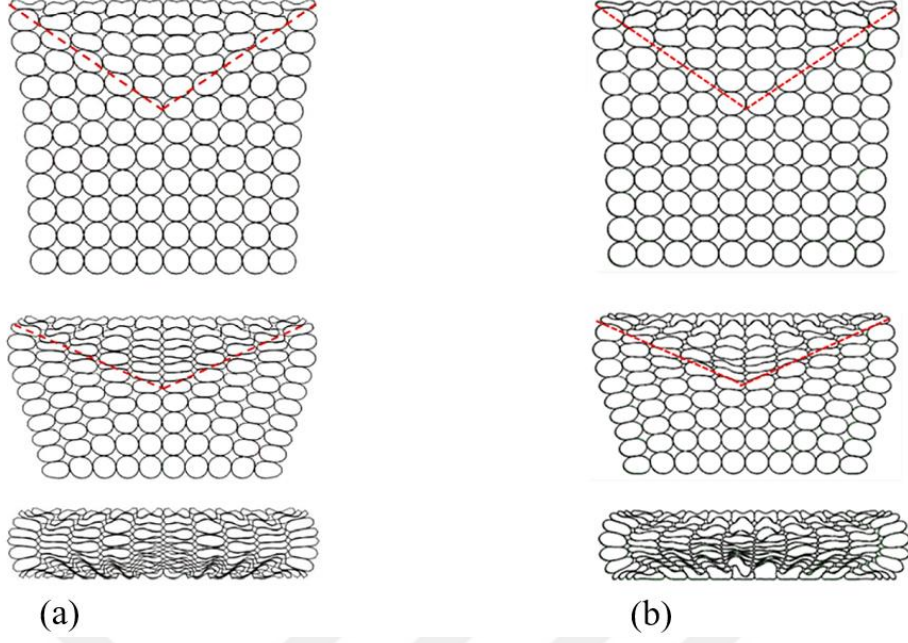
Şekil 2.3 : Sanki statik mod için 2222.7 mm/s ezilme hızında, Zhang vd. [54], Wang vd. [56] ve tez kapsamında düzenli dairesel hücrelerden oluşan latis yapının SE analizleriyle elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafikleri.

Zhang vd. [54] çalışmalarının devamında, oluşturdukları SE modelini kullanarak dairesel hücrelerden oluşan latis yapının sanki statik mod, geçiş modu ve dinamik modda SE analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Zhang vd. [54]'nin bu çalışma kapsamında oluşturdukları Şekil 2.1 (b)'de gösterilen SE modeli, hücre sayısı, hücre çapı ve hücre duvar kalınlığı haricinde, sonuçları Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te verilen SE modeli ile aynıdır. Düzgün dairesel hücrelerden oluşan latis yapısı x_1 doğrultusunda 10, x_2 doğrultusunda 12 hücreden meydana gelmektedir. Dairesel hücrelerin çapları 10 mm, hücre duvarlarının düzlem içi kalınlığı 0.2 mm, düzlem dışı kalınlığı ise 2 mm'dir. Tez kapsamında, Zhang vd. [54]'nin yaptığı analizler tekrar edilmiş, elde edilen sonuçlar Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da sunulmuştur.

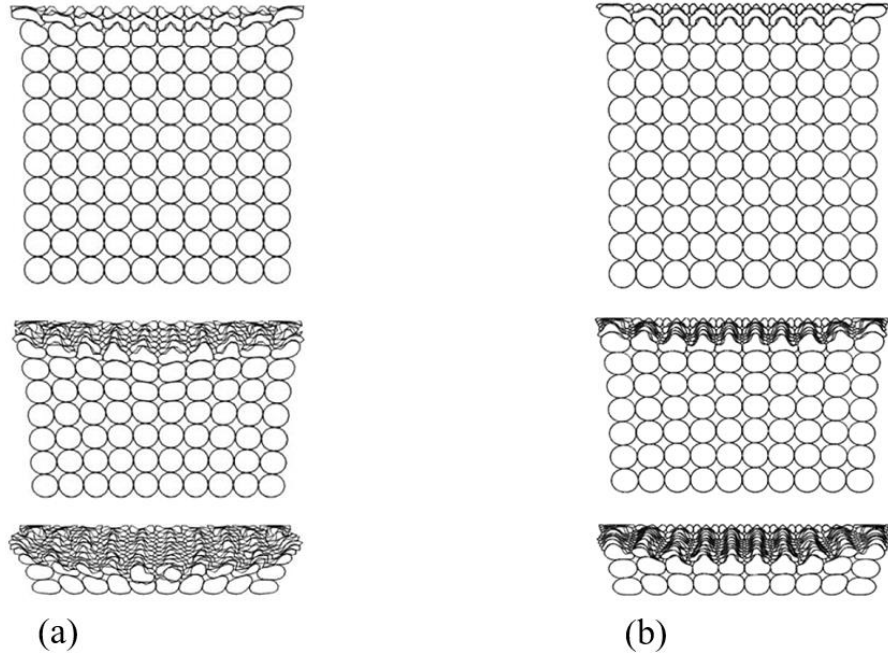
Şekil 2.4'te sanki statik modda deforme olmuş latislere bakıldığında, Zhang vd. [54] çalışmasında ve tez kapsamında elde edilen SE sonuçlarının son derece benzer olduğu görülmektedir. Tıpkı sanki statik modda olduğu gibi, Şekil 2.5'te gösterilen geçiş modunda da Zhang vd. [54] çalışmasında ve tez kapsamında elde edilen SE sonuçları son derece uyumludur. Her iki çalışmada da benzer deformasyon görüntüleri hâkim olmakla birlikte, latislerde "V" şeklinde deformasyonun meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 2.4 : Sanki statik mod için 2222.7 mm/s ezilme hızında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan: (a) Zhang vd. [54]'nin yaptığı ve (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = \%13.4$, $\epsilon = \%41.3$, $\epsilon = \%74.1$ 'dir.



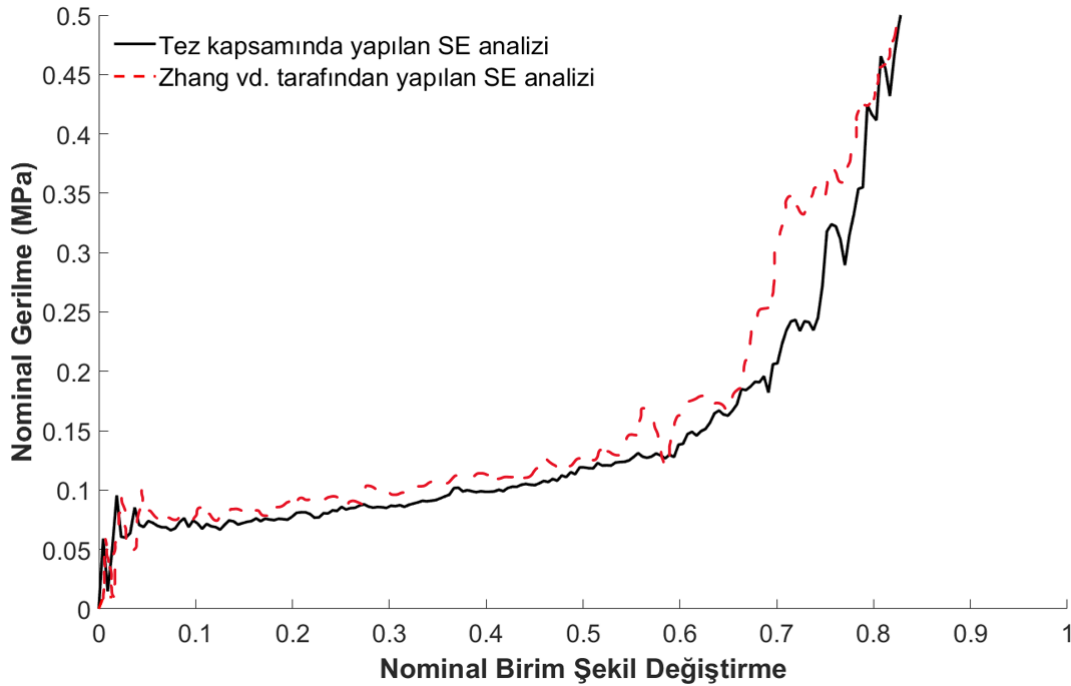
Şekil 2.5 : Geçiş modu için 22227.2 mm/s ezilme hızında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan: (a) Zhang vd. [54]'nin yaptığı ve (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = \%13.4$, $\epsilon = \%41.3$, $\epsilon = \%74.1$ 'dir.



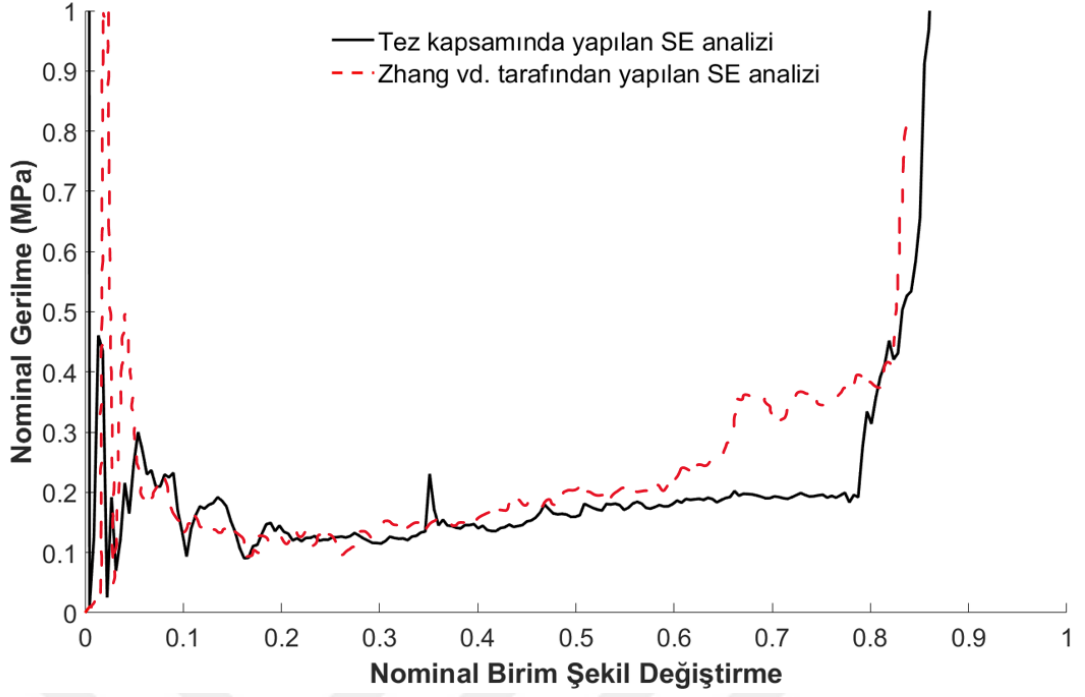
Şekil 2.6 : Dinamik mod için 66817.2 mm/s ezilme hızında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan: (a) Zhang vd. [54]'nin yaptığı ve (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = \%13.4$, $\epsilon = \%41.3$, $\epsilon = \%74.1$ 'dir.

Son olarak, Şekil 2.6'da tez kapsamındaki ve Zhang vd. [54] tarafından yapılan çalışmadaki SE analizlerinin dinamik modda deformasyon şekilleri gösterilmektedir. Sonuçlar, düşük birim şekil değiştirme değerleri için benzer olsa da birim şekil değiştirme değeri arttıkça ezilme davranışlarında kısmi farklılıklar olduğu görülmektedir. Atalet etkilerinin baskın olması sonucu her iki modelde de “I” şeklinde deformasyon hâkim olmasına rağmen ezilmenin son aşamalarında Zhang vd. [54] tarafından yapılan çalışmada ezilen hücreler “V” şeklinde bir görüntü oluştururken, tez kapsamında yapılan çalışmada bu deformasyon şekli bariz bir şekilde oluşmamaktadır.

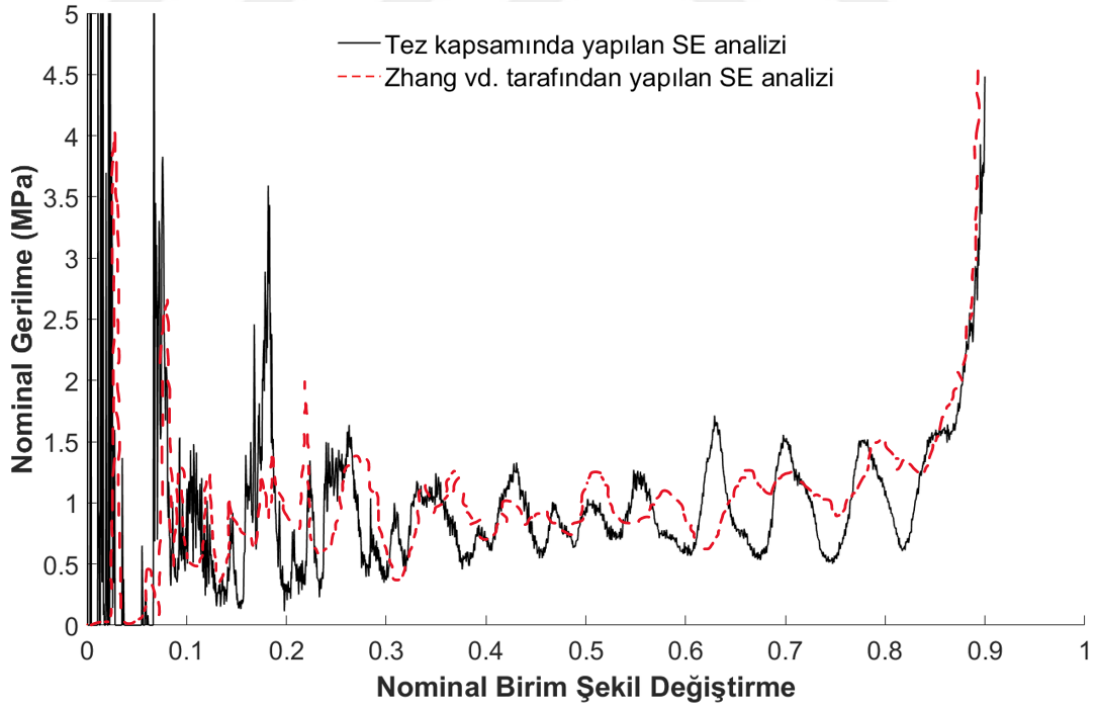
Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da farklı sıkıştırma hızları altında Zhang vd. [54] ile tez kapsamında yapılan SE analizlerine ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri birlikte gösterilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, sanki statik ve geçiş modu için eğrilerin kabul edilebilir düzeyde benzerlik gösterdiği görülmektedir. Dinamik mod için ise, eğriler arasında kısmi farklılıklar gözlemlenmiştir. Dinamik mod için meydana gelen bu farklılığın SE modelindeki parametrelerden kaynaklı olabileceği düşünülerek çalışmayı yayımlayan araştırmacılarla iletişime geçilmeye çalışılmıştır. Ancak, araştırmacılardan bir geri dönüş alınamadığından SE modelini doğrulamak adına literatürdeki farklı kaynaklar incelenmiştir.



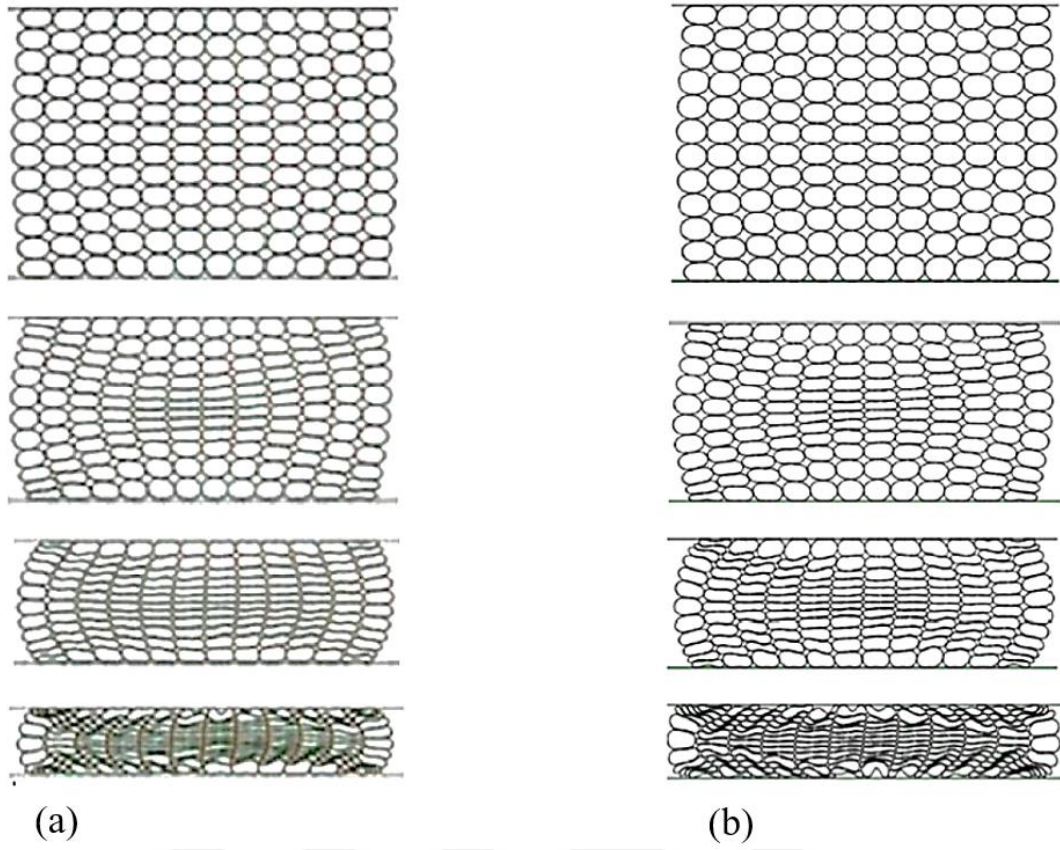
Şekil 2.7 : Sanki statik modda Zhang vd. [54] ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafiği.



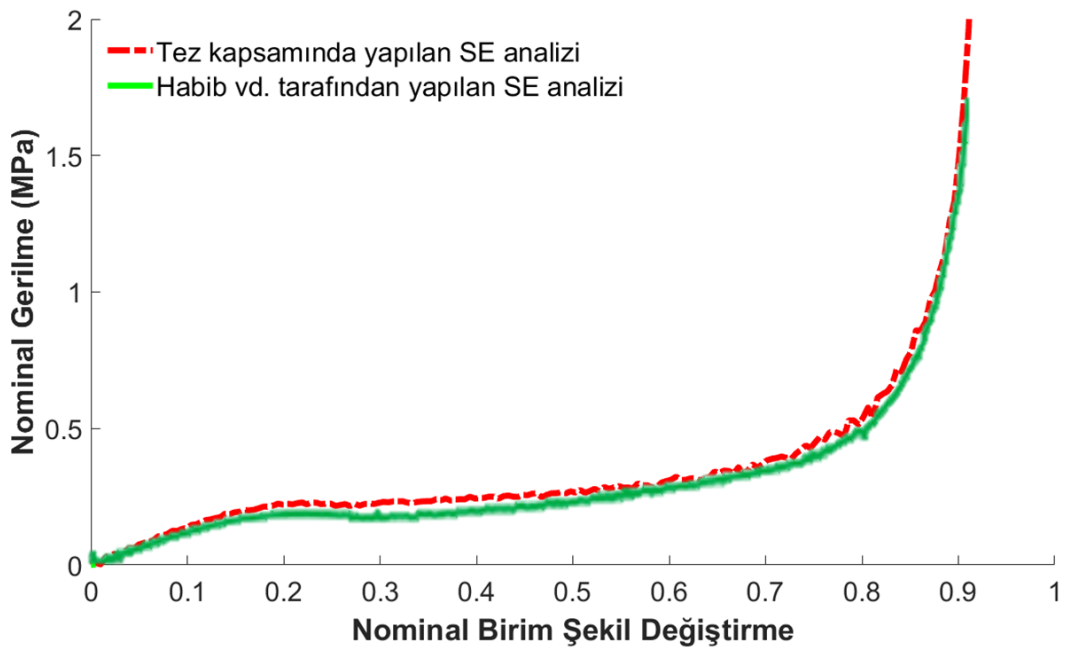
Şekil 2.8 : Geçiş modunda Zhang vd. [54] ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme grafiği.



Şekil 2.9 : Dinamik modda Zhang vd. [54] ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme grafiği.



Şekil 2.11 : 1000 mm/s yükleme hızında, farklı birim şekil değıştirme değeriinde oluşan (a) Habib vd.'nin [35] yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen deforme oluş latisler. Yukarıdan aşağıya doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değıştirme değeriileri sırasıyla, $\epsilon=\%20$, $\epsilon=\%40$, $\epsilon=\%60$, $\epsilon=\%80$ 'dir.

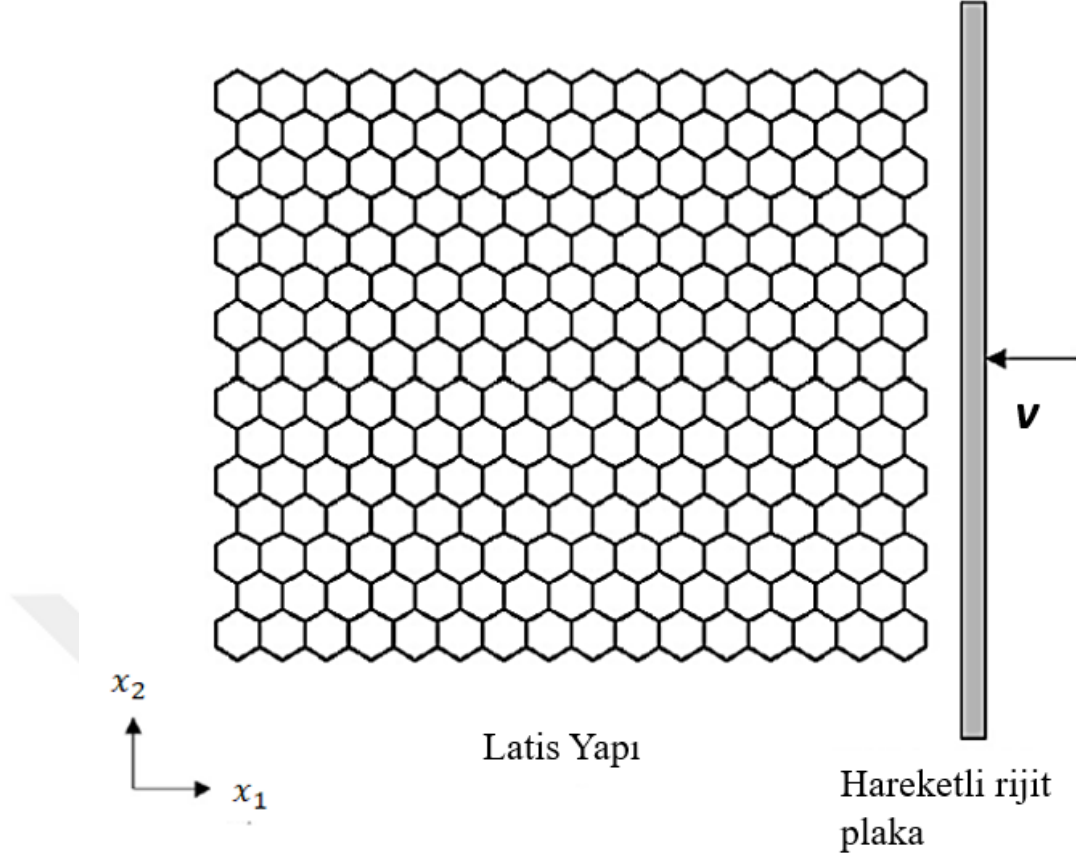


Şekil 2.12 : Habib vd. [35] ve tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen nominal gerilme-nominal birim şekil değıştirme grafikleri.

Her iki modele ait SE analizi sonuçlarının sanki statik modda birbiriyle tam bir uyum içinde olduğu açıkça görülmektedir; fakat Habib vd. [35] tarafından yapılan çalışmada dinamik modda ezilme davranışını incelemek adına SE analizleri yapılmamıştır. SE modelindeki parametrelerin, dinamik modda meydana gelen ezilme davranışını daha çok etkileyebileceği düşünülmüştür. Bu nedenle, literatürde latis malzemelerin dinamik modda ezilme davranışlarının incelendiği başka akademik çalışmalara yönelinmiştir.

Ruan vd. [45] tarafından yapılan çalışmada Altıgen latislerin sanki statik mod, geçiş modu ve dinamik modda düzlem içi ezilme davranışları SE analizleriyle incelenmiştir. Literatürde yüksek enerji emme kapasitesine sahip olarak bilinen Altıgen latisin incelenmesi ve tüm deformasyon modlarında SE analizlerinin Ruan vd. [45] tarafından yapılan çalışmada mevcut olması sebebiyle tez kapsamında da bu çalışmadaki SE analizlerinin tekrarlanmasına karar verilmiştir.

SE analizleri yapılan Altıgen latis yapısı x_1 doğrultusunda 16, x_2 doğrultusunda ise 15 hücreden meydana gelmektedir. Altıgen latis yapıda yer alan birim hücrelerin her biri için; birim hücre duvarı uzunluğu 2.7 mm, düzlem içi kalınlığı 0.2 mm ve düzlem dışı kalınlığı 0.9 mm olarak belirlenmiştir. Bu SE modelinde latis yapısı, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi, hareketli bir rijit plakayla sıkıştırılmaktadır. x_1 doğrultusunda ezilme sırasında numunenin sol kenarının tüm serbestlik dereceleri sabitlenmiş, üst ve alt kenarlar serbest bırakılmıştır. Hücrelerin kendi kendine temasını simüle etmek için genel temas algoritması benimsenirken, latis ve rijit plaka arasındaki teması simüle etmek için yüzeyden yüzeye temas algoritması benimsenmiştir. Hücrelerin kendi içerisinde ve plaka ile arasındaki sürtünme katsayısı 0.05 alınmıştır. Latis yapının hücre duvarı malzemesi; elastik modülü 69 GPa, akma dayanımı 76 MPa, Poisson oranı 0.33 ve yoğunluğu 2700 kg/m³ olan izotropik ve elastik-mükemmel plastik bir malzeme olarak modellenmiştir. SE modelinde hücre duvarı başına 3 kabuk eleman kullanılmıştır. Düzlem dışı doğrultuda ise tek kabuk eleman kullanılmıştır. S4R kabuk elemanlarla modellenen latis yapıların düzlem dışı burkulmasını önlemek için latisin düzlem dışı doğrultuda hareketi kısıtlanmıştır. Hareketli rijit plaka hızı, çalışma ile uyumlu olarak, sanki statik deformasyon modu için 3500 mm/s, geçiş modu için 14000 mm/s ve dinamik mod için 70000 mm/s olacak biçimde SE analizleri tekrar edilmiştir.

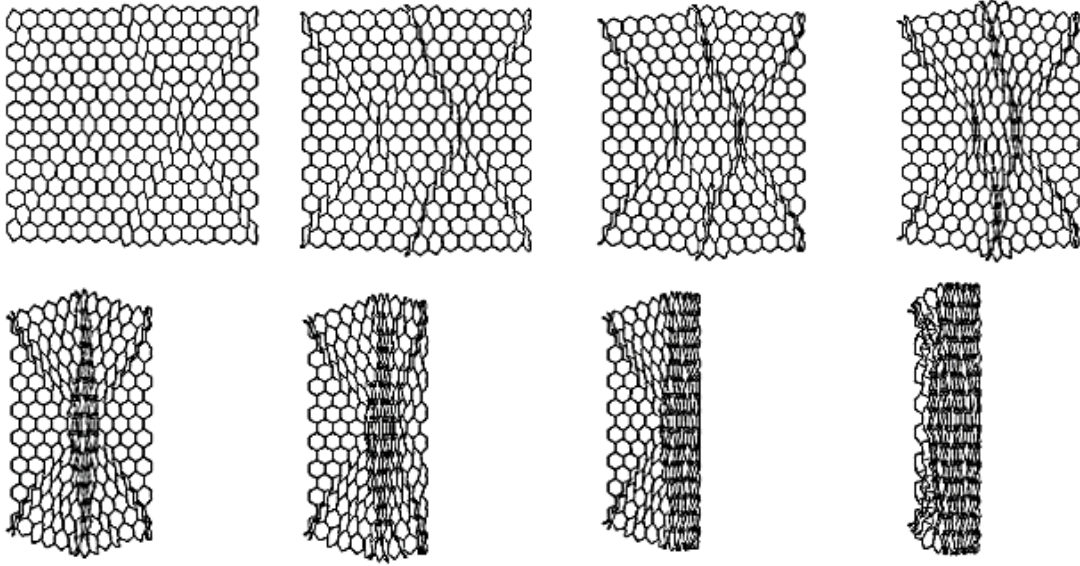


Şekil 2.13 : Ruan vd. [45] tarafından Altıgen latisin ezilme davranışlarını incelemek için oluşturulan SE modeli.

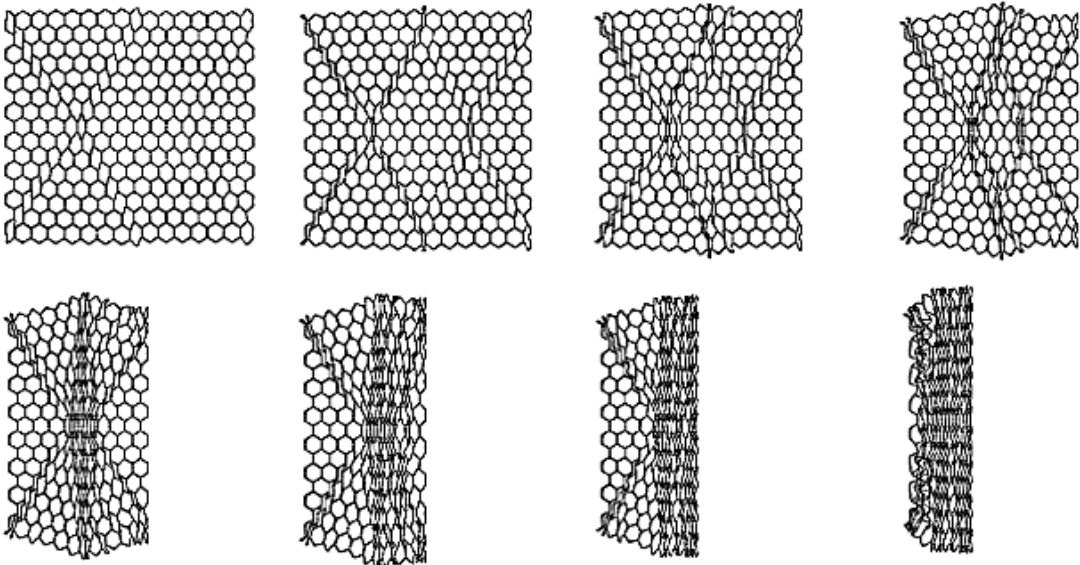
Şekil 2.14, Şekil 2.15 ve Şekil 2.16’da sırasıyla, sanki statik mod, geçiş modu ve dinamik mod için Ruan vd.’nin [45] ve tez kapsamında yapılan SE analizlerindeki deformasyon şekilleri gösterilmektedir. Ruan vd. [45] tarafından yapılan çalışmada sadece geçiş modu için kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Bu grafik ile tez kapsamında SE analizleriyle elde edilen geçiş modu kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 2.17’de karşılaştırılmıştır. Eğrilerin birbiriyle tam olarak örtüştüğü görülmektedir. Her iki grafikte de yoğunlaşma bölgesine geçtikleri birim şekil değiştirme değerleri aynıdır. Ayrıca plato rejiminde gözlemlenen kuvvet değerleri benzer eğilim göstermektedir.

Sanki statik deformasyon modunda, iki SE modeline ait sonuçlarda da ezilemenin başlamasıyla birlikte “X” harfine benzer ezilmiş bir hücre bandı oluştuğu görülmektedir. Bu “X” bandı, Ruan vd. [46] tarafından yapılan çalışmada ilk olarak hareketli plakaya yakın bölgede oluşurken, tez kapsamında yapılan çalışmada latisin sabitlenmiş kenarında oluşmaktadır. İlerleyen birim şekil değiştirme değerlerinde, iki modelde de latis yapıda iki adet “X” bandı oluşmaktadır.

Deformasyon, yüklemenin ilerlemesiyle ezilen hücrelerin bu “X” bantlarına eklenmesi ile devam etmektedir. Yüklemeninin son aşamasında bu iki “X” bandı birleşmekte ve latis yapı dörtgen bir hale gelmektedir.

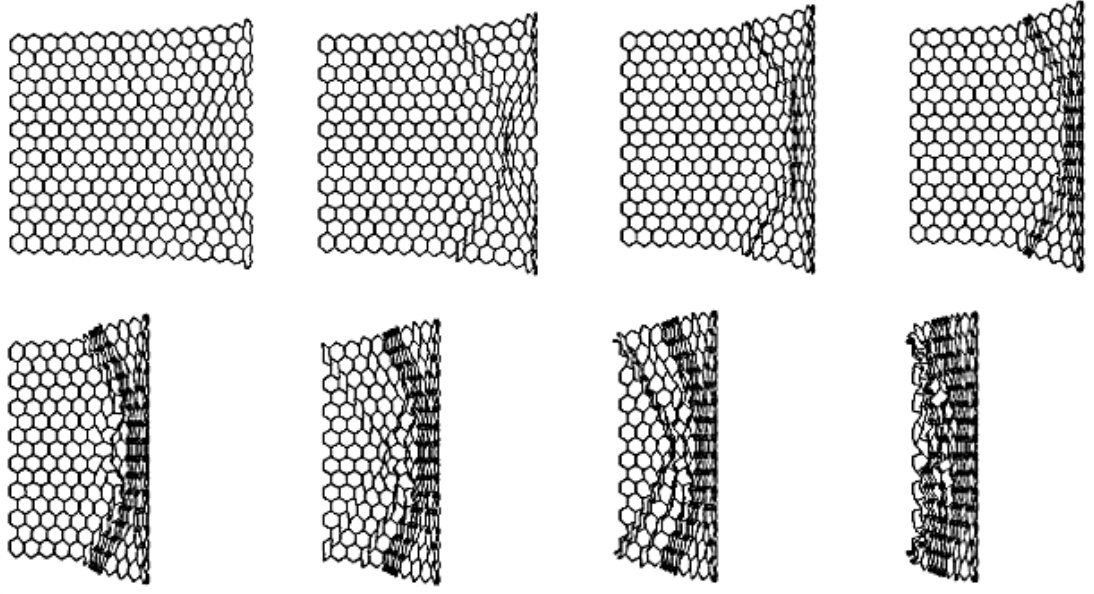


(a)

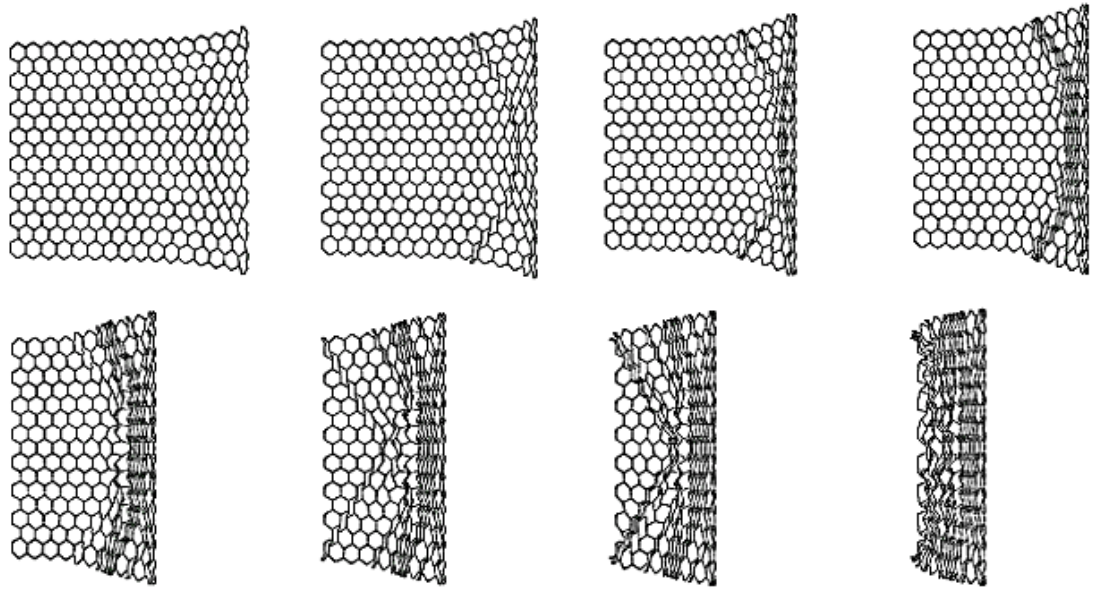


(b)

Şekil 2.14 : Sanki statik mod için, 3500 mm/s yükleme hızı altında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan (a) Ruan vd.'nin [45] yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Soldan sağa doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = \%7.4$, $\epsilon = \%15.8$, $\epsilon = \%24.2$, $\epsilon = \%32.5$, $\epsilon = \%45.2$, $\epsilon = \%53.5$, $\epsilon = \%62$, $\epsilon = \%74.5$ 'tir.



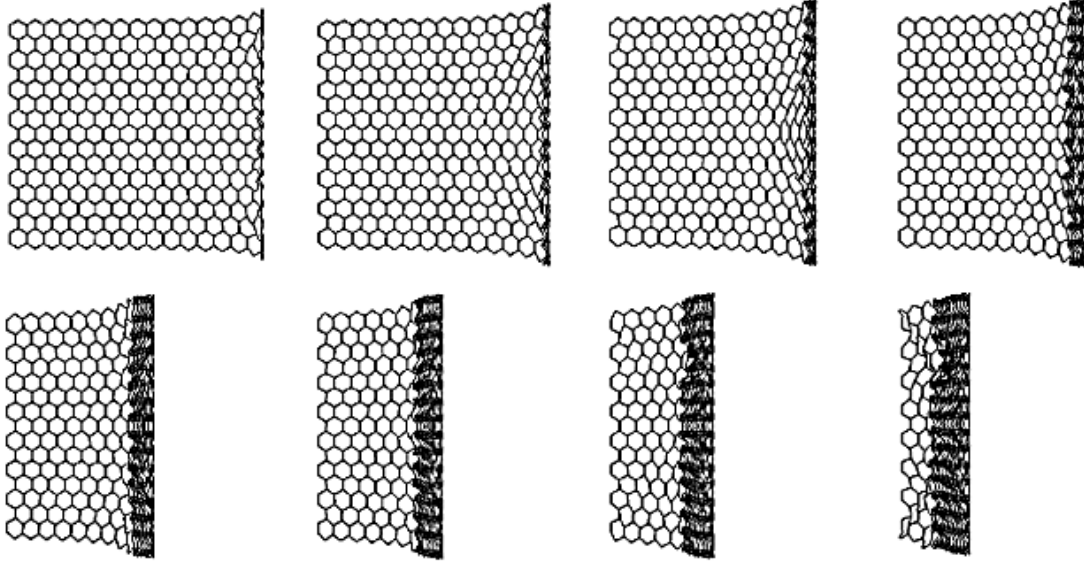
(a)



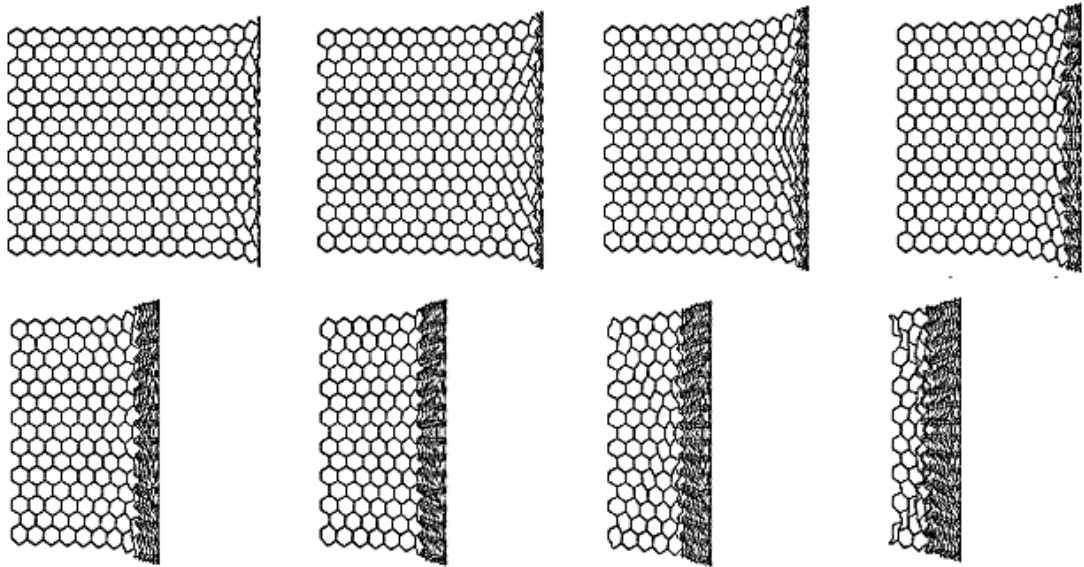
(b)

Şekil 2.15 : Geçiş modu için, 14000 mm/s yükleme hızı altında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan (a) Ruan vd.'nin [45] yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Soldan sağa doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = \%7.4$, $\epsilon = \%15.8$, $\epsilon = \%24.2$, $\epsilon = \%32.5$, $\epsilon = \%45.2$, $\epsilon = \%53.5$, $\epsilon = \%62$, $\epsilon = \%74.5$ 'tir.

Geçiş modunda yapılan analizlerde tüm birim şekil değiştirme değerlerinde ezilme davranışları iki model için de benzer bir görünüme sahiptir. Ezilmenin başlamasıyla hareketli plakaya yakın bölgede “V” bandı oluşumu görülmektedir. Deformasyon, ezilen hücrelerin bu “V” bandına eklenmesi ile devam etmektedir.



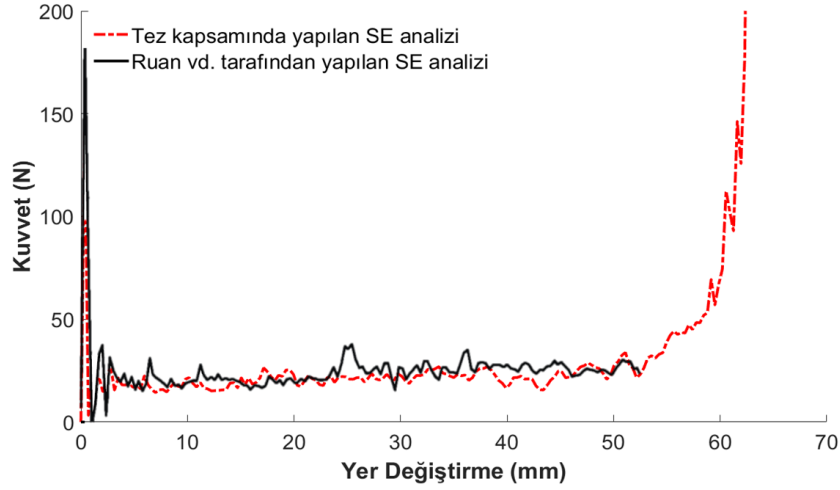
(a)



(b)

Şekil 2.16 : Dinamik mod için, 70000 mm/s yükleme hızı altında, farklı birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan (a) Ruan vd.'nin [45] yaptığı (b) tez kapsamında yapılan SE analizlerinde görülen deforme olmuş latisler. Soldan sağa doğru deformasyonun meydana geldiği birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla, $\epsilon = \%7.4$, $\epsilon = \%15.8$, $\epsilon = \%24.2$, $\epsilon = \%32.5$, $\epsilon = \%45.2$, $\epsilon = \%53.5$, $\epsilon = \%62$, $\epsilon = \%74.5$ 'tir.

Dinamik modda yapılan SE analizlerinde atalet etkilerinin baskın bir rol oynaması ile iki model de hareketli plakaya yakın bölgede "I" harfine benzer şekilde deformasyon görülmektedir. Deformasyon, ezilen hücrelerin katman katman çökerek bu banda eklenmesi ile devam etmektedir.



Şekil 2.17 : Geçiş modunda, Ruan vd. [45] ile tez kapsamında yapılan SE analizlerinden elde edilen kuvvet - yer değiştirme grafikleri.

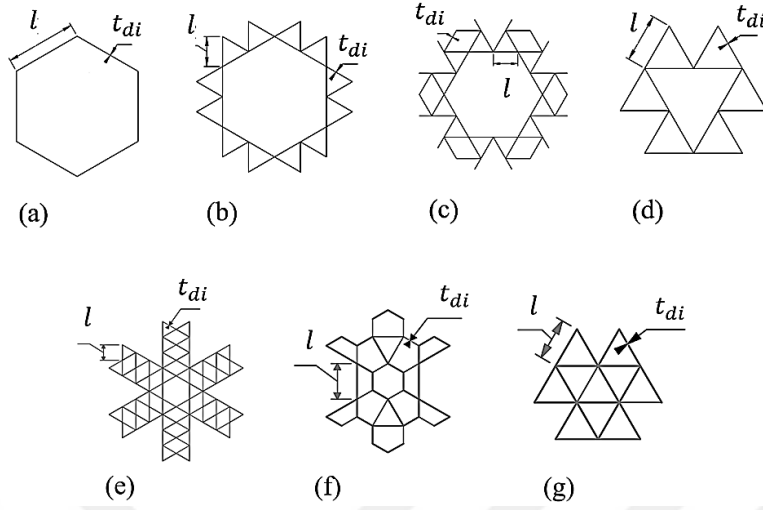
Sonuç olarak; Ruan vd. [45] tarafından Altıgen latislerin ezilme davranışlarının incelenmesi üzerine yapılan çalışmaya ait SE analizleri, tez kapsamında tekrarlanmış ve sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır. SE analizleri, tüm deformasyon modlarında birbiriyle son derece uyumlu sonuçlar göstermektedir. Tez kapsamında da latis malzemelerin enerji emme ve ezilme davranışlarının incelenmesinde bu SE modeli kullanılmasına karar verilmiştir. SE modeline ait tüm parametreler, Şekil 2.13'te gösterilen ve açıklanan Ruan vd. [45] çalışmasında belirtildiği gibi alınmıştır. Diğer parametreler için ABAQUS'ün “varsayılan” (*İng.* default) ayarları kullanılmıştır.

2.2 Sonlu Elemanlar Analizleri ve Sonuçları

Bu bölüm içerisinde; Bölüm 2.1'de latis yapıların enerji emme ve ezilme davranışlarını incelemek için geliştirilen SE çatısı (*İng.* finite element (FE) framework) kullanılarak yapılan SE analizlerine ait detaylar açıklanmaktadır. Şekil 2.18'de tez kapsamında incelenen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I (DK-I), Değiştirilmiş Kagome-II (DK-II) ve Değiştirilmiş Kagome-III (DK-III) adında beş yeni latis (C Tekoğlu. Truss-lattice materials consisting of mixed polygons, 2023. World Intellectual Property Organization, Başvuru numarası: PCT/TR2022/051154.) ile literatürde hâlihazırda bulunan Altıgen ve Üçgen-Üçgen latislerin birim hücreleri şekilleri gösterilmektedir.

Farklı birim hücre geometrisine sahip latis yapıların enerji emme ve ezilme kabiliyetlerini eşit koşullarda karşılaştırabilmek için SE analizlerinde latislerin bağıl yoğunlukları ($\rho^* = 0.0855$), birim hücre duvarlarının düzlem içi kalınlıkları

($t_{di} = 0.2 \text{ mm}$), hücre duvarı malzemesi ve x_1 ve x_2 doğrultularındaki birim hücre sayıları eşit tutulmuştur.

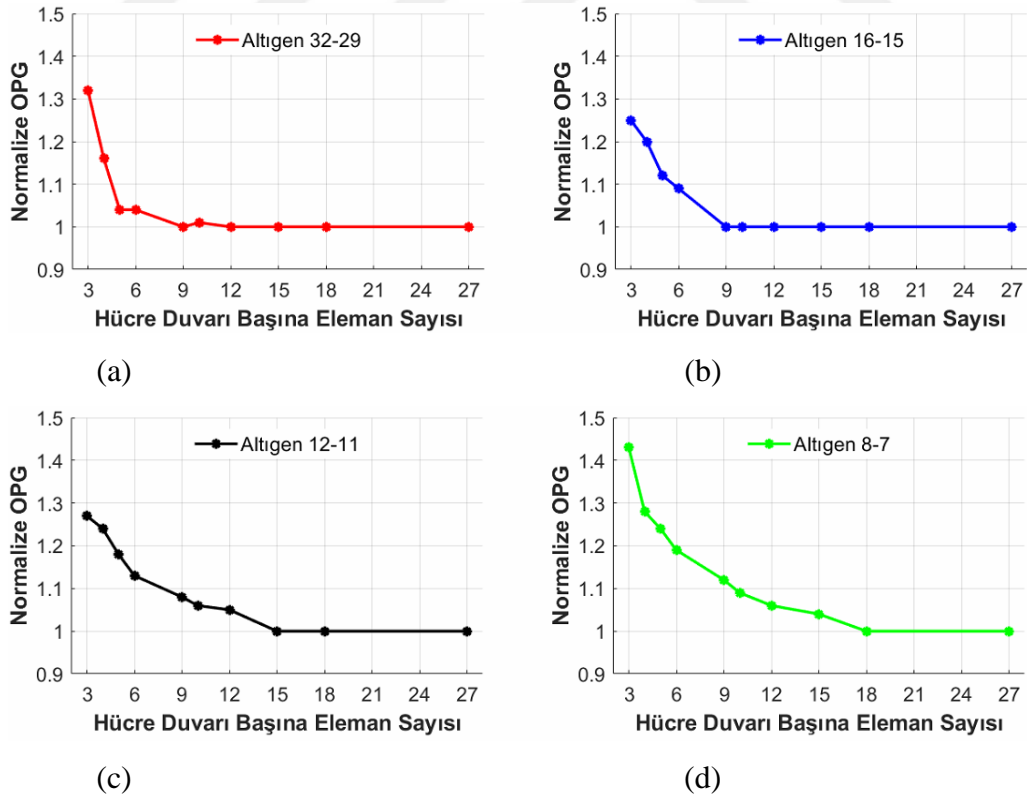


Şekil 2.18 : İki boyutlu latis malzemeler için altıgen birim hücreler: (a) Altıgen, (b) Karma Altıgen-2 Üçgen, (c) Hiyerarşik-3 Üçgen, (d) Üçgen-Üçgen, (e) Değiştirilmiş Kagome-I, (f) Değiştirilmiş Kagome-II, (g) Değiştirilmiş Kagome-III.

$\rho^* = 0.085$ için Poisson oranı Altıgen ve DK-II latisleri için yaklaşık bir, Üçgen-Üçgen ve DK-III latisler için yaklaşık sıfır, Karma Altıgen-2 Üçgen için -0.6630 , Hiyerarşik-3 Üçgen için -0.1176 ve DK-I latis için 0.7835 'tir. Bu Poisson oranları sonsuz küçük deformasyon için hesaplanmıştır. Sonlu deformasyon olduğunda, hücre şekilleri değişeceğinden dolayı Poisson oranı bazı latisler için değişebilir. Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen ve DK-III latisleri dış yükler altında uzama baskın bir davranım sergilerken; Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, DK-I ve DK-II latisler eğilme baskın bir davranım sergilemektedir. Sıfır Poisson oranına sahip Üçgen-Üçgen ve DK-III latisin Poisson oranı bağıl yoğunluk değişiminden neredeyse hiç etkilenmemekte, $0.01 < \rho^* < 0.1$ aralığında sıfıra çok yakın bir değerde kalmaktadır. $\rho^* = 0.085$ ve $t_{di} = 0.2 \text{ mm}$ için birim hücre duvarlarının uzunlukları (l), Altıgen latis için 2.7 mm , Karma Altıgen-2 Üçgen latis için 3.6 mm , Hiyerarşik-3 Üçgen latis için 4.05 mm , Üçgen-Üçgen latis için 5.4 mm , DK-I için 4.536 mm , DK-II için 5.894 mm , DK-III için ise 6.3 mm olmaktadır. Tüm analizlerin yapıldığı SE modellerinde, literatür ile uyumlu olarak Ruan vd. [46] tarafından yapılan çalışmadaki SE parametreleri kullanılmıştır. Tüm SE analizlerinde latis yapılar, literatürle uyumlu olarak, ABAQUS eleman kütüphanesinin dört düğüm noktalı S4R kabuk elemanı kullanılarak modellenmiş ve düzlem birim şekil değiştirme sınır koşulları eşliğinde

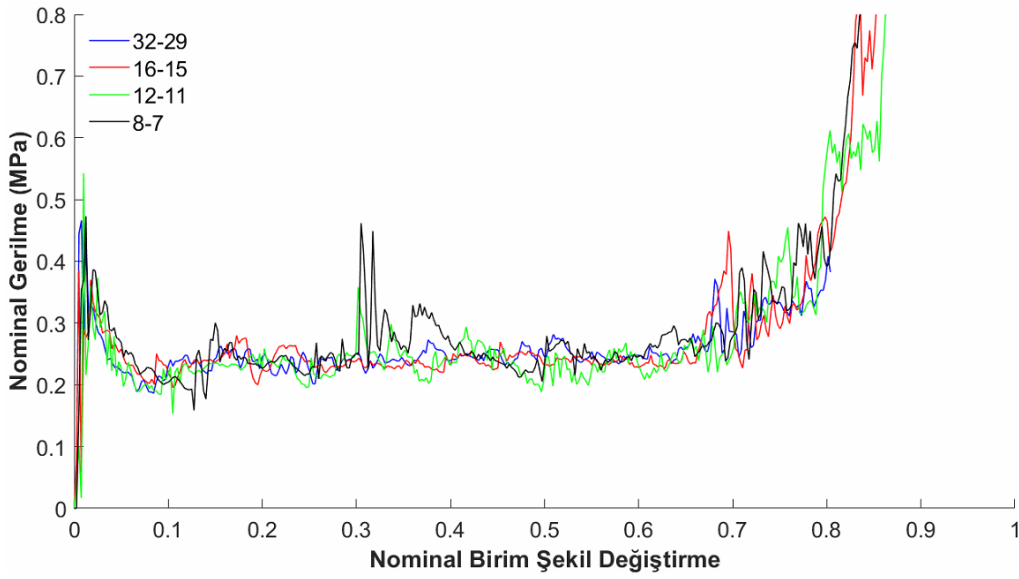
tek eksenli basmaya tabi tutulmuştur. S4R kabuk elemanlarla birim şekil değiştirme sınır koşulları uygulayabilmek için SE ağındaki tüm düğüm noktalarının düzleme dik doğrultudaki yer değiştirmeleri ve düzlem dışı dönmeleri sabitlenmiştir. Dolayısıyla latis yapıların düzlem dışı kalınlıklarının (t_{dd}) sonuçlara bir etkisi yoktur ve her latis yapı için düzlem dışı kalınlık, bir kabuk elemanın hücre duvarı uzunluğu doğrultusundaki boyuna eşit alınmıştır.

Tez kapsamında kullanılan SE çatısı oluşturulurken referans olarak alınan Ruan vd. [45] çalışmasında, Altıgen latis için x_1 doğrultusunda 16, x_2 doğrultusunda 15 birim hücre modellenmiştir. Tez kapsamında incelenen diğer 6 latisin birim hücrelerindeki giriş sayısı Altıgen latisle kıyasla çok daha fazladır ve 16-15 birim hücre boyutlarında latis yapıların SE analizleri çok uzun sürmektedir. Doğruluk düzeyinden feragat etmeden hesaplama sürelerini makul düzeylere indirebilmek amacıyla, önce Altıgen latis için yapı büyüklüğünün analiz sonuçlarına etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla x_1 - x_2 doğrultularındaki birim hücre sayıları 32-29, 16-15, 12-11 ve 8-7 olan dört farklı Altıgen latis incelenmiş, öncelikle her yapı için ağ yakınsama çalışmaları yapılmıştır. Yakınsama çalışmalarına ait sonuçlar Şekil 2.19'da gösterilmektedir.

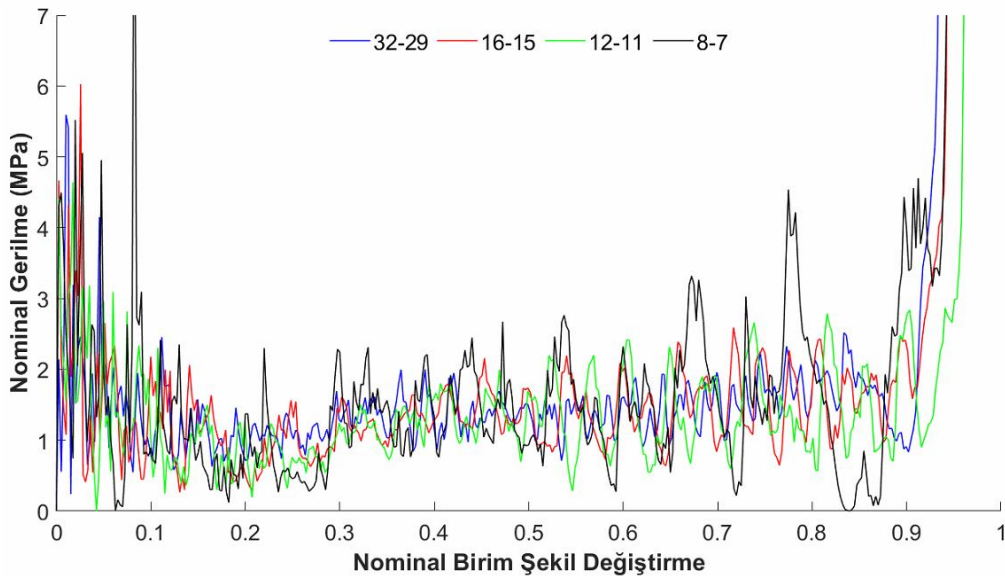


Şekil 2.19 : x_1 - x_2 doğrultularında (a) 32-29, (b) 16-15, (c) 12-11, (d) 8-7 birim hücre sayısına sahip Altıgen latis yapılar için normalize ortalama plato gerilmesinin hücre duvarı başına eleman sayısına göre değişimi.

Yakınsama çalışmalarında, dinamik yük altında ezilen latisin ortalama plato gerilme değeri esas alınmıştır. 32-29, 16-15, 12-11 ve 8-7 birim hücreye sahip Altıgen latis yapılar için hücre duvarı başına uygun eleman sayıları sırasıyla 9, 9, 15 ve 18 olarak belirlenmiştir. Ağ yakınsama çalışmalarının ardından farklı büyüklükteki Altıgen latis yapılar için sanki statik ve dinamik modda SE analizleri yapılmış, nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 2.20’de verilmiştir.



(a)

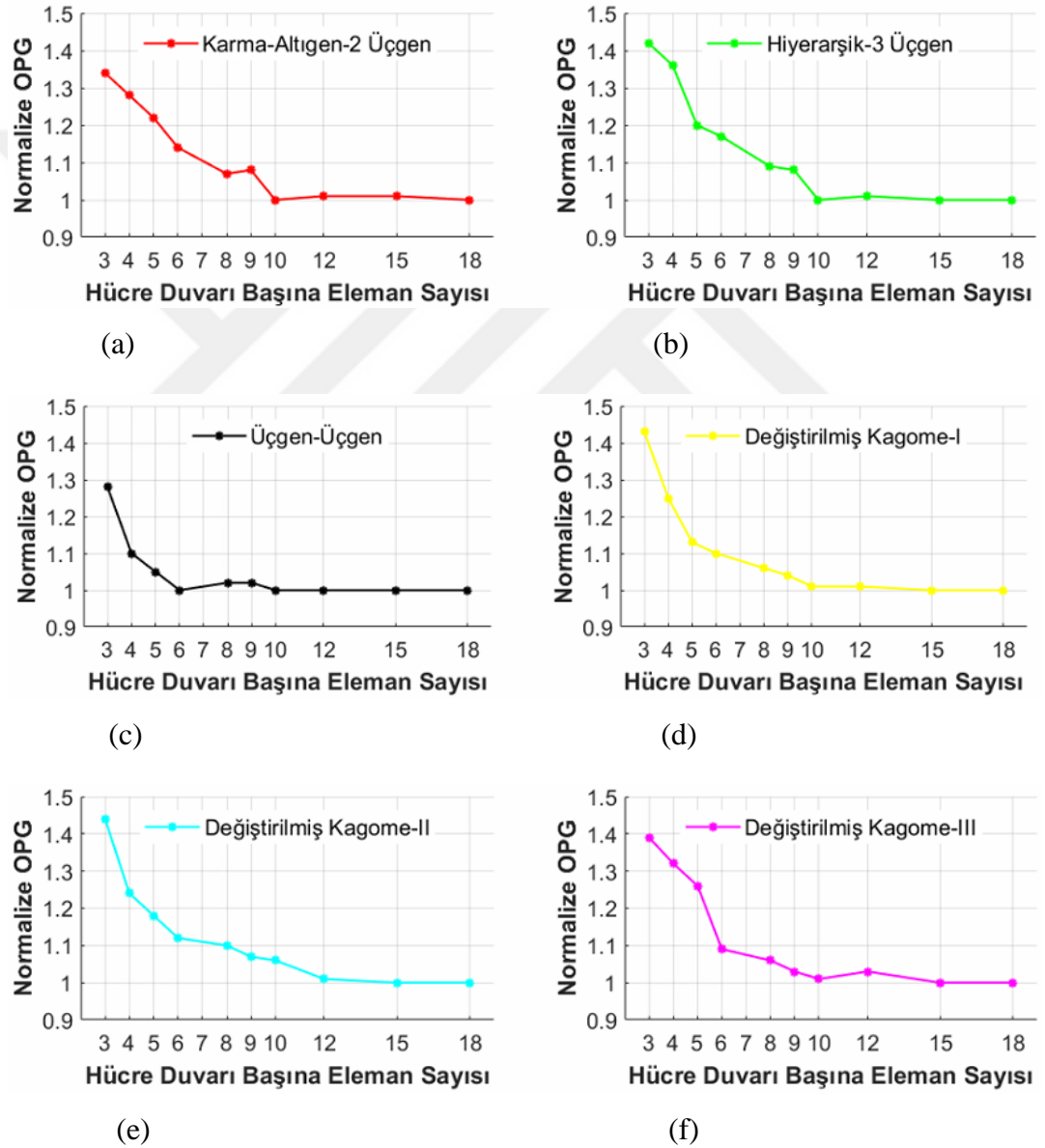


(b)

Şekil 2.20 : x_1 - x_2 doğrultularında farklı birim hücre sayılarına sahip Altıgen latis yapıların nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme grafikleri: (a) sanki statik mod için latis yapılar, (b) dinamik mod için latis yapılar.

32-29, 16-15 ve 12-11 büyüklüklerindeki Altıgen latis yapılar için elde edilen sonuçların uyumlu olduğu, 8-7 büyüklüğündeki yapıda ise hem sanki statik hem de dinamik mod için nominal gerilme değerlerindeki salınımların diğer büyüklüklerdeki yapılardan çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ışığında, SE analizlerinde 12-11 büyüklüğündeki latis yapıların kullanılmasına karar verilmiştir.

Şekil 2.21’de 12-11 birim hücre sayısına sahip Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen Üçgen, DK-I, DK-II, DK-III latis yapılar için gerçekleştirilen ağ yakınsama çalışmalarının sonuçları gösterilmektedir.

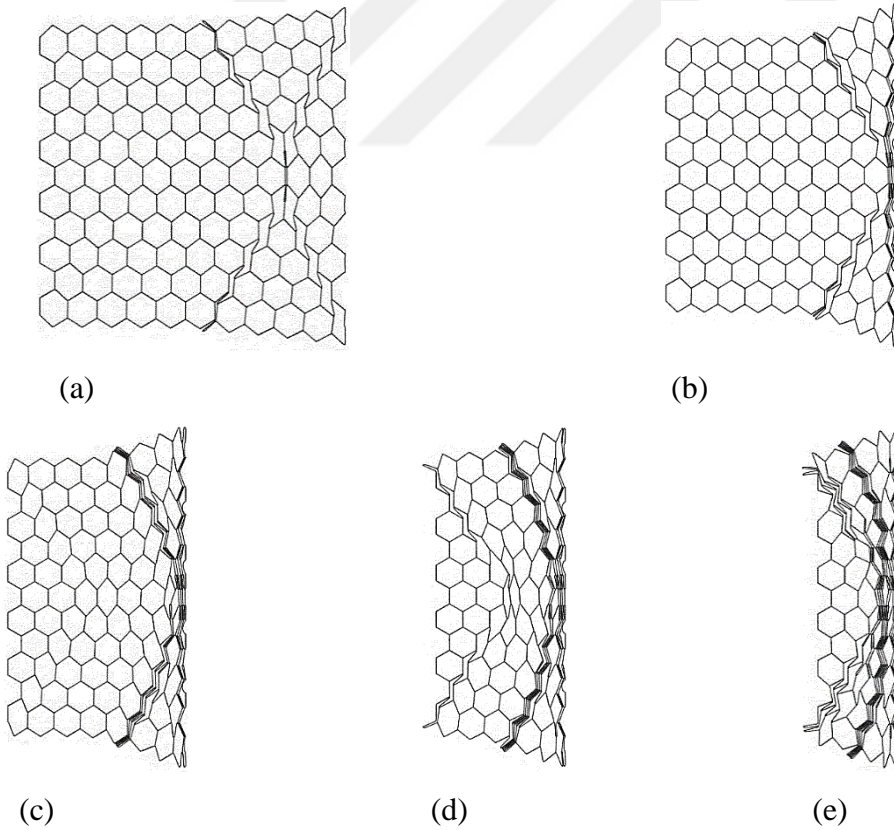


Şekil 2.21 : x_1 - x_2 doğrultularında 12-11 birim hücre sayısına sahip (a) Karma Altıgen-2 Üçgen, (b) Hiyerarşik-3 Üçgen, (c) Üçgen-Üçgen, (d) DK-I, (e) DK-II, (f) DK-III latis yapılar için normalize ortalama plato gerilmesinin hücre duvarı başına eleman sayısına göre değişimi.

Hücre duvarı başına uygun eleman sayıları sırasıyla, 10, 10, 6, 10, 12 ve 10 olarak belirlenmiştir.

Hücre duvarı başına kullanılacak eleman sayılarının belirlenmesi ile tez kapsamında geliştirilen SE modeli kullanılarak bu latis yapıların düzlem içi ezilme davranışlarını incelemek için sanki statik mod, geçiş modu ve dinamik modda SE analizleri yapılmıştır.

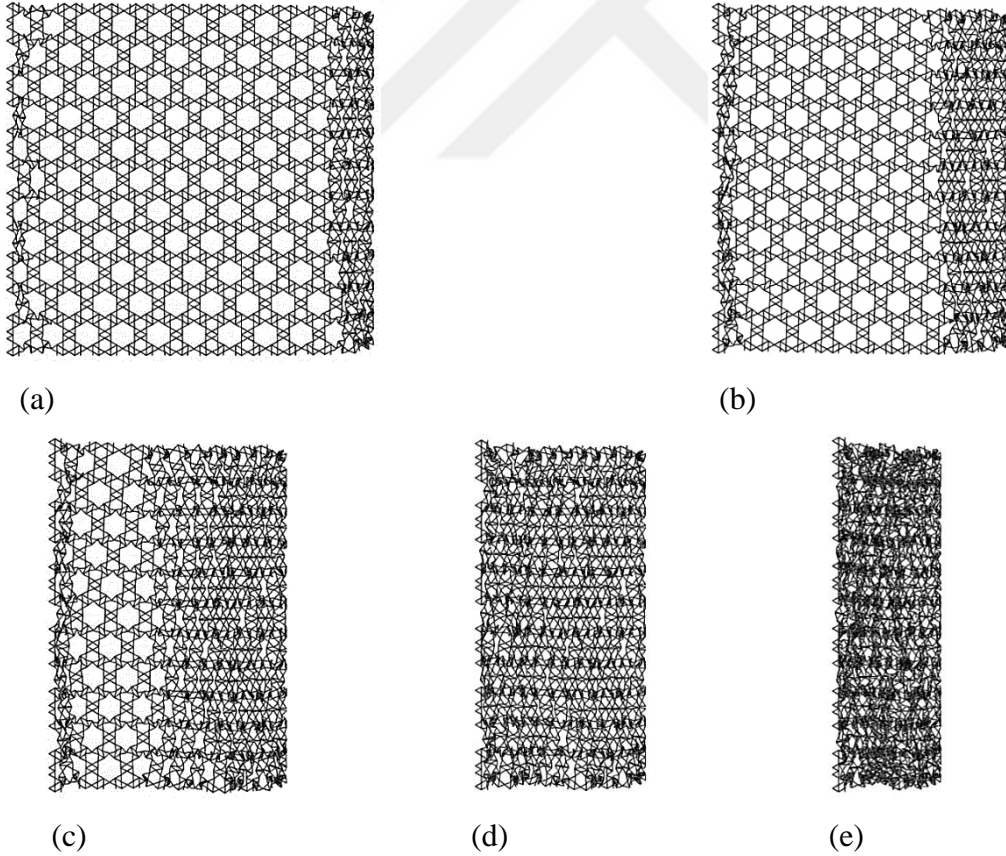
Sanki statik deformasyon modunda latis yapıyı ezen hareketli plakanın hızı, Ruan vd. [45] çalışmasıyla uyumlu olarak 3500 mm/s alınmıştır. Şekil 2.22, 2.23, 2.24, 2.25, 2.26, 2.27 ve 2.28'de sırasıyla Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II ve DK-III latis yapılarının sanki statik modda farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri, Şekil 2.29'da ise bu latis yapıların nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir.



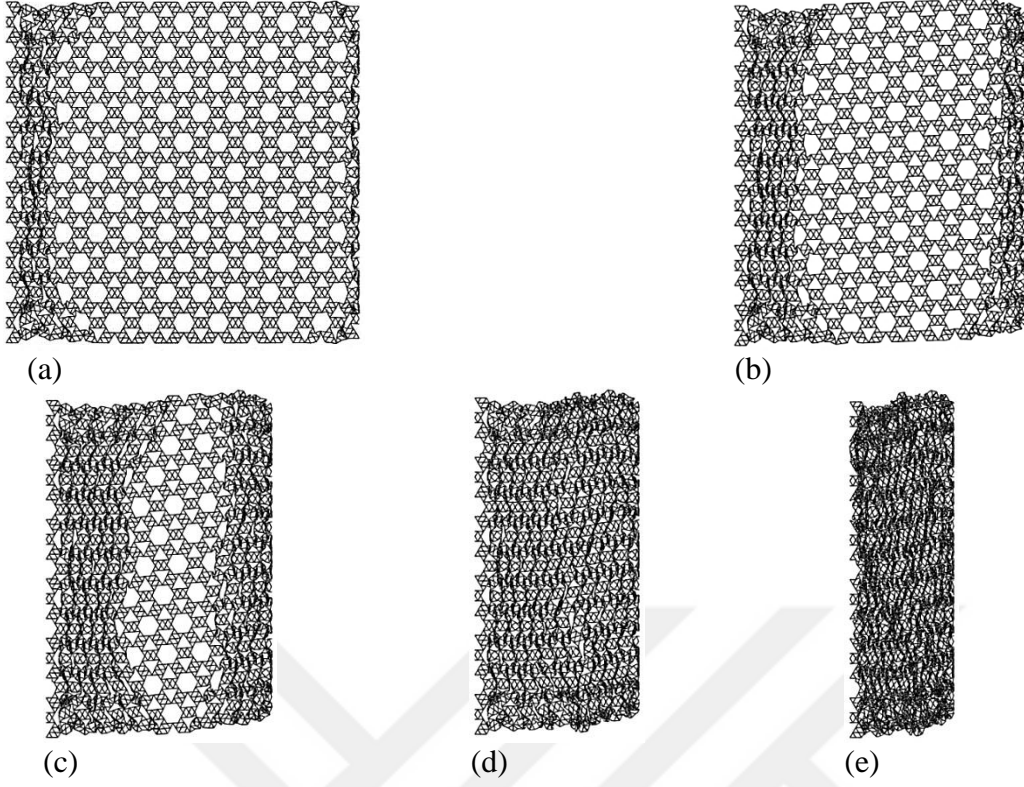
Şekil 2.22 : Altıgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.

Enerji emme ve ezilme davranışlarının incelenmesi için yapılan tüm SE analizlerinde latis yapılar sol kenarları boyunca sabitlenirken, sağ kenarlarında temas eden hareketli rijit bir plaka tarafından ezilmişlerdir. Altıgen latiste, hareketli plakanın temas ettiği sağ uçtan başlayarak “X” şeklinde bir bant oluşmakta, hareketli plakanın ilerlemesiyle ezilen hücreler “X” bandına eklenmektedir. Yüklemenin ileri bir aşamasında, latisin sabit tutulan kenarında ikinci bir lokal “X” bandı gelişmekte ve latisin deformasyonu bu iki “X” bandının birleşmesiyle devam etmektedir.

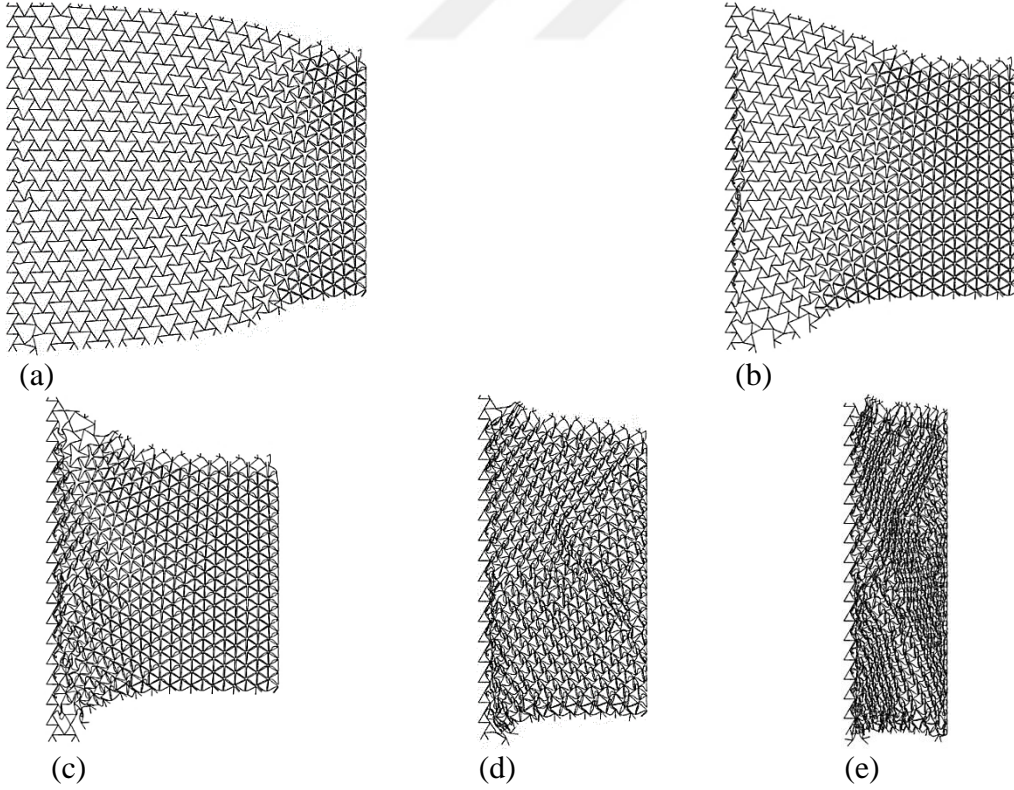
Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen ve DK-I latis yapılarında ise, ezilmenin başlamasıyla beraber hem hareketli plakanın bulunduğu hem de sabit tutulan kenarlarda “I” harfine benzer yerel deformasyonlar meydana gelmektedir. Hareketli plakanın ilerlemesi eşliğinde her iki kenarda da hücreler katman katman çökmeye devam etmekte ve iki kenarda oluşan çökmelerin birleşmesi sonucu dörtgen bir yapı meydana gelmektedir.



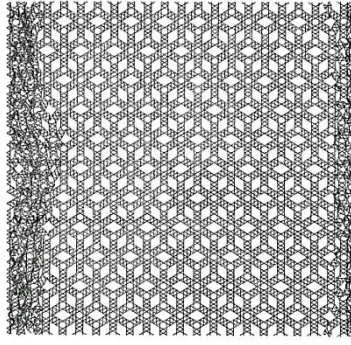
Şekil 2.23 : Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\epsilon = \% 15$, (b) $\epsilon = \% 30$, (c) $\epsilon = \% 45$, (d) $\epsilon = \% 60$, (e) $\epsilon = \% 75$.



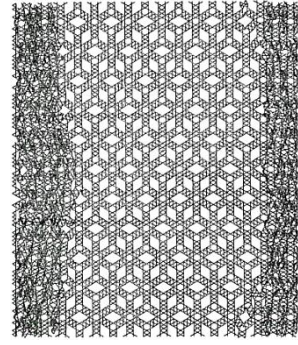
Şekil 2.24 : Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değıştirme değęerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



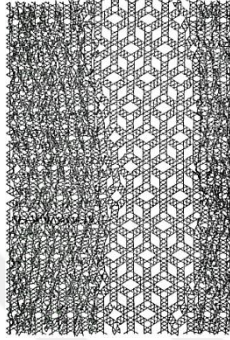
Şekil 2.25 : Üçgen-Üçgen latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değıştirme değęerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



(a)



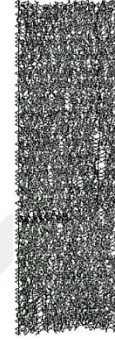
(b)



(c)

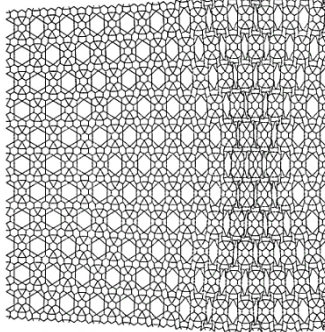


(d)

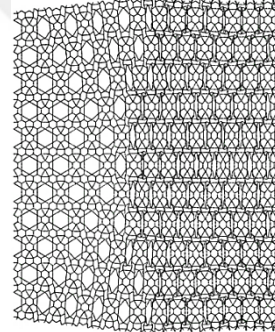


(e)

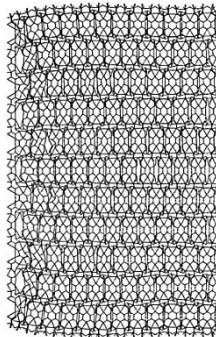
Şekil 2.26 : DK-I latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=\%15$, (b) $\varepsilon=\%30$, (c) $\varepsilon=\%45$, (d) $\varepsilon=\%60$, (e) $\varepsilon=\%75$.



(a)



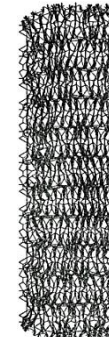
(b)



(c)

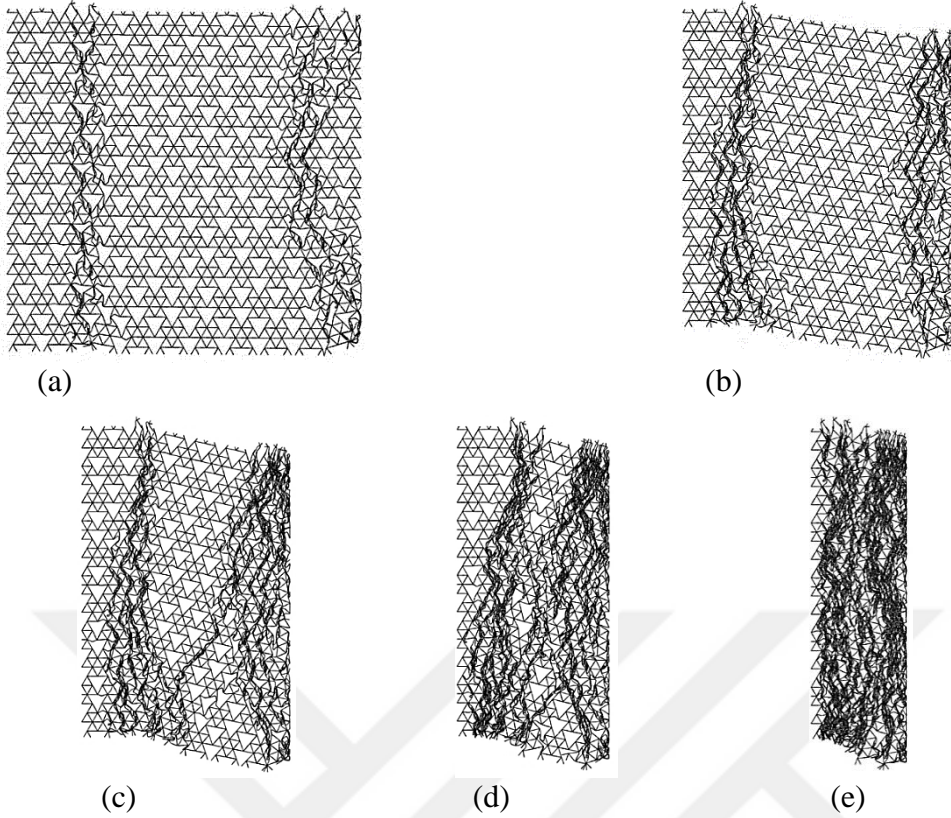


(d)



(e)

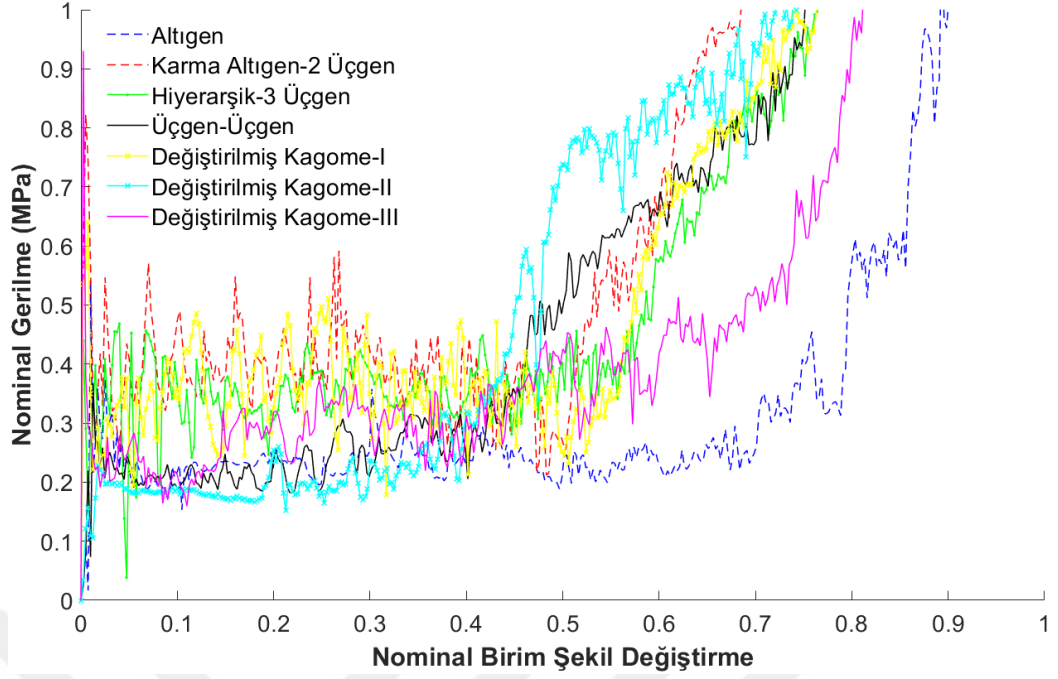
Şekil 2.27 : DK-II latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=\%15$, (b) $\varepsilon=\%30$, (c) $\varepsilon=\%45$, (d) $\varepsilon=\%60$, (e) $\varepsilon=\%75$.



Şekil 2.28 : DK-III latis yapının, sanki statik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.

Şekil 2.25'te deformasyon görüntüleri gösterilen Üçgen-Üçgen latiste, yükleme başlangıcında hareketli plakanın olduğu kenarın yakınındaki hücreler büzüşürken, sabit kenardaki hücreler neredeyse hiç deforme olmamaktadır. Artan birim şekil değiştirme değerleriyle birlikte büzüşen hücre bölgesi, hareketli kenardan sabit kenara doğru ilerleyerek yükleme sonunda tüm yapıyı kaplamakta ve yüksek birim şekil değiştirme değerlerinde latis yapı dörtgen bir şekil oluşturmaktadır.

Şekil 26'da gösterilen DK-II latis yapısında, ezilmenin başlangıcında hareketli plaka tarafındaki hücrelerde yerel deformasyonlar görülürken, sabit kenardaki hücreler deforme olmamaktadır. Ezilme başlangıcında Altıgen latise kıyasla net olmamakla birlikte hareketli plakaya yakın bölgede "X" şeklinde yerel deformasyon oluşma eğilimi görülmektedir. Birim şekil değiştirme değerlerinin artmasıyla bu eğilim kaybolmakta ve artan yükleme ile birlikte katman katman çöken hücreler sabit kenara doğru ilerleyerek bütün yapıyı kaplamaktadır.



Şekil 2.29 : Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, Değiştirilmiş Kagome-I, Değiştirilmiş Kagome-II ve Değiştirilmiş Kagome-III latis yapıların sanki statik deformasyon modunda (yükleme hızı=3500 mm/s) nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri.

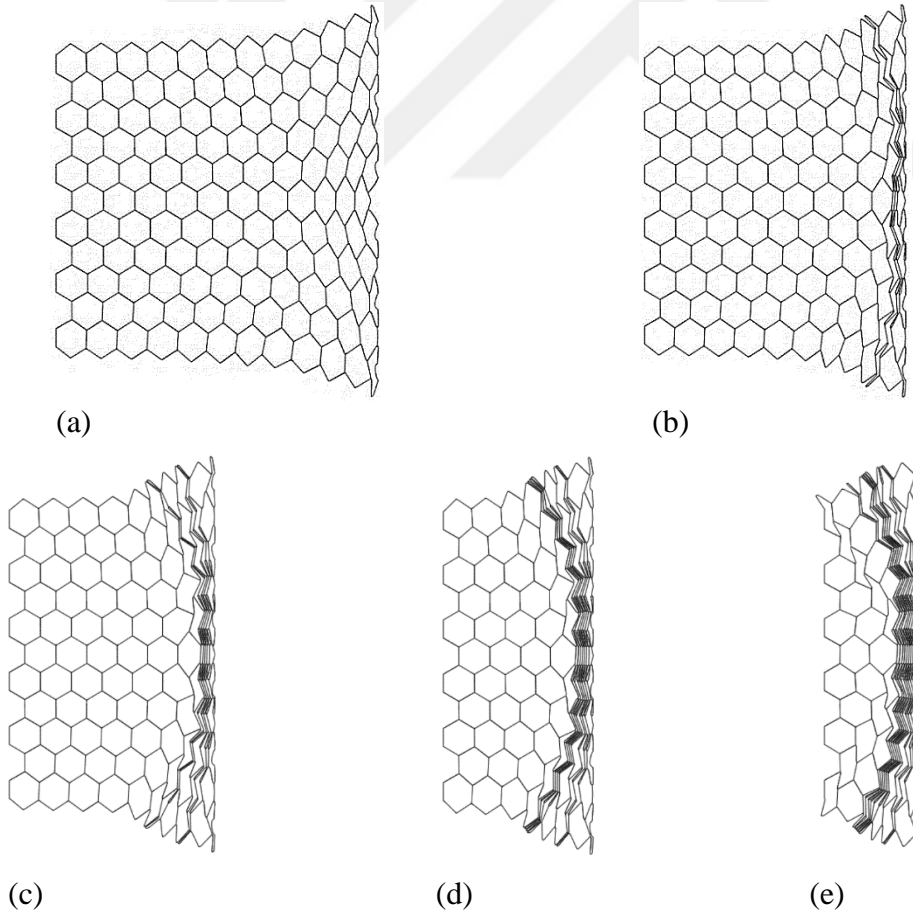
Şekil 2.28’de gösterilen DK-III latiste, yüklemeye başında hareketli plakanın olduğu kenarda “V” harfine, sabit kenara yakın bölgede ise “I” harfine benzer şekilde yerel hücre deformasyonları oluşmaktadır. Yüklemenin ileri safhalarında bu iki lokalize bant arasında eğik “I” şeklinde ayrı bir lokalize bant oluşmaktadır. Latisin deformasyonu, hareketli plakanın ilerlemesiyle birlikte ezilen hücrelerin her iki kenarda oluşan bu lokalize bantlara eklenmesiyle devam etmektedir.

Şekil 2.29’da sanki statik mod için verilen nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrilerine bakıldığında, basma hızının düşük olmasından dolayı tepe çarpışma gerilmesi ve ortalama plato gerilme değerlerinin diğer deformasyon modlarına göre düşük olduğu görülmektedir.

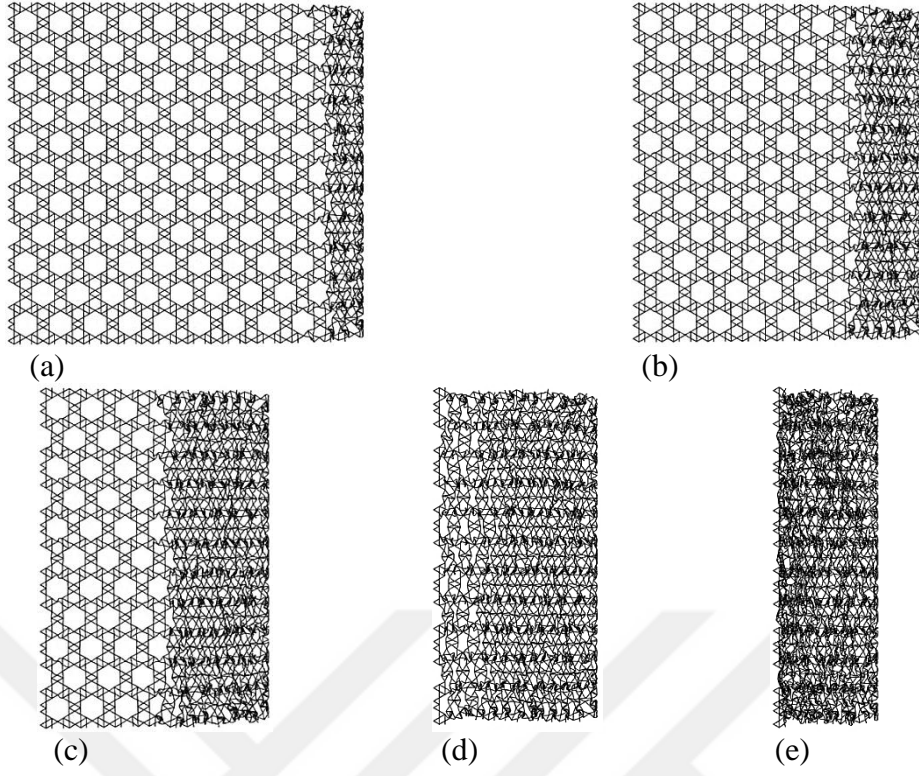
Sanki statik deformasyon modundan dinamik deformasyona geçişi ifade eden geçiş modu için yapılan analizlerde latis yapıyı ezen hareketli plakanın hızı, Ruan vd. [45] tarafından yapılan çalışma ile uyumlu olarak, 14000 mm/s alınmıştır. Şekil 2.30, 2.31, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35 ve 2.36’da sırasıyla Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II ve DK-III latis yapılarının geçiş modunda farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri, Şekil 2.37’de ise bu latis yapıların nominal gerilme-nominal birim şekil

değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Artan basma hızı ile birlikte gerilme değerlerinin ve tepe çarpışma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

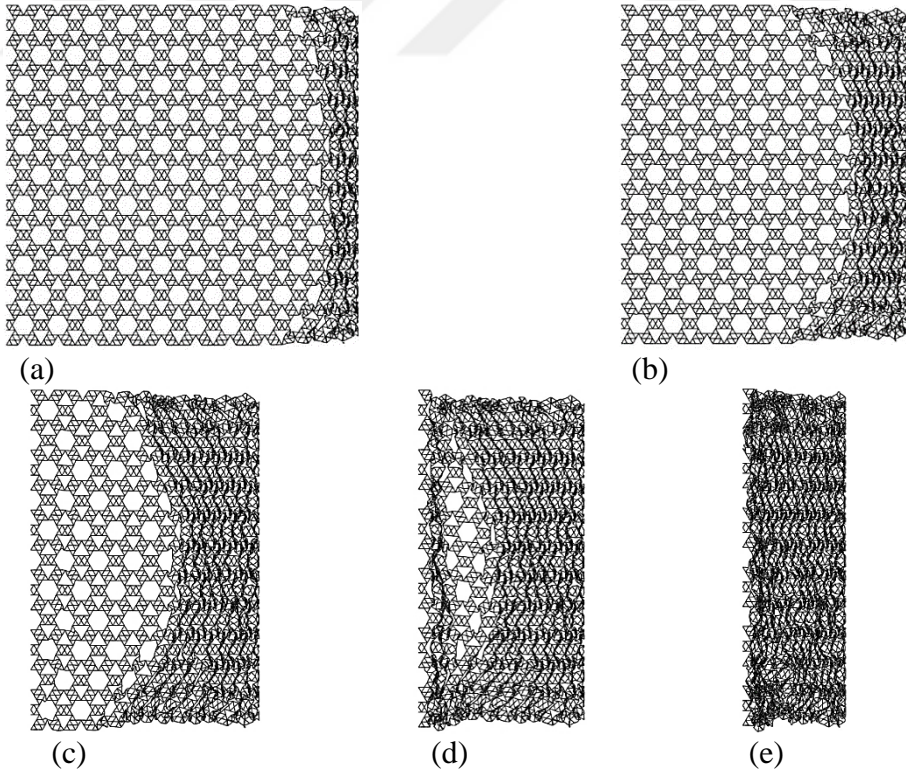
Deformasyon hızının sanki statik moda kıyasla daha yüksek olduğu geçiş modunda, artan ezilme hızıyla birlikte, dinamik modda olduğu gibi atalet etkileri ortaya çıkmaktadır. Hareketli plakaya yakın hücreler ezilme anında enine genişleme veya büzüşme için sanki statik moda kıyasla yeterli zaman sahip olamazlar. Bu nedenle hareketli plakaya yakın hücreler, sabit kenara yakın hücrelere nazaran çok daha erken deforme olmaya başlamaktadır. Plaka ilerledikçe ezilen hücrelere en yakın konumdaki diğer hücrelerde ezilmekte, ezilen hücrelerden oluşan bölge adım adım büyümektedir. Ezilme hızının artmasıyla birlikte geçiş modunda latis yapılar sanki statik moda göre daha yüksek gerilme değerleri üretmektedirler. Ek olarak atalet etkilerinin ortaya çıkması, hücre duvarlarında sıra sıra çökme mekanizmasını başlatmaktadır. Bu nedenle sanki statik moda kıyasla nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri daha dalgalı bir hal almaktadır.



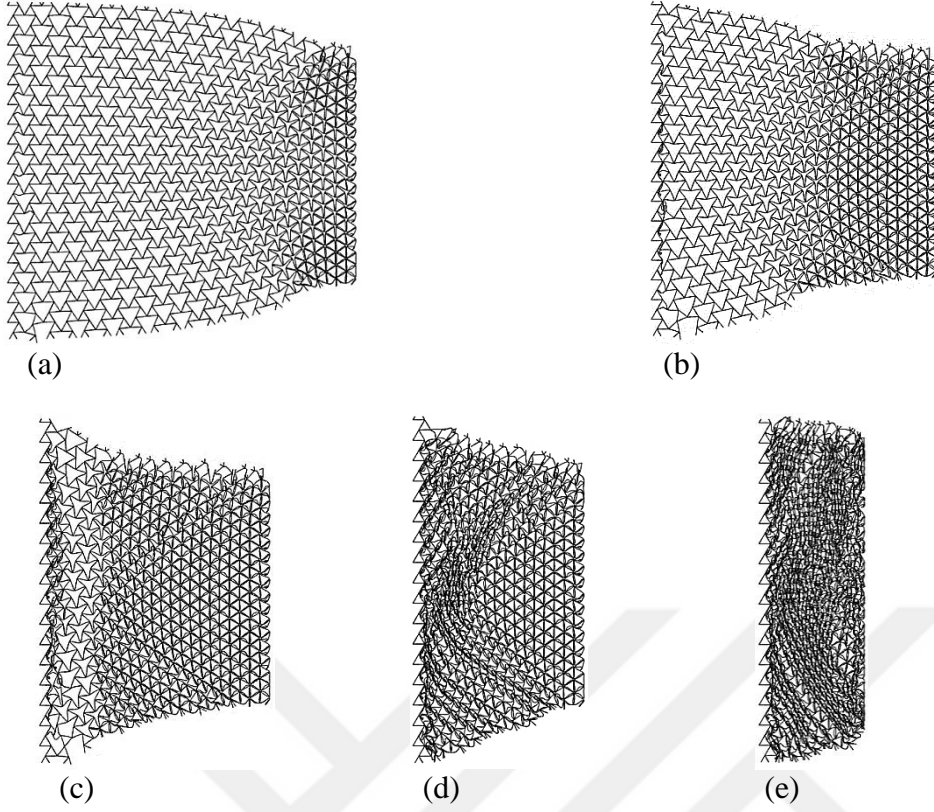
Şekil 2.30 : Altıgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



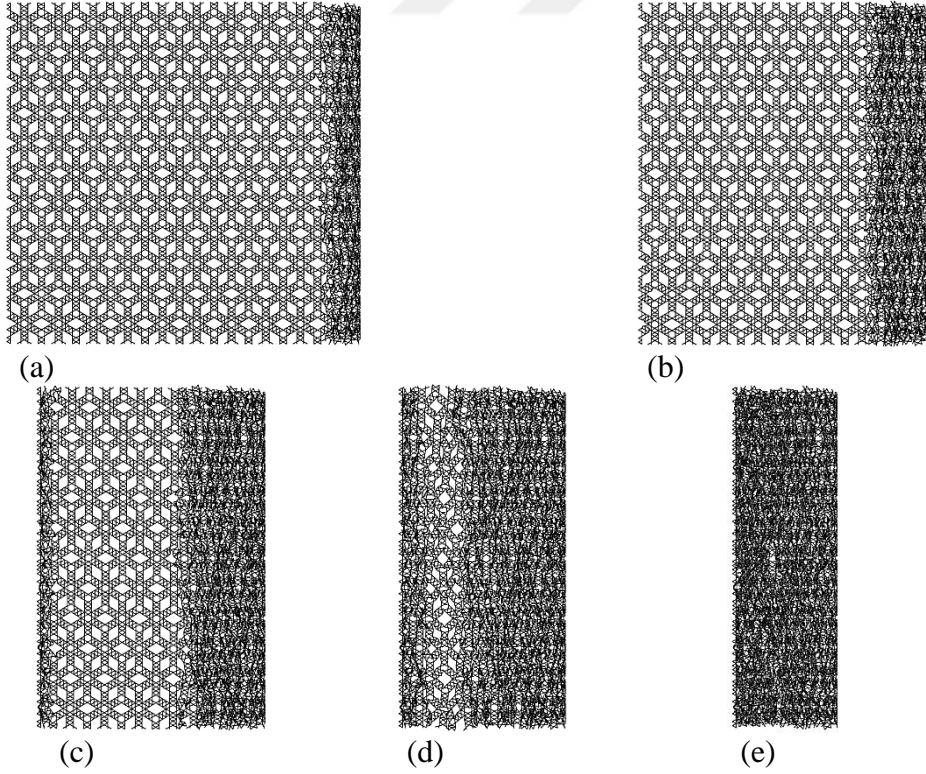
Şekil 2.31 : Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



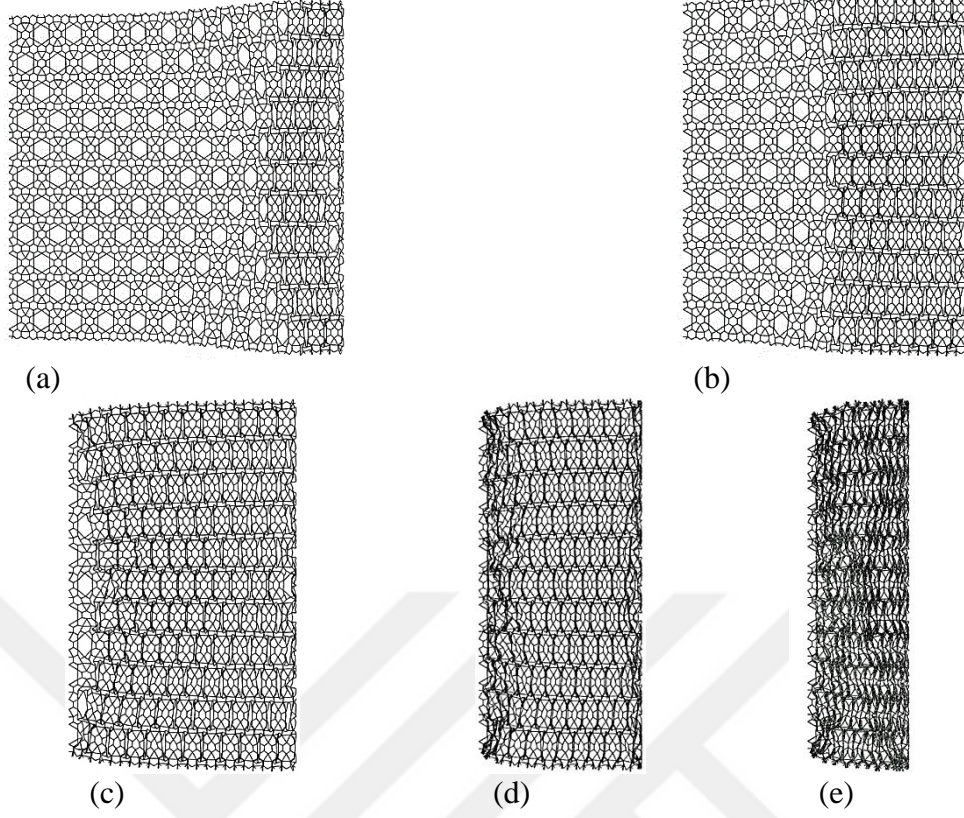
Şekil 2.32 : Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



Şekil 2.33 : Üçgen-Üçgen latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



Şekil 2.34 : DK-I latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.

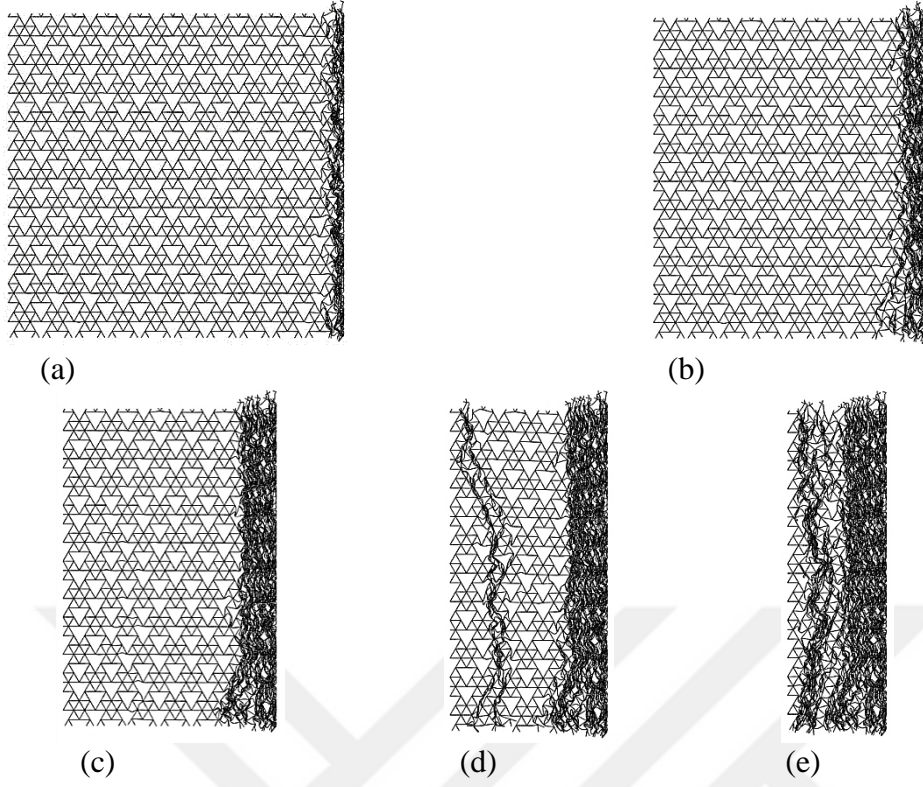


Şekil 2.35 : DK-II latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.

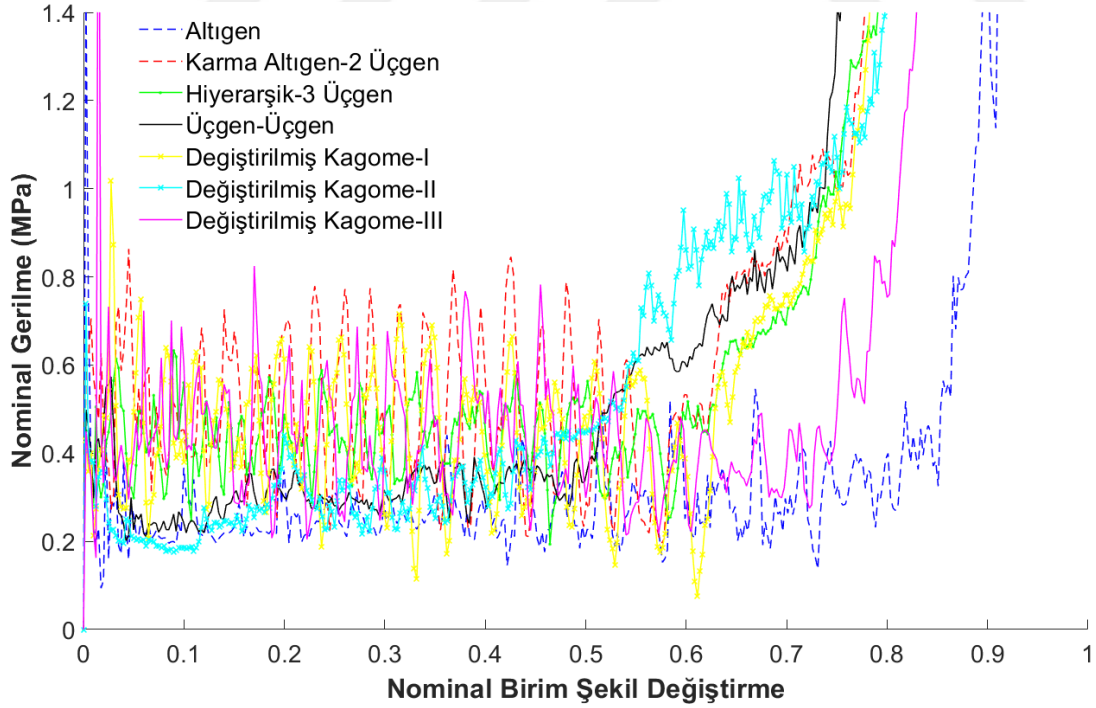
Altıgen, Hiyerarşik-3 Üçgen ve DK-II latislerde, plakanın temas ettiği kenara yakın hücreler yükleme başlangıcında ezilerek “V” şeklinde bir bant oluşturmaktadır. Yükleme devam ettikçe deformasyon, ezilen hücrelerin bu “V” bandına eklenmesi ile devam etmektedir.

Karma Altıgen-2 Üçgen, Üçgen-Üçgen ve DK-I latislerde “V” bandı görülmemektedir. Ezilmenin başlamasıyla birlikte hareketli plakaya yakın konumdaki hücreler ezilmekte ve yüklemenin ilerlemesiyle ezilen hücreler tüm yapıyı kaplamaktadır. Dikkat çeken diğer bir husus ise, Üçgen-Üçgen latisin sanki statik ve geçiş modlarındaki deformasyonlarının diğer latislere nazaran daha benzer bir şekilde gerçekleşmesidir.

Şekil 2.36’da gösterilen DK-III latisde, hareketli plakanın temas ettiği sağ uçtan başlayarak “I” şeklinde bir bant oluşmakta, hareketli plakanın ilerlemesiyle ezilen hücreler “I” bandında eklenmektedir. Yüklemenin ileri bir aşamasında, latisin sabit tutulan kenarında lokal “V” bandı gelişmekte ve latisin deformasyonu bu “I” ve “V” bantlarının birleşmesiyle devam etmektedir.



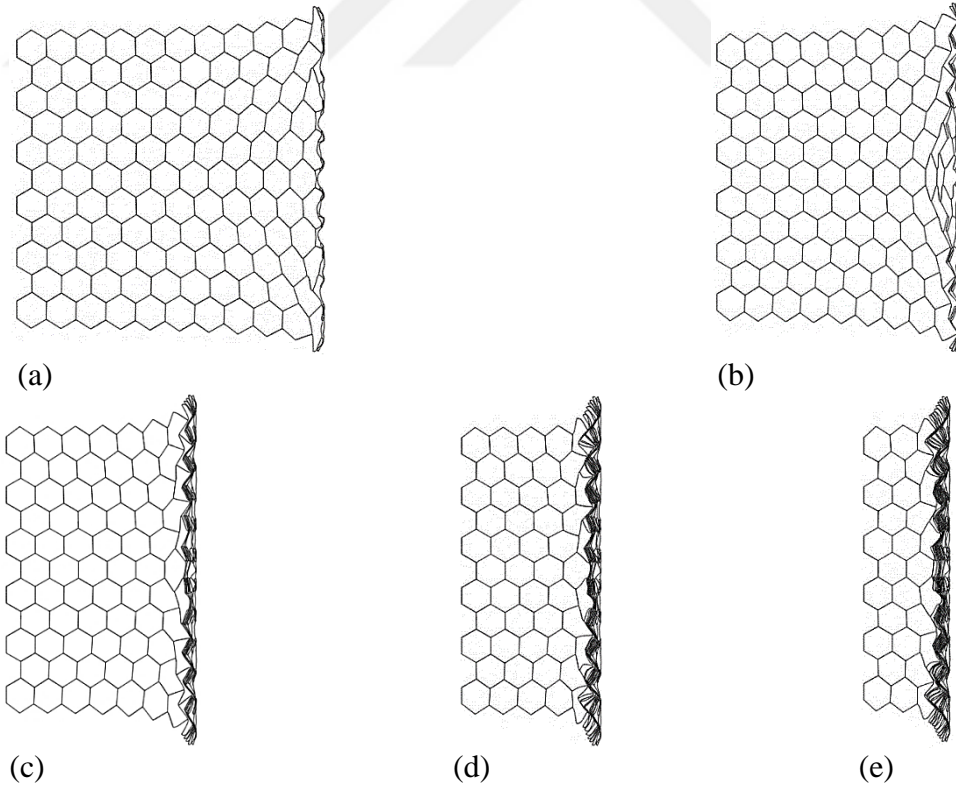
Şekil 2.36 : DK-III latis yapının, geçiş modunda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\epsilon = \%15$, (b) $\epsilon = \%30$, (c) $\epsilon = \%45$, (d) $\epsilon = \%60$, (e) $\epsilon = \%75$.



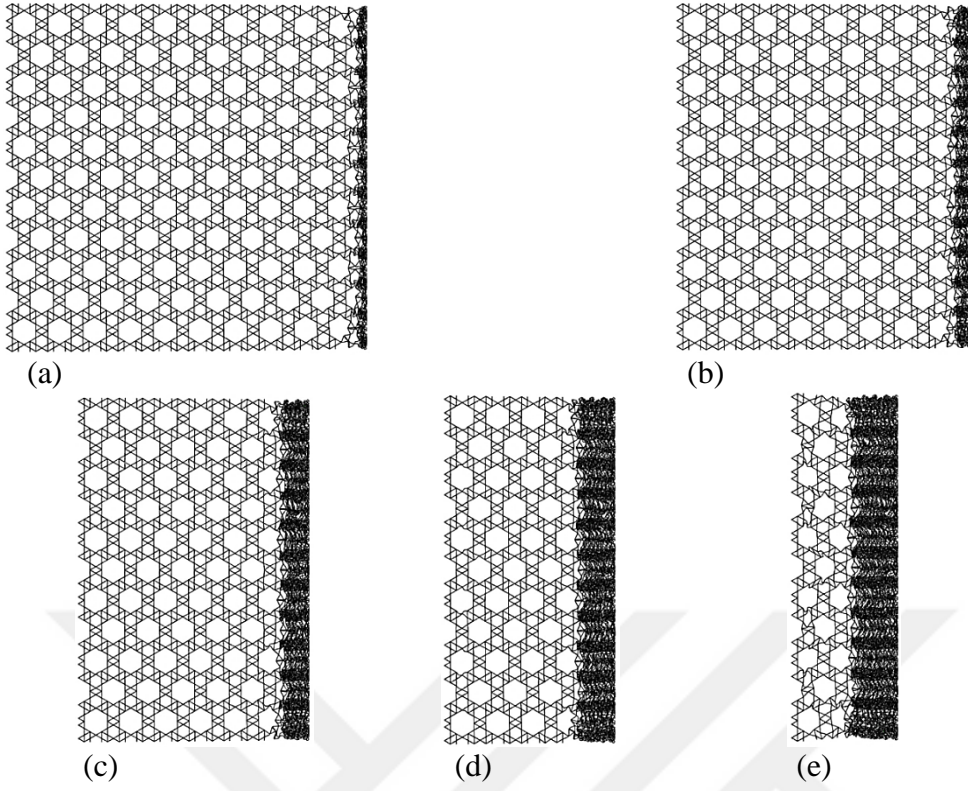
Şekil 2.37 : Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, Değıştirilmiş Kagome-I, Değıştirilmiş Kagome-II ve Değıştirilmiş Kagome-III latis yapıların geçiş deformasyon modunda (yükleme hızı=14000 mm/s) nominal gerilme-nominal birim şekil değıştirme eğrileri.

Atalet etkilerinin en dominant olduğu dinamik deformasyon modu için yapılan analizlerde latis yapıyı ezen hareketli plakanın hızı, Ruan vd. [45] tarafından yapılan çalışma ile uyumlu olarak, 70000 mm/s alınmıştır. Şekil 2.38, 2.39, 2.40, 2.41, 2.42, 2.43 ve 2.44'te sırasıyla Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II ve DK-III latis yapılarının dinamik deformasyon modunda farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri, Şekil 2.45'te ise bu latis yapıların nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir.

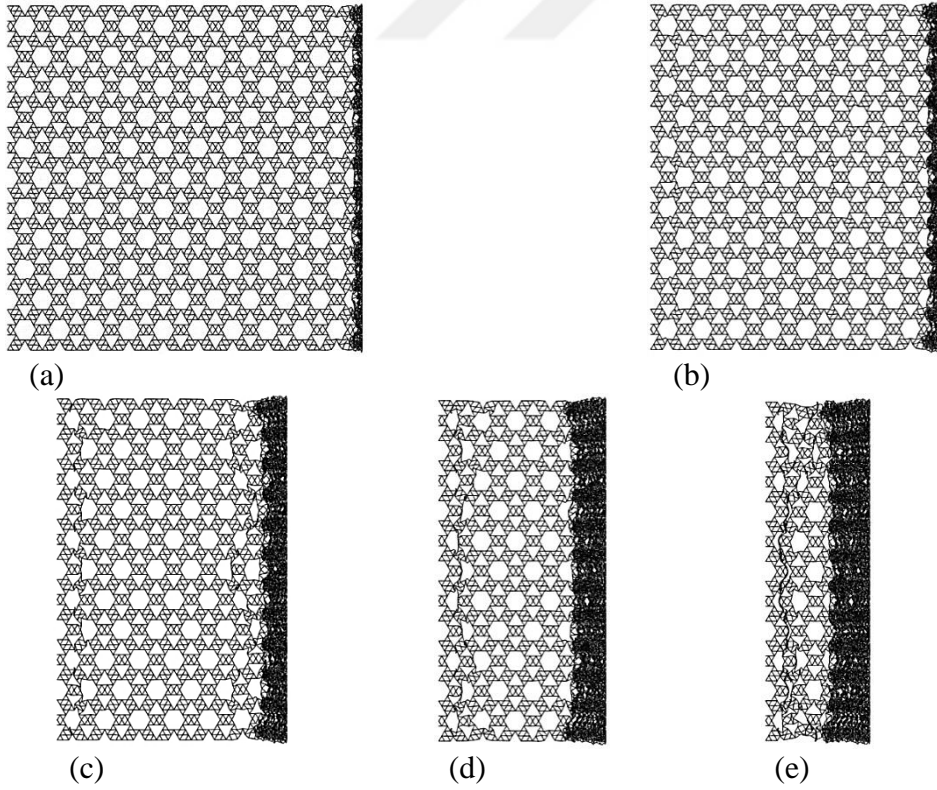
Sanki statik ve geçiş modlarının aksine, dinamik modda tüm latisler benzer bir şekilde deforme olmaktadır. Yükleme başlangıcında hareketli plakanın hareket doğrultusuna dik doğrultuda yan yana dizilmiş hücreler katman katman ezilerek "I" şeklinde bir bant oluşturmaktadır. Bu "I" bandının oluşması birim hücre duvarlarının katman katman burkulması ile meydana gelmektedir. Plaka ilerledikçe ezilen hücreler bu "I" bandına eklenmektedir. Bu çökme mekanizması, her bir sıranın veya bazı durumlarda birden fazla sıranın birlikte çökmesiyle dalgalı bir nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisinin oluşmasına yol açmaktadır.



Şekil 2.38 : Altıgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



Şekil 2.39 : Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon = \%15$, (b) $\varepsilon = \%30$, (c) $\varepsilon = \%45$, (d) $\varepsilon = \%60$, (e) $\varepsilon = \%75$.

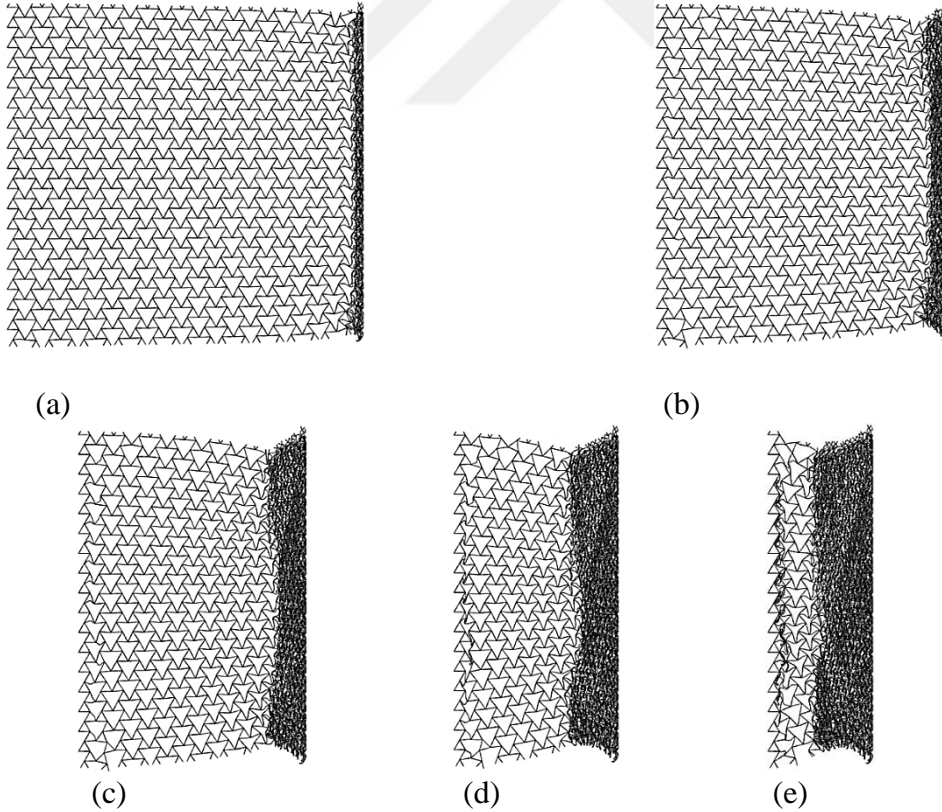


Şekil 2.40 : Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon = \%15$, (b) $\varepsilon = \%30$, (c) $\varepsilon = \%45$, (d) $\varepsilon = \%60$, (e) $\varepsilon = \%75$.

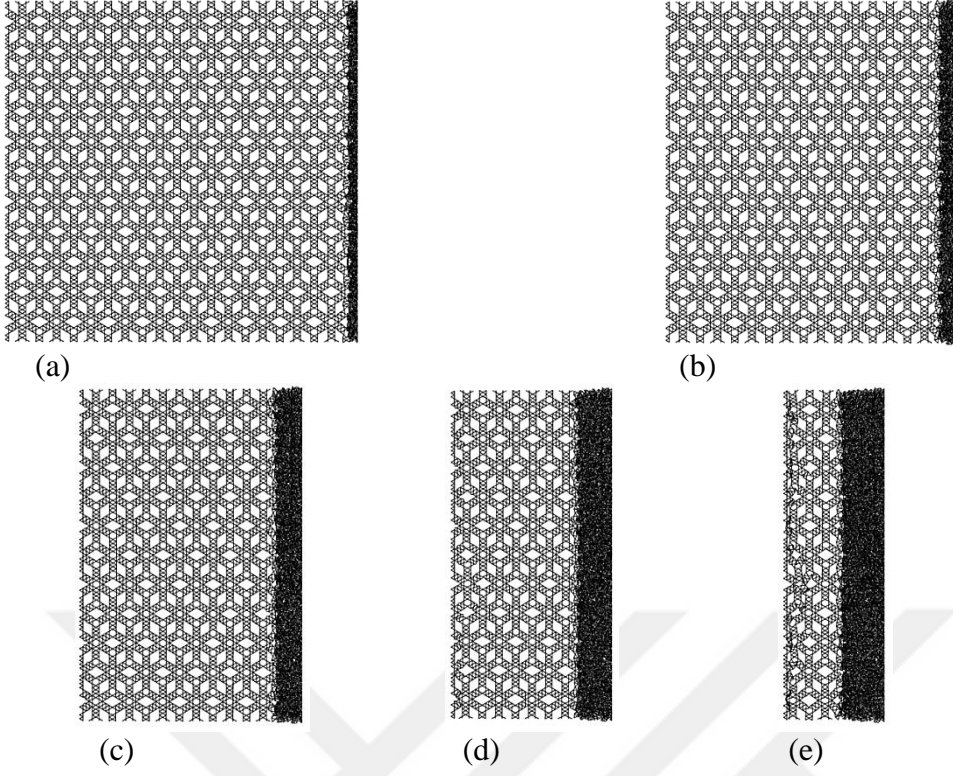
Altıgen latiste ezilme başlangıcında “I” deformasyon şeklinin yanı sıra hareketli plakaya yakın bölgedeki hücrelerin “V” şeklini alma eğilimi olduğu görülmektedir. Atalet etkilerinin baskın olması ve hücrelerin bu deformasyon şeklini devam ettirmek için yeterli zamanı bulamaması nedeniyle ilerleyen birim şekil değiştirme değerlerinde “I” deformasyon şekli baskın hale gelmektedir.

Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, DK-I, DK-II ve DK-III latis yapılarında ezilmenin başlamasıyla birlikte “I” deformasyon şekli hareketli plakaya yakın hücrelerde başlamakta ve latisin deformasyonu, yükleme boyunca ezilen hücrelerin bu banda eklenmesi ile devam etmektedir.

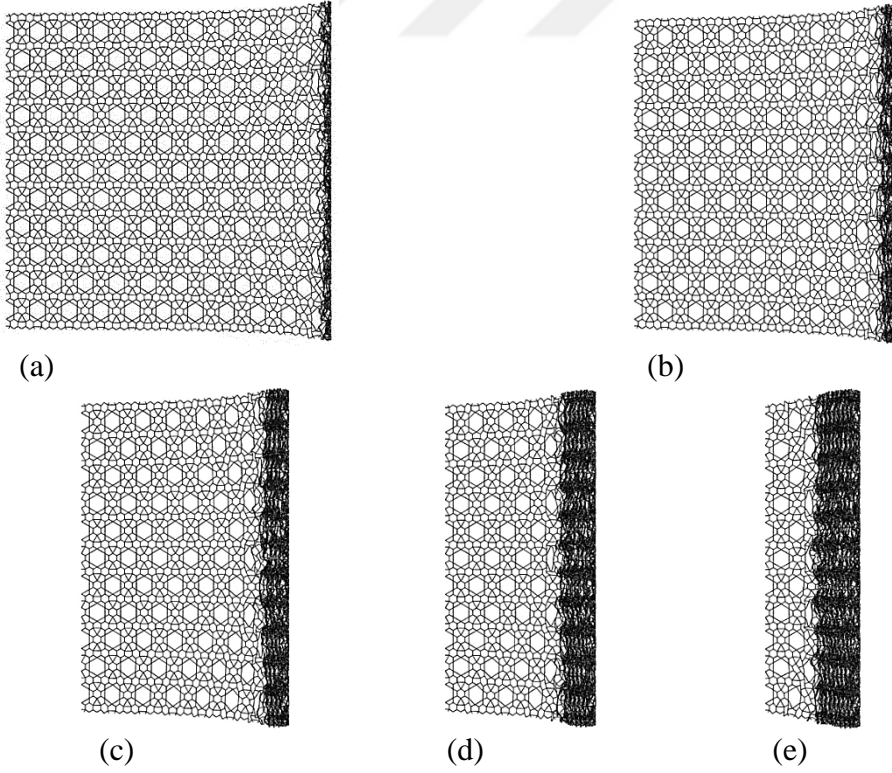
Üçgen-Üçgen latiste sanki statik ve geçiş deformasyon modlarında meydana gelen içe büzülme hareketi, dinamik modda atalet etkilerinin baskın hale gelmesiyle çok daha az görülmektedir. Yükleme başlangıcında hareketli plakaya yakın bölgede bulunan hücreler “I” şeklinde deforme olmakta ve bu bölgenin hemen altında içe büzüşen lokalize hücre bandı gözlemlenmektedir. Yükleminin ilerlemesiyle, ezilen hücreler katman katman çökerek bu “I” bandına eklenmektedir.



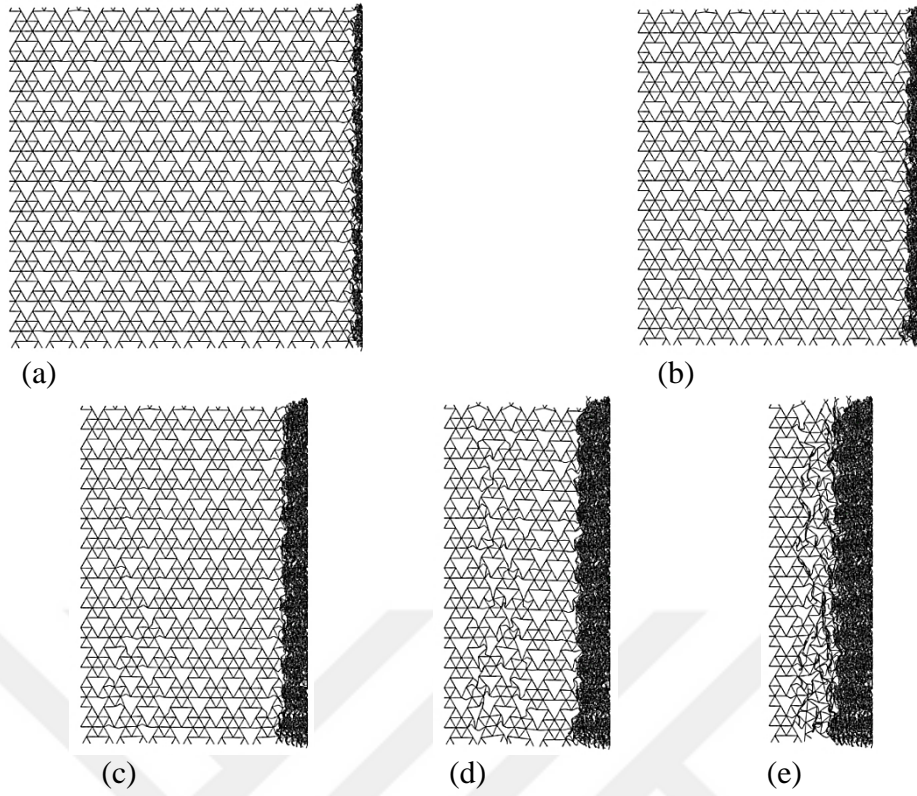
Şekil 2.41 : Üçgen-Üçgen latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değiştirme değerlerinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon = \%15$, (b) $\varepsilon = \%30$, (c) $\varepsilon = \%45$, (d) $\varepsilon = \%60$, (e) $\varepsilon = \%75$.



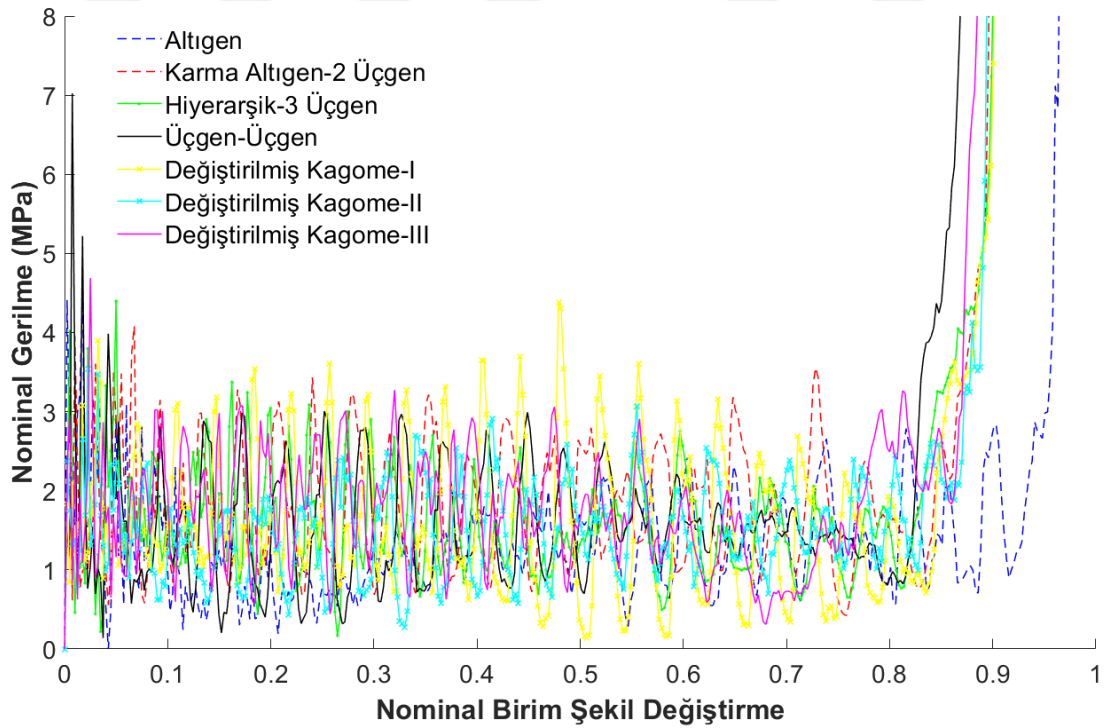
Şekil 2.42 : DK-I latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



Şekil 2.43 : DK-II latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) $\varepsilon=15\%$, (b) $\varepsilon=30\%$, (c) $\varepsilon=45\%$, (d) $\varepsilon=60\%$, (e) $\varepsilon=75\%$.



Şekil 2.44 : DK-III latis yapının, dinamik modda, farklı nominal birim şekil değıştirme değeriinde oluşan ezilme görüntüleri: (a) ε =%15, (b) ε =%30, (c) ε =%45, (d) ε =%60, (e) ε =%75.

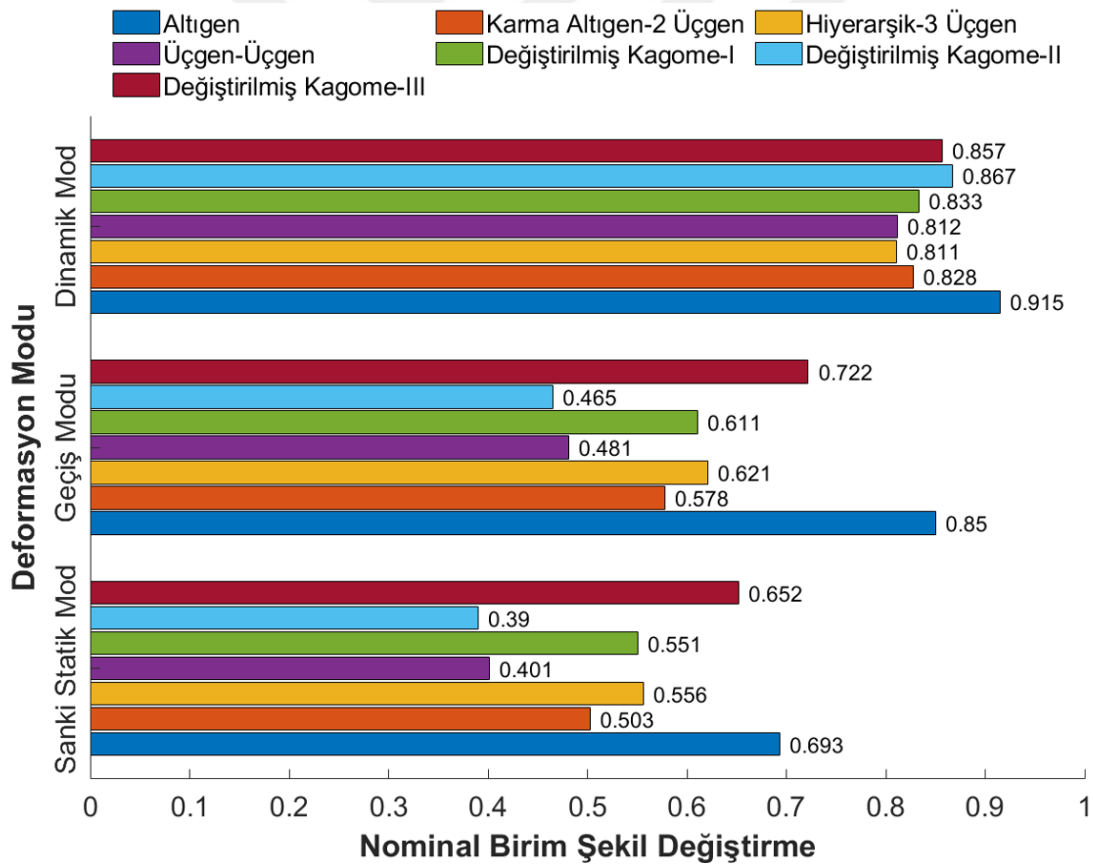


Şekil 2.45 : Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, Değıştirilmiş Kagome-I, Değıştirilmiş Kagome-II ve Değıştirilmiş Kagome-III latis yapılarının dinamik deformasyon modunda (yükleme hızı=70000 mm/s) nominal gerilme-nominal birim şekil değıştirme eğrileri.

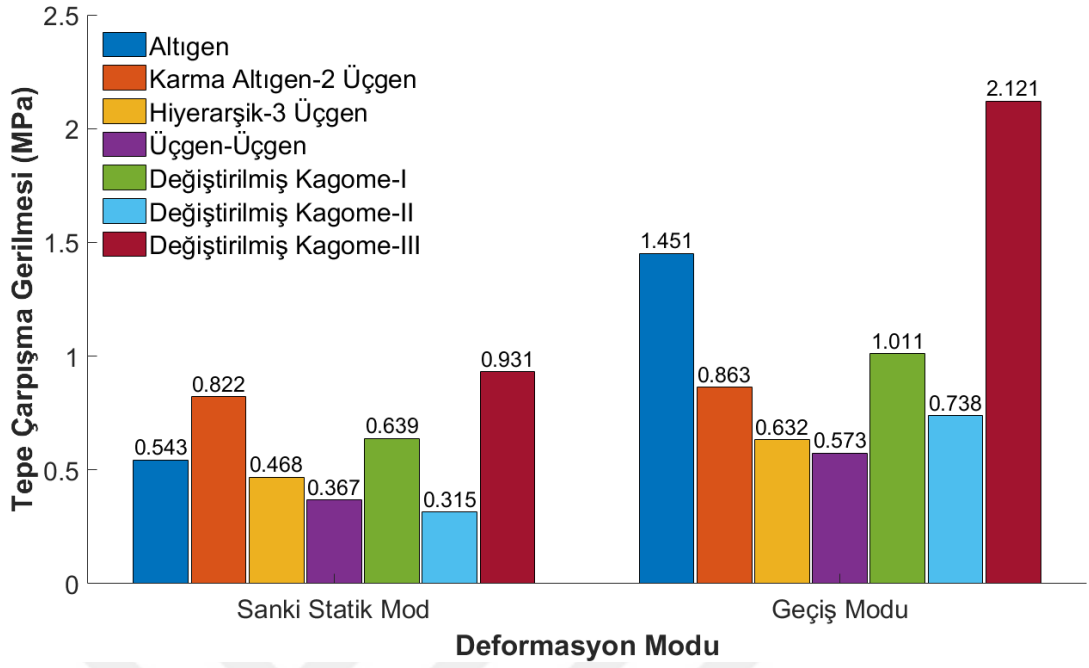
2.3 Latis Malzemelerin Enerji Emme ve Ezilme Davranışlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, tez kapsamında düzlem içi ezilme davranışları SE analizleri ile incelenen, Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II ve DK-III latis yapıların enerji emme ve ezilme davranışları Bölüm 1.1’de açıklanan ve literatürde sıklıkla kullanılan beş farklı metrik kullanılarak karşılaştırılmıştır.

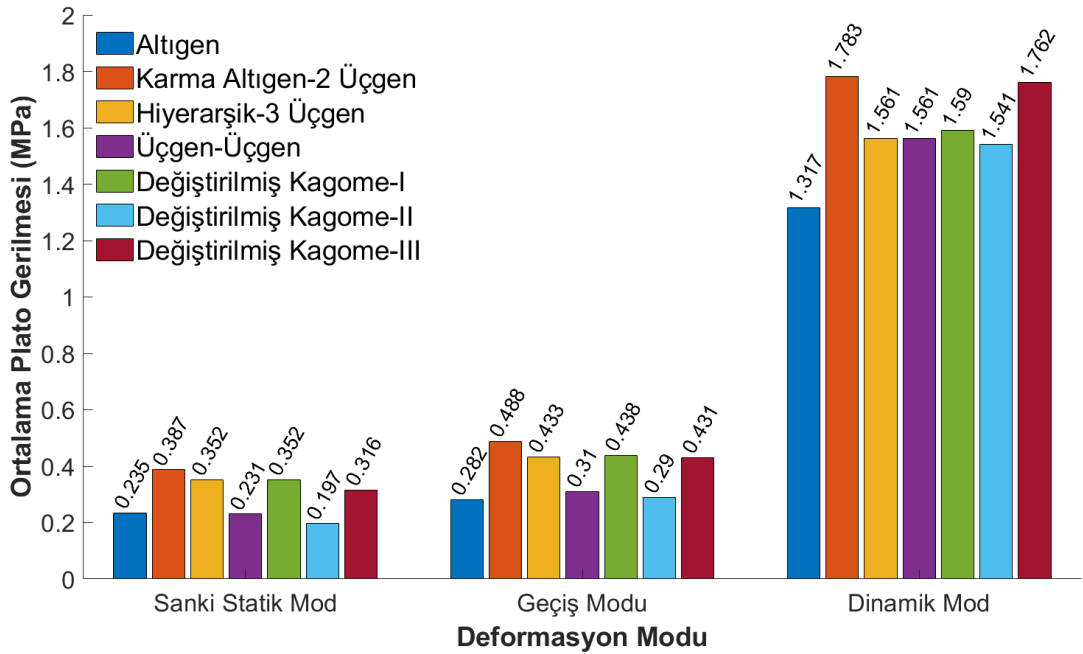
Şekil 2.46, 2.47, 2.48, 2.49 ve 2.50 sırasıyla incelenen farklı latislerin enerji emme ve ezilme davranışlarını karşılaştırmak amacıyla hesaplanan; yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi (YBŞD), tepe çarpışma gerilmesi (TÇG), ortalama plato gerilmesi (OPG), toplam enerji emilimi (TEE) ve ideallik parametresi (İP) metriklerinin farklı latisler için farklı deformasyon modlarındaki değerlerini göstermektedir.



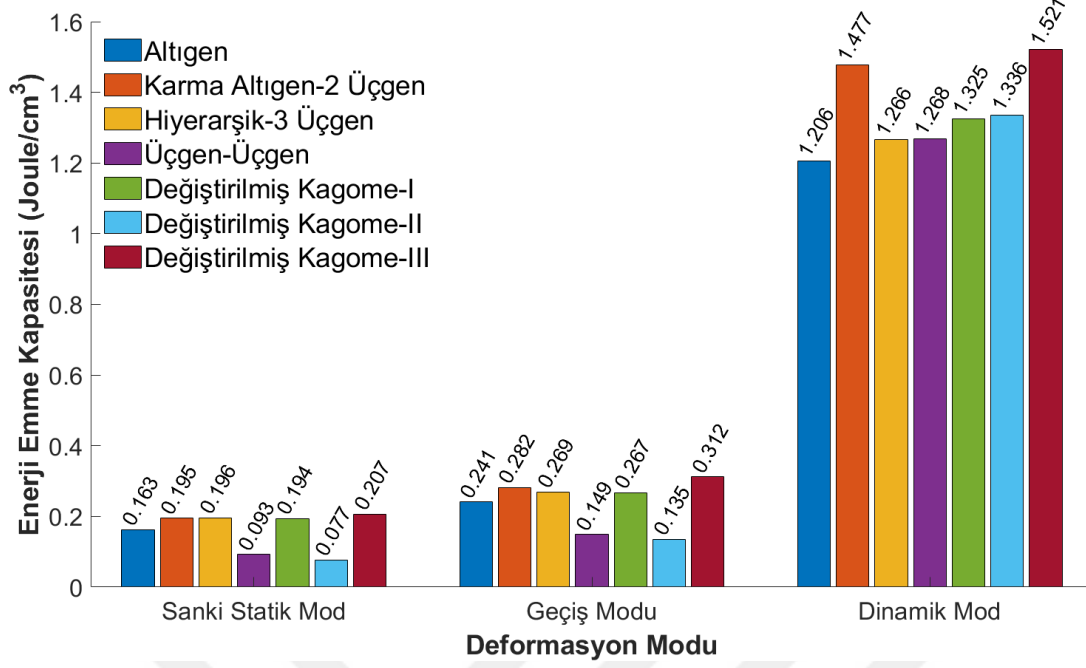
Şekil 2.46 : Tez kapsamında incelenen latis yapıların sanki statik, geçiş ve dinamik deformasyon modlarında yoğunlaşma bölgesine geçtikleri birim şekil değiştirme değerleri.



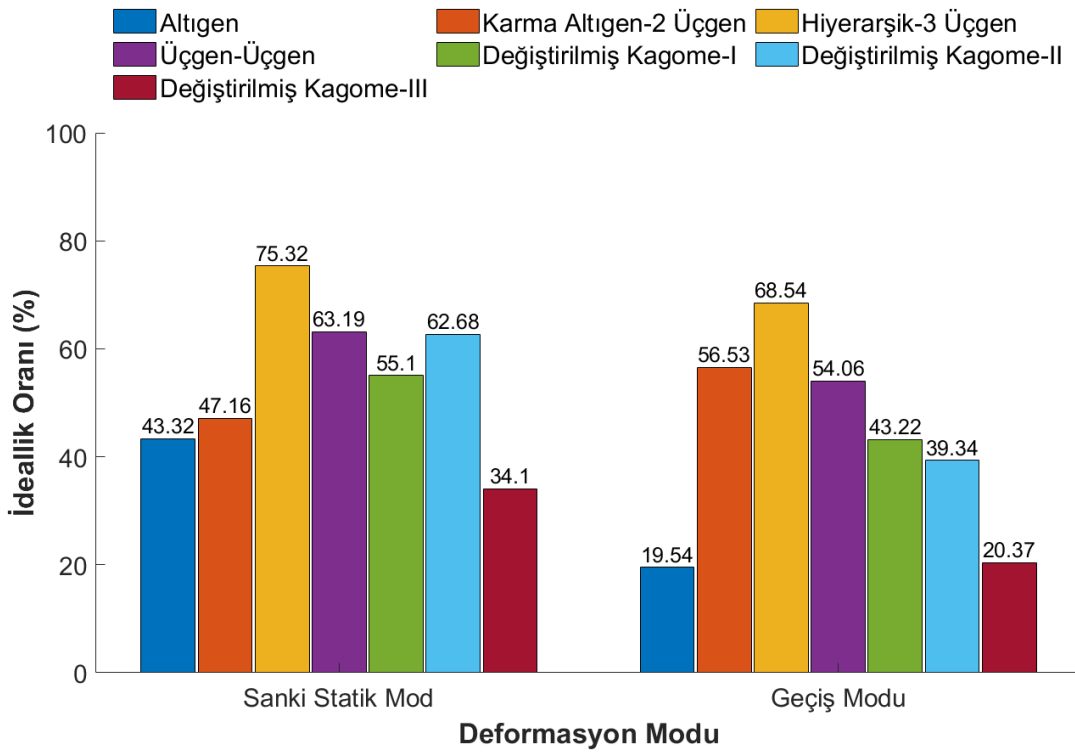
Şekil 2.47 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik ve geçiş deformasyon modlarında tepe çarpışma gerilme değerleri.



Şekil 2.48 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik, geçiş ve dinamik deformasyon modlarında ortalama plato gerilme değerleri.



Şekil 2.49 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik, geçiş ve dinamik deformasyon modlarında enerji emme kapasiteleri.



Şekil 2.50 : Tez kapsamında incenen latis yapıların sanki statik ve geçiş deformasyon modlarında ideallik parametresi değerleri.

Sonuçlar sunulurken tepe çarpışma gerilmesi ve ideallik parametresi yalnızca sanki statik ve geçiş modları için hesaplanmış, dinamik mod için hesaplanmamıştır. Zira SE analizleri dinamik mod için yüksek doğruluk düzeyinde plato gerilmeleri hesaplayabilseler de, tepe gerilmesi için buldukları değerler genel olarak deney sonuçlarıyla uyumlu değildir. Dinamik modda yüksek doğruluk düzeyinde tepe gerilmesi değerleri elde edebilmek için önerilen bir çözüm, SE analiz sonuçlarının filtrelenerek deney sonuçlarıyla uyumlu hale getirilmesidir [117-120]. Ancak bu çözüm her malzeme ve her yükleme hızı için geçerli değildir. Örneğin, Zhang vd. [54] tepe gerilme değerlerinin seçilen filtreleme parametrelerinden çok fazla etkilendiğini ve filtrelemenin deneylerle uyumlu sonuçlar vermediğini belirtmiştir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında tepe çarpışma gerilmesi ve bu gerilme değerlerine bağlı olan ideallik parametresi dinamik mod için hesaplanmamıştır.



3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, üstün mekanik özelliklere sahip, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, DK-I, DK-II ve DK-III adında beş yeni izotropik latis malzemenin düzlem içi enerji emme ve ezilme davranışları sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. Sonuçlar, Altıgen ve Üçgen-Üçgen latislere ait analizlerle karşılaştırılmıştır. Yükleme hızına göre 3 farklı deformasyon modu tanımlanmıştır: sanki statik, geçiş ve dinamik mod. Enerji emme ve ezilme davranışları, literatürde sıklıkla kullanılan beş farklı metrik kullanılarak karşılaştırılmıştır: yoğunlaşma birim şekil değiştirme, tepe çarpışma gerilmesi, ortalama plato gerilmesi, toplam enerji emilimi ve ideallik parametresi.

Bu çalışma kapsamında elde edilen temel bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Yoğunlaşma birim şekil değiştirme her üç deformasyon modunda da Altıgen latis için en yüksektir. Sanki statik ve geçiş deformasyon modlarında yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri benzer bir eğilim göstermektedir. Her iki deformasyon modunda da DK-III latis yapısı Altıgen latisden sonra en yüksek yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerine sahiptir. Üçgen-Üçgen ve DK-II latisler en düşük yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerine sahipken, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen ve DK-I latisler orta düzeyde değerlere sahiptir. Atalet etkilerinin en dominant olduğu dinamik mod için ise tüm latislerde yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri birbirine çok yakındır.
- Sanki statik ve geçiş deformasyon modları için en yüksek tepe çarpışma gerilmesi, sırasıyla, 0.931 MPa ve 2.121 MPa ile DK-III latis yapısına aittir. Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II latis yapıları DK-III latis yapısına kıyasla, sanki statik modda sırasıyla, % 41.6, %11.7, %49.7, %60.6, %31.4 ve %66.2, geçiş modunda ise, %31.6, %59.3, %70.2, %72.9, %52.3 ve %65.2 daha düşük tepe çarpışma gerilmesi sergilemişlerdir.
- Ortalama plato gerilmesi her üç deformasyon modunda da Karma Altıgen-2 Üçgen latis için en yüksek değere sahiptir. Sanki statik ve geçiş deformasyon

modlarında Karma Altıgen-2 Üçgen latisle birlikte Hiyerarşik-3 Üçgen, DK-I ve DK-III latisler, diğer üç latisle göre daha yüksek değerlere sahiptir. Dinamik modda DK-III latis, Karma Altıgen-2 latisle en yakında değere sahiptir. Altıgen latis dinamik modda en düşük ortalama çarpışma değerine sahipken, diğer dört latis hemen hemen aynı değerlere sahip olmakla birlikte orta düzeyde ortalama plato gerilmesi üretmişlerdir.

- Tüm deformasyon modlarında en yüksek enerji emme kapasitesine sahip latis DK-III'tür. Hem sanki statik hem de geçiş deformasyon modunda en düşük enerji emme kapasitesine sahip latis DK-II'dir. Sırasıyla, sanki statik ve geçiş modu için Altıgen latisle kıyasla %52.7 ve %43.9, Üçgen-Üçgen latisle kıyasla %17.2 ve %9.4 daha az enerji emme kapasitesine sahiptir. DK-II latis yapısı haricinde tez kapsamında incelenen tüm latisler hem Altıgen hem de Üçgen-Üçgen latisle kıyasla daha yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir. Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, DK-I ve DK-III latis yapıları, sanki statik mod için sırasıyla, Altıgen latisle kıyasla %19.6, %20.2, %19 ve %27, Üçgen-Üçgen latisle kıyasla %109.7, %110.7, %108.6 ve %122.6, geçiş modu için sırasıyla, Altıgen latisle kıyasla %17, %11.6, %10.8 ve %29.5, Üçgen-Üçgen latisle kıyasla, %89.3, %80.5, %79.2 ve %109.4 daha yüksek enerji emme kapasitesine sahiptirler. Dinamik modda ise Altıgen latis en düşük enerji emme kapasitesine sahiptir. Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen- Üçgen, DK-I, DK-II ve DK-III latis yapıları dinamik modda sırasıyla, Altıgen latisle kıyasla, %22.5, %5, %5.1, %9.9, %10.8 ve %26.1 daha yüksek enerji emme kapasitelerine sahiptir.
- Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapısı, sanki statik ve geçiş modlarında en yüksek ideallik parametresi değerine sahiptir. İdeallik parametresi açısından diğer latisler, ideal bir enerji emiciye en yakından en uzağa doğru, sanki statik modda Üçgen-Üçgen, DK-II, DK-I, Karma Altıgen-2 Üçgen, Altıgen ve DK-III olarak, geçiş modunda Karma Altıgen-2 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II, DK-III ve Altıgen latis olarak sıralanmaktadır.
- Statik ve geçiş deformasyon modları için, sonsuz küçük deformasyon altında negatif Poisson oranına sahip latislerin, pozitif ve sıfır Poisson oranına sahip latislere kıyasla daha yüksek ortalama plato gerilmelerine sahip olduğu

gözlemlenmiştir. Ancak dinamik modda, ortalama plato gerilme değerleri ile Poisson oranları arasında belirgin bir ilişki tespit edilmemiştir.

- Hem sanki statik hem de geçiş deformasyon modunda, negatif Poisson oranına sahip latisler, pozitif Poisson oranına sahip latislere kıyasla daha yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir. Dinamik mod için ise Poisson oranı ile enerji emme kapasitesi arasında sistematik bir parametre gözlenmemiştir.
- Geçiş deformasyon modunda, negatif Poisson oranına sahip latisler, pozitif ve sıfır Poisson oranına sahip latislere kıyasla daha yüksek ideallik parametresine sahiptir. Ancak sanki statik deformasyon modu için, Poisson oranı ve ideallik parametresi açısından bir ilişki bulunmamaktadır.

Elde edilen bu sonuçlar, tez kapsamında incelenen Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, DK-I ve DK-III latislerin, enerji emme uygulamalarında sıklıkla kullanılan Altıgen ve Üçgen-Üçgen latislere önemli rakipler olduklarını ortaya koymaktadır. Gelecek dönemde yapılacak çalışmalar ile latislerin Poisson oranı, hücre sayıları, bağıl yoğunluk ile enerji emme ve ezilme davranışları arasındaki ilişki daha ileri düzeye taşınabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Ashby, M., Gibson, L., Wegst, U. G. and Olive, R.** (1995). The mechanical properties of natural materials. i. material property charts. *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 450, 123-140.
- [2] **Gibson, L. J.** (2004). Biomechanics of cellular solids. *Journal Of Biomechanics*, 38, 377-399
- [3] **Lorna J. Gibson and Michael F. Ashby.** (1997). Cellular solids structure and properties (Second Edition). *Cambridge University Press*.
- [4] **Naboni, R. and Kunic, A.** (2017). Design and additive manufacturing of lattice-based cellular solids at building scale. *XXI Congress of the Ibero-American Society of Digital Graphics*, Milano, Italy, November 22-24.
- [5] **Seki, Y., Bodde, S. G. and Meyers, M. A.** (2009). Toucan and hornbill beaks: A comparative study. *Acta Biomaterialia*, 6, 331-343.
- [6] **Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J. and Wen, G.** (2022). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304, 116397.
- [7] **He, Q., Wang, Y., Gu, H., Feng, J. and Zhou, H.** (2020). Dynamic crushing analysis of a circular honeycomb with leaf vein branched characteristic. *Mechanics of Materials*, 153, 103566.
- [8] **Gizejewska, A., Nawrocka, A., Szkoda, J., Zmudzki, J., Jaroszewski, J. and Giżejowski, Z.** (2016). Variations of selected trace element contents in two layers of red deer antlers. *Journal of Veterinary Research*, 60, 467-471.
- [9] **Xiang, J. and Du, J.** (2017). Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb structure under axial impact loading. *Materials Science & Engineering A*, 696, 283-289.
- [10] **Evans, A. G., Hutchinson, J.W. and Ashby, M.** (1998). Multifunctionality of cellular metal systems. *Progress in Materials Science*, 43, 171-221.
- [11] **Nelissen, W., Ayas, C. and Tekoğlu, C.** (2019). 2D lattice material architectures for actuation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 124, 83-101.
- [12] **Onck, P. R.** (2002). Cosserat modeling of cellular solids Modélisation des solides cellulaires selon cosserat. *Comptes Rendus Mécanique*, 330, 717-722.
- [13] **Jia, Z., Liu, F., Jiang, X. and Wang, L.** (2020). Engineering lattice metamaterials for extreme property, programmability, and multifunctionality. *Journal of Applied Physics*, 127, 150901.

- [14] **Ma, C., Lei, H., Hua, J., Bai, Y., Liang, J. and Fan, D.** (2018). Experimental and simulation investigation of the reversible bi-directional twisting response of tetra-chiral cylindrical shells. *Composite Structures*, 203, 142-152.
- [15] **Mckown, S., Shen, Y., Brookes, W. K., Sutcliffe, C. J., Cantwell, W. J., Langdon, G .S., Nurick, G.N. and Theobald, M.D.** (2007). The quasi-static and blast loading response of lattice structures. *International Journal of Impact Engineering*, 35, 795-810.
- [16] **Khosroshahi, S. F., Tsampas, S. A. and Galvanetto, U.** (2018). Feasibility study on the use of a hierarchical lattice architecture for helmet liners. *Materials Today Communications*, 14, 312-323.
- [17] **Lefebvre, L., Banhart, J. and Dunand, D. C.** (2008). Porous metals and metallic foams current status and recent developments. *Advanced Engineering Materials*, 10, 775-787.
- [18] **Garner, E., Wub, J. and Zadpoor, A. A.** (2022). Multi-objective design optimization of 3D micro-architected implants. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 396, 115102.
- [19] **Hou, W., Yang, X., Zhang, W. and Xia, Y.** (2017). Design of energy-dissipating structure with functionally graded auxetic cellular material. *International Journal of Crashworthiness*, 23, 366-376.
- [20] **Nowpada, S., Chirwa, E. C., Myler, P. and Matsika, E.** (2010). Aluminum egg-box panel as an energy absorber for pedestrian protection. *Advanced Engineering Materials*, 12(7), 591-595.
- [21] **Wei, K., Cheng, X., Mo, F., Wen, W. and Fang, D.** (2016). Design and analysis of integrated thermal protection system based on lightweight C/SiC pyramidal lattice core sandwich panel. *Materials and Design*, 111, 435-444.
- [22] **Wang, X., Li, A., Liu, X. and Wan, X.** (2022). Thermal insulation and compressive performances of 3D printing flexible load-bearing and thermal insulation integrated lattice. *Materials*, 15(23), 8625.
- [23] **Syam, W. P., Jianwei, W., Zhao, B., Maskery, L., Elmadih, W. and Leach, R.** (2018). Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation. *Precision Engineering*, 52, 494-506.
- [24] **Rifaie, M. A., Abdulhadi, H. and Mian, A.** (2021). Advances in mechanical metamaterials for vibration isolation: A review. *Advanced in Mechanical Engineering*, 14(3), 1-20.
- [25] **Kang, D., Parka, S., Son, Y., Yeon, S., Kim, S. H. and Kim, I.** (2019). Multi-lattice inner structures for high-strength and light-weight inmetal selective laser melting process. *Materials and Design*, 175, 107786.
- [26] **Yin, S., Chen, H., Wu, Y., Li, Y. and Xu, J.** (2017). Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood. *Composite Structures*, 201, 131-140.

- [27] **Wallach, J. ve Gibson, L. (2001).** Mechanical behavior of a three-dimensional truss material. *International Journal of Solids and Structures*, 38, 7181–7196.
- [28] **Li, T., Jarrar, F., Al-Rub, A. R. and Cantwell, W. (2021).** Additive manufactured semi-plate lattice materials with high stiffness, strength and toughness. *International Journal of Solids and Structures*, 230-231, 111153.
- [29] **Wei, K., Chen, H., Pei, Y. and Fang, D. (2016).** Planar lattices with tailorable coefficient of thermal expansion and high stiffness based on dual-material triangle unit. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 86, 173-191.
- [30] **Steeves, C. A., Lucato, S.L.S., He, M., Antinucci, E., Hutchinson, J. W. and Evans, A. G. (2007).** Concepts for structurally robust materials that combine low thermal expansion with high stiffness. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55, 1803-1822.
- [31] **Xu, H. and Pasini, D. (2016).** Structurally efficient three dimensional metamaterials with controllable thermal expansion. *Scientific Reports*, 6, 34924.
- [32] **Henkel, J. and Huttmacher, W. D. (2013).** Design and fabrication of scaffold-based tissue engineering. *BioNanoMaterials*, 14, 171-193.
- [33] **Zhang, C., Lai, Q., Chen, W., Zhang, Y., Mo, L. and Liu, Z. (2023).** Three-dimensional electrochemical sensors for food safety applications. *Biosensors*, 13, 529.
- [34] **Ahmadi, S., Campoli, G., Yavari, S. A., Sajadi, B., Wauthle, R., Xchrooten, J., Weinans, H. and Zadpoor, A. A. (2014).** Mechanical behavior of regular open-cell porous biomaterials made of diamond lattice unit cells. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical*, 34, 106-115.
- [35] **Habib, F. N., Lovenitti, P., Masood, S. H. and Nikzad, M. (2017).** Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 2369-2380.
- [36] **Simpson, J. ve Kazanci, Z. (2020).** Crushing investigation of crash boxes filled with honeycomb and re-entrant (auxetic) lattices. *Thin-Walled Structures*, 150, 106676.
- [37] **Li, W., Fan, H., Bian, Y. and Yang, F. (2021).** Plastic deformation and energy absorption of polycrystalline-like lattice structures. *Materials & Design*, 198, 109321.
- [38] **Evans, A., He, M. Y., Deshpande, V. S., Hutchinson, J. W, Jacobsen, A. J and Carter, W. B. (2010).** Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 947-959.
- [39] **Papka, S. D. and Kyriakides, S. (1998).** Experiments and full-scale numerical simulations of in-plane crushing of a honeycomb. *Acta Materialia*, 46(8), 2765-2776.

- [40] **Khan, M. K., Baig, T. and Mirza, S.** (2012). Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb. *Materials Science and Engineering A*, 539, 135-142.
- [41] **León-Becerra, J., González-Estrada, O. A. ve Quiroga, J.** (2021). Effect of relative density in in-plane mechanical properties of common 3d-printed polylactic acid lattice structures. *Acs Omega*, 44, 29830–29838.
- [42] **Hu, L. L. and Yu, T. X.** (2013). Mechanical behavior of hexagonal honeycombs under low-velocity impact - theory and simulations. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 3152-3165.
- [43] **Hu, L.L. and Yu, T. X.** (2009). Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 467-474.
- [44] **Reid, S. R. and Peng, C.** (1997). Dynamic uniaxial crushing of wood. *International Journal of Impact Engineering*, 19, 531-570.
- [45] **Ruan, D., Lu, G., Wang, B. and Yu, T. X.** (2002). In-plane dynamic crushing of honeycombs—a finite element study. *International Journal of Impact Engineering*, 28, 161-182.
- [46] **Hu, L., You, F. and Yu, T.** (2012). Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs. *Materials and Design*, 46, 511-523.
- [47] **Ivanez, I., Fernandez-Canadas, L. M. and Sanchez-Saez, S.** (2017). Compressive deformation and energy-absorption capability of aluminium honeycomb core. *Composite Structures*, 174, 123-133.
- [48] **Li, Z., Wang, T., Jiang, Y., Wang, L. and Liu D.** (2018). Design-oriented Crushing Analysis of Hexagonal Honeycomb Core under In-plane Compression. *Composite Structures*, 187, 429-438.
- [49] **Pehlivan, L. and Baykasoğlu, C.** (2019). An experimental study on the compressive response of CFRP honeycombs with various cell configurations. *Composites Part B*, 162, 653-661.
- [50] **Chung, J. and Waas, A. M.** (2001). Compressive response of circular cell polycarbonate honeycombs under inplane biaxial static and dynamic loading. Part I experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 27, 729-754.
- [51] **Lin, T., Chen, T. and Huang, J.** (2012). In-plane elastic constants and strengths of circular cell honeycombs. *Composites Science and Technology*, 72, 1380-1386.
- [52] **Gotkhindi, T. P. and Simha, K. R. Y.** (2015). In-plane elastic responses of circular cell honeycombs and bundled circular tubes in a diamond array structure. *Composite Structures*, 134, 311-330.
- [53] **Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M. and Zadpoor, A. A.** (2016). Mechanical properties of additively manufactured octagonal honeycombs. *Materials Science and Engineering C*, 69, 1307-1317.

- [54] **Zhang, D., Fei, Q. and Zhang, P.** (2017). In-plane dynamic crushing behavior and energy absorption of honeycombs with a novel type of multi cells. *Thin-Walled Structures*, 117, 199-210.
- [55] **Yang, X., Xi, X., Pan, Q. and Liu, H.** (2019). In-plane dynamic crushing of a novel circular-celled honeycomb nested with petal-shaped mesostructure. *Composite Structures*, 226, 111219.
- [56] **Wang, Y., Xue, P. and Wang, J. P.** (2011). Comparing Study of Energy-absorbing Behavior for Honeycomb Structures. *Key Engineering Materials*, 462-463, 13-17.
- [57] **Zhonggang Wang.** (2019). Recent advances in novel metallic honeycomb structure. *Composites Part B*, 166, 731-741.
- [58] **Mousanezhad, D., Haghpanah, B. Ghosh, R., Hamouda, A. S., Nayeb-Hashemi, H. and Vaziri, A.** (2016). Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 6, 81-96.
- [59] **Donoghue, J. P., Alderson, K. L. and Evans, K. E.** (2009). The fracture toughness of composite laminates with a negative Poisson's ratio. *Physica Status Solidi B*, 246(9), 2011-2017.
- [60] **Zhang, J., Lu, G. and You, Z.** (2020). Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures A review. *Composites Part B*, 201, 108340.
- [61] **Lakes, R. S. and Elms, K.** (1993). Indentability of Conventional and Negative Poisson's Ratio Foams. *Journal of Composite Materials*, 27(12), 1193-1202.
- [62] **Allen, T., Shepherd, J., Hewage, T. A. M., Senior, T., Foster, L. and Alderson, A.** (2015). Low-kinetic energy impact response of auxetic and conventional open-cell polyurethane foams. *Physica Status Solidi B*, 7, 1631-1639.
- [63] **Hu, L. L., Zhou, M. Z. and Deng, H.** (2018). Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation Theoretical analysis and numerical simulation. *Thin-Walled Structures*, 131, 373-384.
- [64] **Photiou, D., Prastiti, N., Sarris, E. and Constantinides, G.** (2016). On the conical indentation response of elastic auxetic materials: Effects of Poisson's ratio, contact friction and cone angle. *International Journal of Solids and Structures*, 81, 33-42.
- [65] **Wei, L., Zhao, X., Yu, Q. and Zhu, G.** (2020). A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength. *Thin-Walled Structures*, 149, 106623.
- [66] **Wang, H., Lu, Z., Yang, Z. and Li, X.** (2018). In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 151, 746-759.
- [67] **Li, Z., Wang, K. F. and Wang, B. L.** (2021). Indentation resistance of brittle auxetic structures Combining discrete representation and continuum model. *Engineering Fracture Mechanics*, 252, 107824.

- [68] **Qi, C., Remennikov, A., Pei, L., Yang, S., Yu, Z. and Ngo, T. D.** (2017). Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels Experimental tests and numerical simulations. *Composite Structures*, 180, 161-178.
- [69] **Yang, C., Vora, H. D. and Chang, Y.** (2018). Behavior of auxetic structures under compression and impact forces. *Mechanical Engineering Technology*, 27(2), 025012.
- [70] **Yang, S., Qi, C., Wang, D., Gao, R., Hu, H. and Shu, J.** (2013). A Comparative Study of Ballistic Resistance of Sandwich Panels with Aluminum Foam and Auxetic Honeycomb Cores. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 589216.
- [71] **Hou, S., Liu, T., Zhang, Z., Han, X. and Qing, Li.** (2015). How does negative Poisson's ratio of foam filler affect crashworthiness. *Materials and Design*, 82, 247–259.
- [72] **Zhou, Z., Zhou, J. and Fan, H.** (2017). Plastic analyses of thin-walled steel honeycombs with re-entrant deformation style. *Materials Science & Engineering A*, 688, 123-133.
- [73] **Qiao, J. X. and Chen, C. Q.** (2015). Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 47-58.
- [74] **Gao, Q., Liao, W. and Wang, L.** (2020). On the low-velocity impact responses of auxetic double arrowed honeycomb. *Aerospace Science and Technology*, 98, 105698.
- [75] **Qi, C., Jiang, F. and Yang, S.** (2021). Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review. *Composites Part B*, 227, 109393.
- [76] **Zhang, D., Fei, Q., Jiang, D. and Li, Y.** (2018). Numerical and analytical investigation on crushing of fractal-like honeycombs with self-similar hierarchy. *Composite Structures*, 195, 289-299.
- [77] **Zhang, D., Fei, Q., Liu, J., Jiang, D. and Li, Y.** (2019). Crushing of vertex-based hierarchical honeycombs with triangular substructures. *Thin-Walled Structures*, 146, 106436.
- [78] **He, Q., Feng, J. and Honggen, Z.** (2019). A numerical study on the in-plane dynamic crushing of self-similar hierarchical honeycombs. *Mechanics of Materials*, 138, 103151.
- [79] **Zhang, Y., Chen, T., Xu, X. and Hu, Z.** (2019). Out-of-plane mechanical behaviors of a side hierarchical honeycomb. *Mechanics of Materials*, 140, 103227.
- [80] **Yin, H., Huang, X., Scarpa, F., Wen, G., Chen, Y. and Zhang, C.** (2018). In-plane crashworthiness of bio-inspired hierarchical honeycombs. *Composite Structures*, 192, 516-527.
- [81] **Tan, H. L., He, Z. C., Li, K. X., Li, E., Cheng, A. G. and Xu, B.** (2019). In-plane crashworthiness of re-entrant hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio. *Composite Structures*, 229, 111415.

- [82] **Mousanezhad, D., Ebrahimi, H., Haghpanah, B., Ghosh, R., Ajdari, A., Hamouda, A. M. S. and Vaziri, A.** (2015). Spiderweb honeycombs. *International Journal of Solids and Structures*, 66, 218–227.
- [83] **Tsang, H. H., Tse, K. M., Chan, K. Y., Lu, G. and Lau, A. K. T.** (2019). Energy absorption of muscle-inspired hierarchical structure Experimental investigation. *Composite Structures*, 226, 11
- [84] **Kostazos, P. K., Lykacos, S. S. A., Kyritsis, P. E. and Manolacos, D. E.** (2021). Quasi-static axial crushing of multi-walled (spiral) aluminium tubes fabricated by roll bending: Experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*, 159, 107237.
- [85] **Çetin, E. and Baykasoğlu, C.** (2019). Energy absorption of thin-walled tubes enhanced by lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 157-158, 471-484.
- [86] **Altın, M., Acar, E. and Güler, M. A.** (2020). Crashworthiness optimization of hierarchical hexagonal honeycombs under out-of-plane impact. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 0, 1-12.
- [87] **Baroutaji, A., Sajjia, M. and Olabi, A.** (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*, 118, 137-163.
- [88] **Zeng, C., Liu, L., Bian, W., Leng, J. and Liu, Y.** (2021). Compression behavior and energy absorption of 3D printed continuous fiber reinforced composite honeycomb structures with shape memory effects. *Additive Manufacturing*, 38, 101842.
- [89] **Feng, G., Li, S., Xiao, L. and Song, W.** (2021). Energy absorption performance of honeycombs with curved cell walls under quasi-static compression. *International Journal of Mechanical Sciences*, 210, 106746.
- [90] **Wen, Z., Sha, Y., Yu, T. X. and Jun, X.** (2018). Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb. *International Journal of Impact Engineering*, 125, 163-172.
- [91] **Abedi, M. M., Nedoushan, R. J., Sheikhzadeh, M. and Yu, W.** (2020). The crashworthiness performance of thin-walled ultralight braided lattice composite columns: Experimental and finite element study. *Composites Part B*, 202, 108413.
- [92] **Görgülüarslan, R. M, Güngör, O. U. and Yıldız, S.** (2021). Energy absorption behavior of stiffness optimized graded lattice structures fabricated by material extrusion. *Meccanica*, 56, 2825-2841.
- [93] **Li, S., Liu, Z., Shim, V. P. M., Guo, Y., Sun, Z., Li, X. and Wang, Z.** (2020). In-plane compression of 3D-printed self-similar hierarchical honeycombs – Static and dynamic analysis. *Thin-Walled Structures*, 157, 106990.
- [94] **Avalle, M., Belingardi, G. and Montanini, R.** (2000). Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *International Journal of Impact Engineering*, 25, 455-472.

- [95] **Miltz, J. and Ramon, O.** (1990). Energy absorption characteristics of polymeric foams used as cushioning materials. *Polymer Engineering and Science*, 30(2), 129-133.
- [96] **Liu, Z., Hao, W., Xie, J., Lu, J., Huang, R. and Wang, Z.** (2015). Axial-impact buckling modes and energy absorption properties of thin-walled corrugated tubes with sinusoidal patterns. *Thin-Walled Structures*, 94, 410-423.
- [97] **Mirowslaw Ferdynus.** (2019). Numerical analysis of energy absorbers in the form of aluminium square section columns with round indentations. *Proceedings of the 15th Conference on Computational Technologies in Engineering*, Jora Wielka, Poland, October 16-19.
- [98] **Kaczynski, P., Karlinski, J. and Hawryluk, M.** (2020). Experimental and numerical studies of the behavior and energy absorption of foam-filled circular tubes. *Archives of Metallurgy and Materials*, 65(2), 521-527.
- [99] **Patel, V., Tiwari, G. and Dumpala, R.** (2020). Review of the crushing response of collapsible tubular structures. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 15, 438-474.
- [100] **Reddy, T. J., Rao, Y. V. D. and Narayanamurthy, V.** (2017). Thin-walled structural configurations for enhanced crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, 23(1), 57-73.
- [101] **Rafukka, I. A.** (2018). Numerical investigations in to crashworthiness characteristics of steel conical tubes. *Nigerian Journal of Technology*, 37(2), 663-667.
- [102] **Dong, J., Li, W. and Fan, H.** (2021). Axial crushing behaviors of buckling induced triangular tubular structures. *Materials and Design*, 201, 109513.
- [103] **Hatami, H. and Nouri, M. D.** (2015). Experimental and numerical investigation of lattice-walled cylindrical shell under low axial impact velocities. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12, 1950-1971.
- [104] **Rezvani, M. J.** (2017). Experimental and numerical simulation investigation on crushing response of foam-filled conical tubes stiffened with annular rings. *Journal of Solid Mechanics*, 9 (2), 291-301.
- [105] **Nouri, M. D., Hatami, H. and Jahromi, A. G.** (2015). Experimental and numerical investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 54(6), 1245-1266.
- [106] **Chukwuemeke William Isaac.** (2019). Crushing response of circular thin-walled tube with non-propagating crack subjected to dynamic oblique impact loading. *International Journal of Protective Structures*, 11(1), 41-68.
- [107] **Ye, H., Ma, J., Zhou, X., Wang, H. and You, Z.** (2019). Energy absorption behaviors of pre-folded composite tubes with the fulldiamond origami patterns. *Composite Structures*, 221, 110904.

- [108] **Reddy, T. J., Narayanamurthy, V. and Rao, Y. V. D.** (2020). Study on Crush Tube's Geometric Cross-sections and Topology for Axial Crashworthiness. *Defence Science Journal*, 70(3), 249-259.
- [109] **Chan, K. C. and Xie, L. S.**, (2002). Dependency of densification properties on cell topology of metal foams. *Scripta Materialia*, 48, 1147-1152.
- [110] **Nieh, T. G., Higashi, K. and Wadsworth, J.** (1999). Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams. *Materials Science and Engineering A*, 283, 105-110.
- [111] **Paul, A. and Ramamurty, U.** (1999). Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam. *Materials Science and Engineering A*, 281, 1-7.
- [112] **Vural, M. and Ravichandran, G.** (2001). Microstructural aspects and modeling of failure in naturally occurring porous composites. *Mechanics of Materials*, 35, 523-536.
- [113] **Xiao, L., Xu, X., Feng, g., Li, S., Song, W. and Jiang Z.** (2022). Compressive performance and energy absorption of additively manufactured metallic hybrid lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 219, 107093.
- [114] **Gao, Z. Y., Yu, T. X. and Zhao, H.** (2008). Mechanical Behavior of Metallic Hollow Sphere Materials: Experimental Study. *Journal of Aerospace Engineering*, 21(4), 206-216.
- [115] **Zhang, X., Liu, Y., Wang, B. and Zhang, Z.** (2010). Effects of defects on the in-plane dynamic crushing of metal honeycombs. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(10), 1290-1298.
- [116] **Zhang, X., An, L., Ding, H., Zhu, X. Y. and El-Rich, M.** (2014). The influence of cell micro-structure on the in-plane dynamic crushing of honeycombs with negative Poisson's ratio. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 17(1), 26-55.
- [117] **Maheo, L., Rio, G. and Grolleaub, V.** (2011). On the use of some numerical damping methods of spurious oscillations in the case of elastic wave propagation. *Mechanics Research Communications*, 38, 81-88.
- [118] **Mirbagheri, Y., Nahvi, H., Parvizian, J. and Düster, A.** (2015). Reducing spurious oscillations in discontinuous wave propagation simulation using high-order finite elements. *Computers and Mathematics with Applications*, 70(7), 1640-1658.
- [119] **Kolman, R., Cho, S. and Park, K.** (2014). On the diminishing of spurious oscillations in explicit finite element analysis of linear and non-linear wave propagation and contact problems. *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, Prague, Czech Republic, October 6-10.
- [120] **Dassault Systèmes Simulia Corp.** (2016). *ABAQUS version 2016 documentation*.



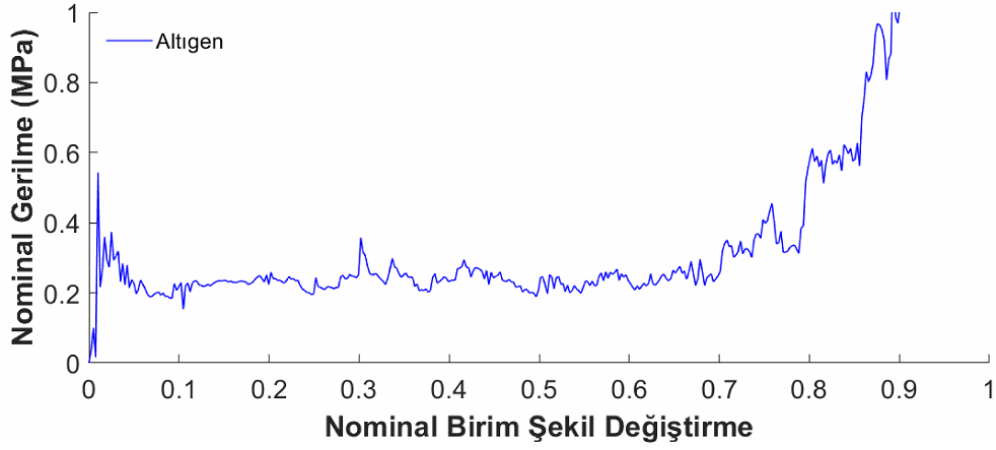
EKLER

EK 1: Tez kapsamında incenen Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II, DK-III latis yapıların sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri.

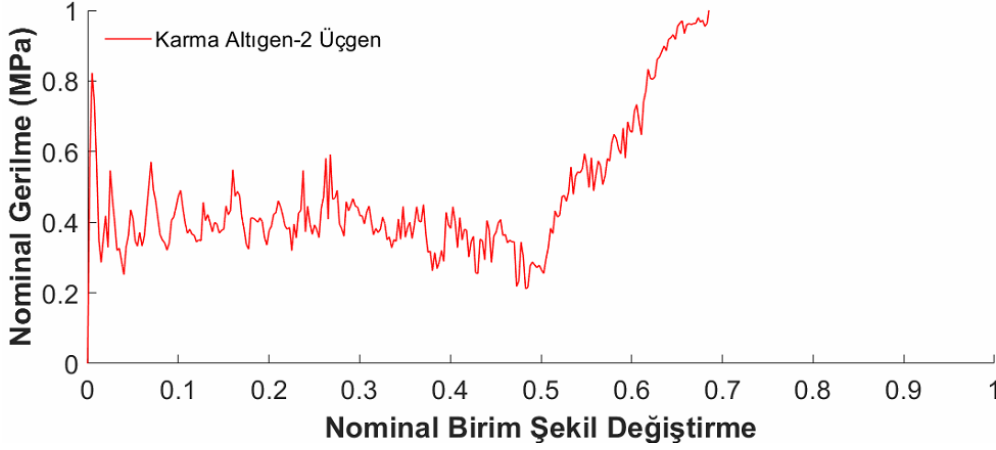
EK 2: Tez kapsamında incenen Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II, DK-III latis yapıların geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri.

EK 3: Tez kapsamında incenen Altıgen, Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-3 Üçgen, Üçgen-Üçgen, DK-I, DK-II, DK-III latis yapıların dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrileri.

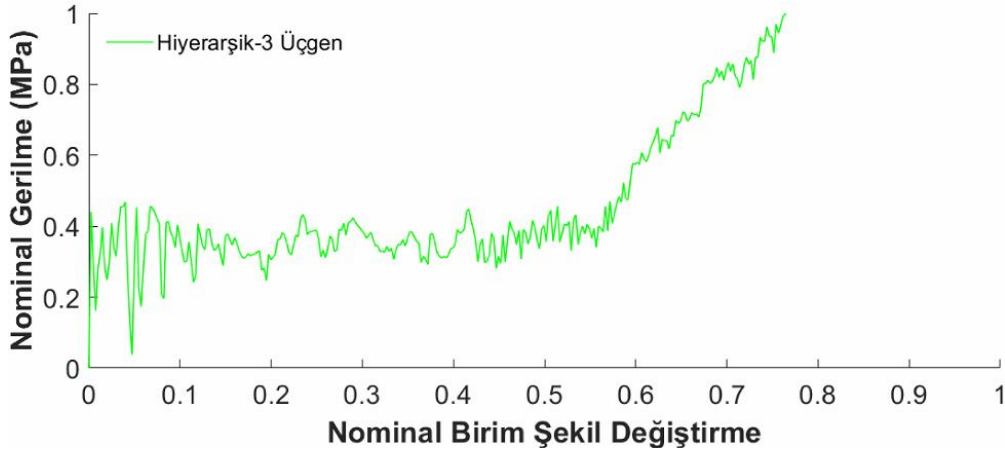
EK 1



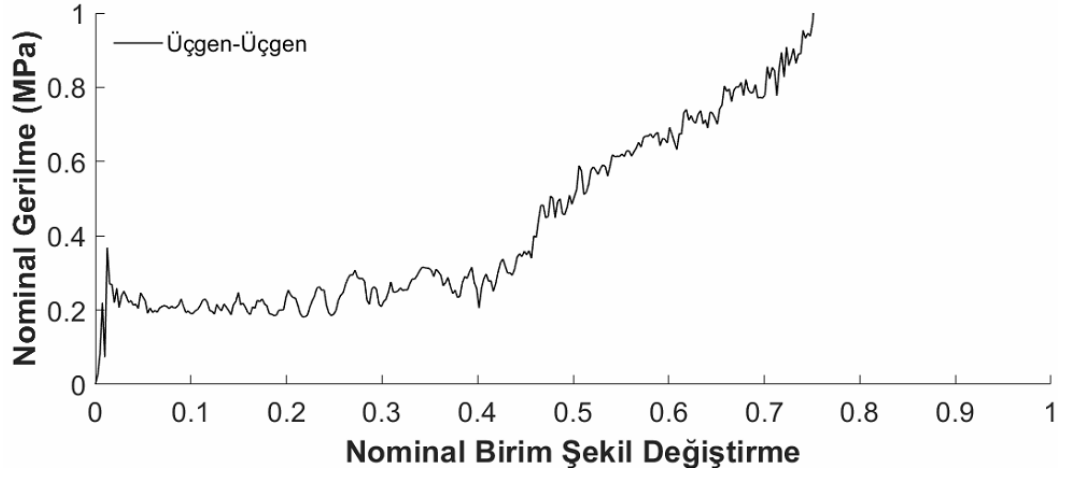
Şekil Ek. 1.1 : Tez kapsamında incenen Altıgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme eğrisi.



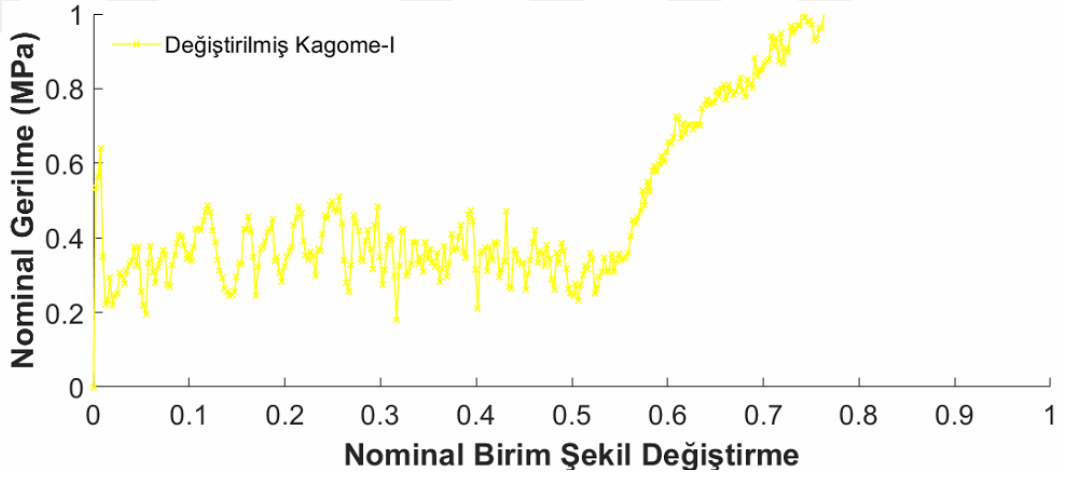
Şekil Ek. 1.2 : Tez kapsamında incenen Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme eğrisi.



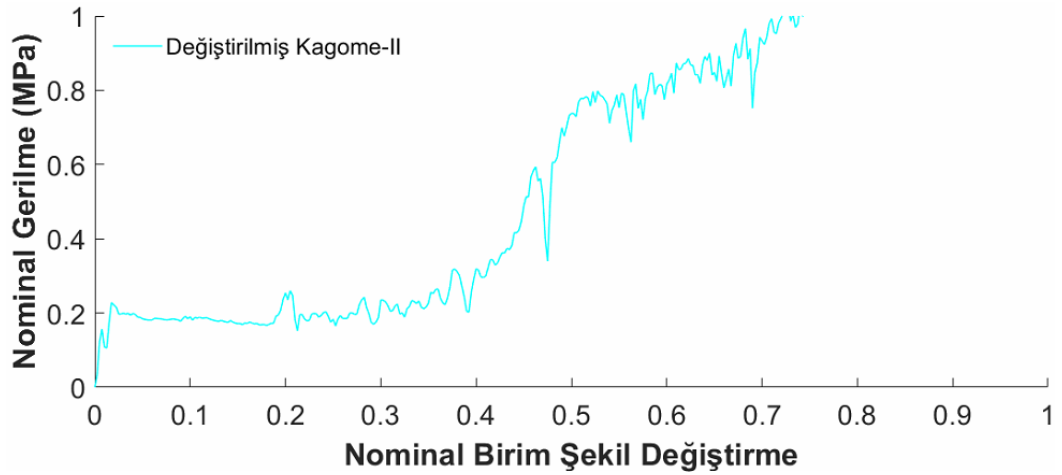
Şekil Ek. 1.3 : Tez kapsamında incenen Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme eğrisi.



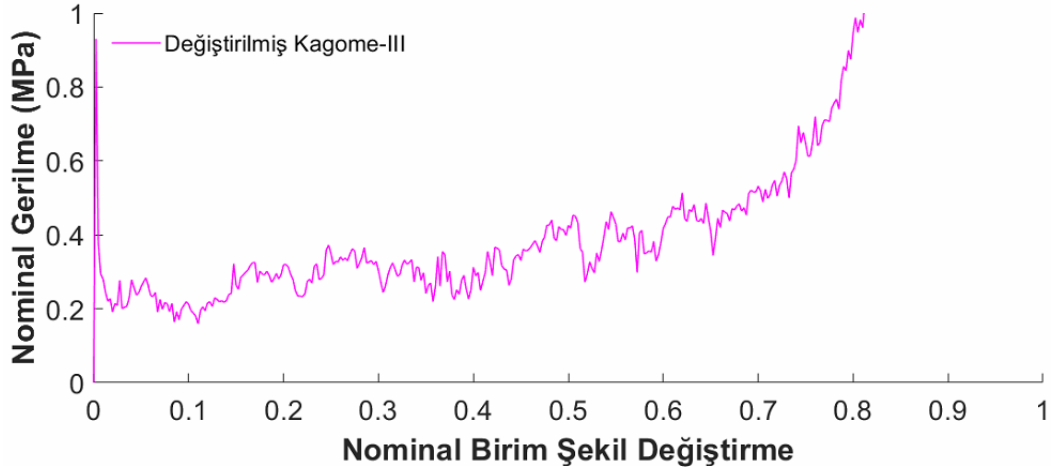
Şekil Ek. 1.4 : Tez kapsamında incenen Üçgen-Üçgen latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme eğrisi.



Şekil Ek. 1.5 : Tez kapsamında incenen DK-I latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme eğrisi.

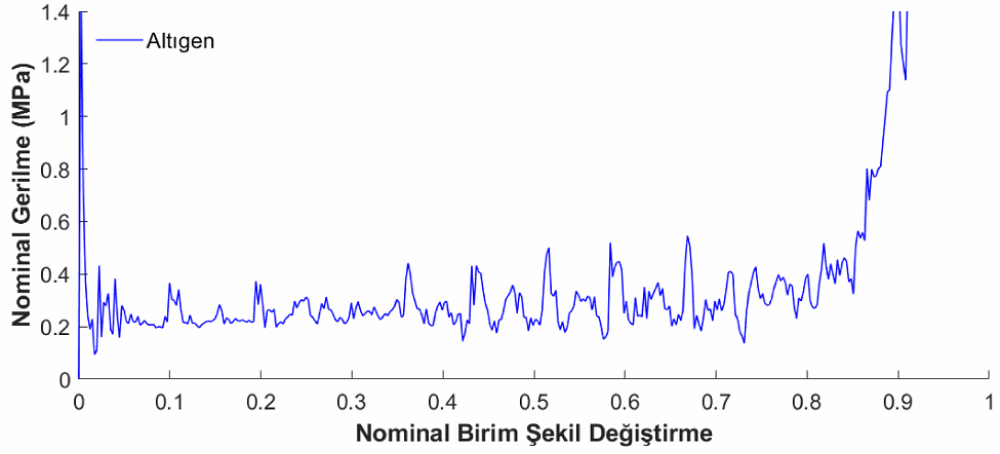


Şekil Ek. 1.6 : Tez kapsamında incenen DK-II latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme eğrisi.

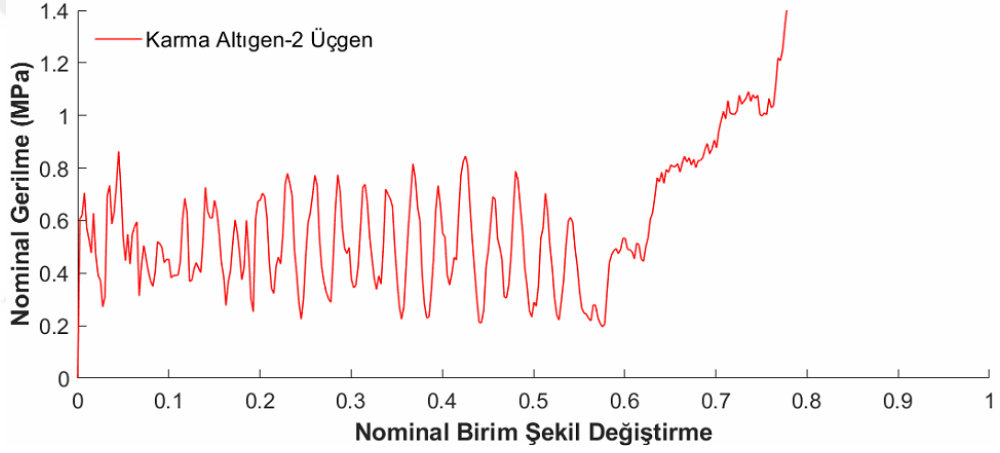


Şekil Ek. 1.7 : Tez kapsamında incenen DK-III latis yapının sanki statik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.

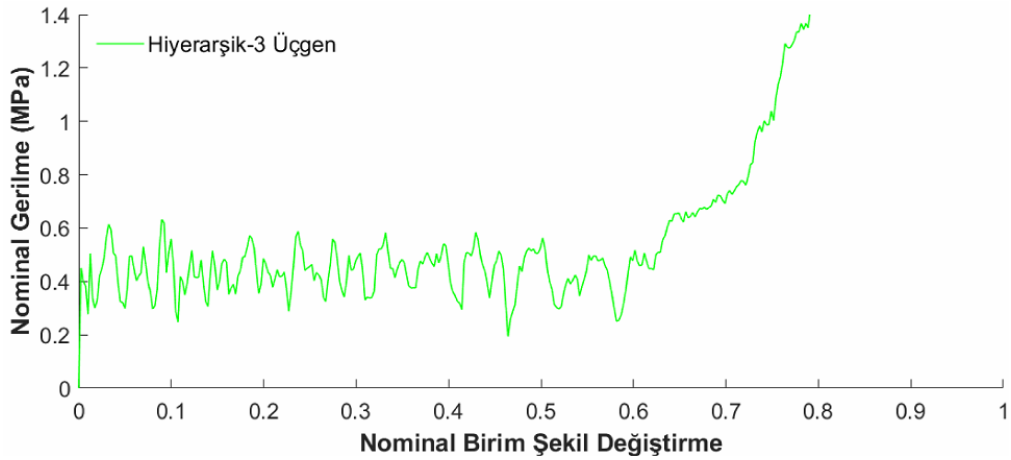
EK 2



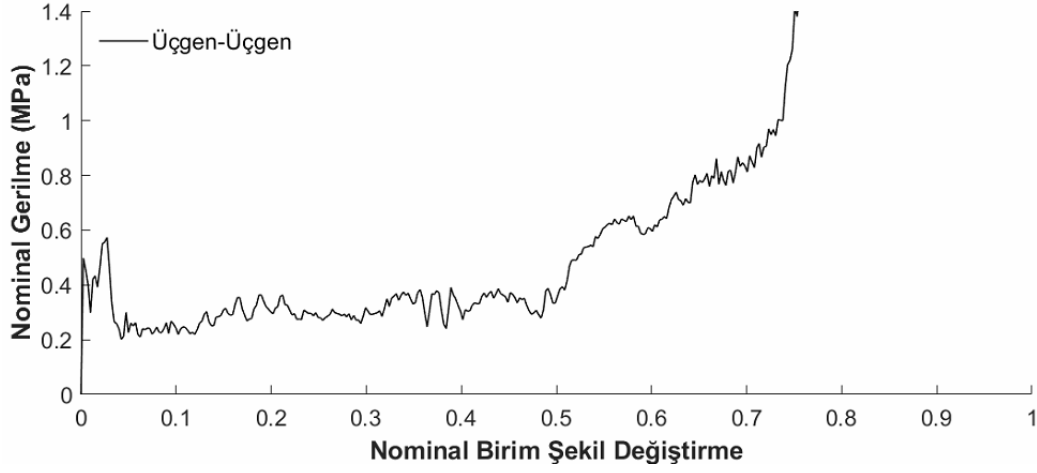
Şekil Ek. 2.1 : Tez kapsamında incenen Altıgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



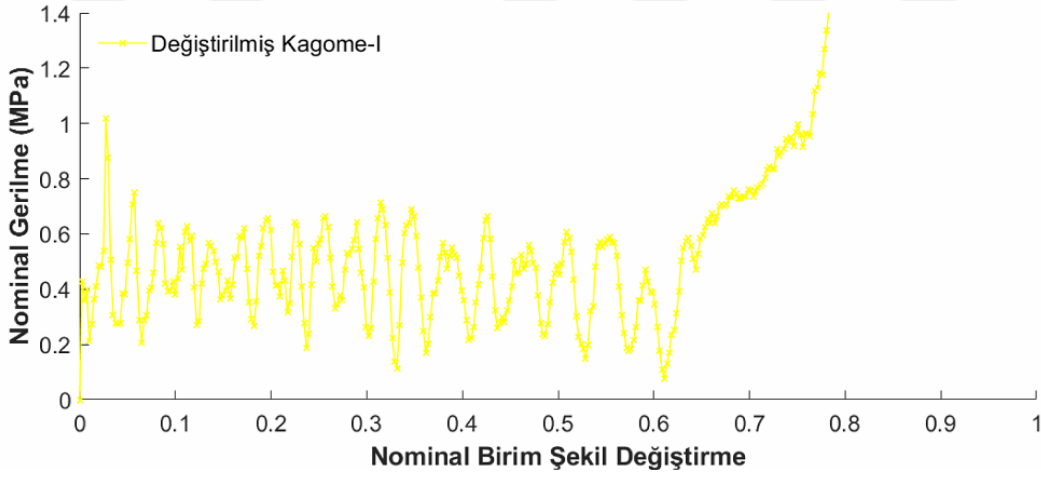
Şekil Ek. 2.2 : Tez kapsamında incenen Karma Altıgen-2 Üçgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



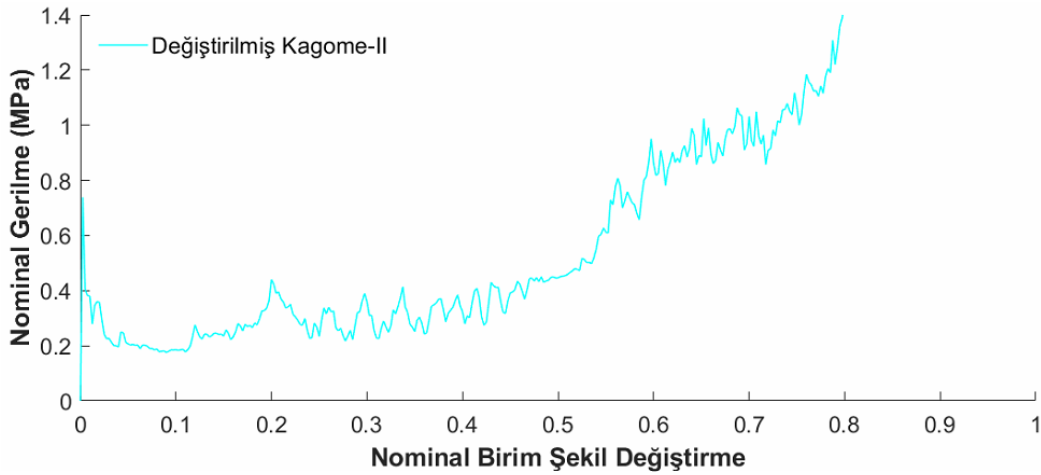
Şekil Ek. 2.3 : Tez kapsamında incenen Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



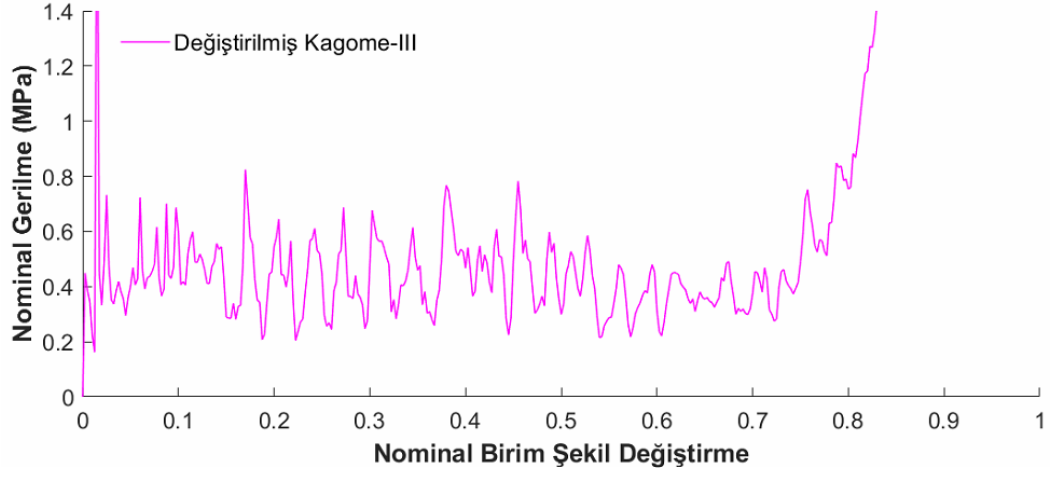
Şekil Ek. 2.4 : Tez kapsamında incenen Üçgen-Üçgen latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil Ek. 2.5 : Tez kapsamında incenen DK-I latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



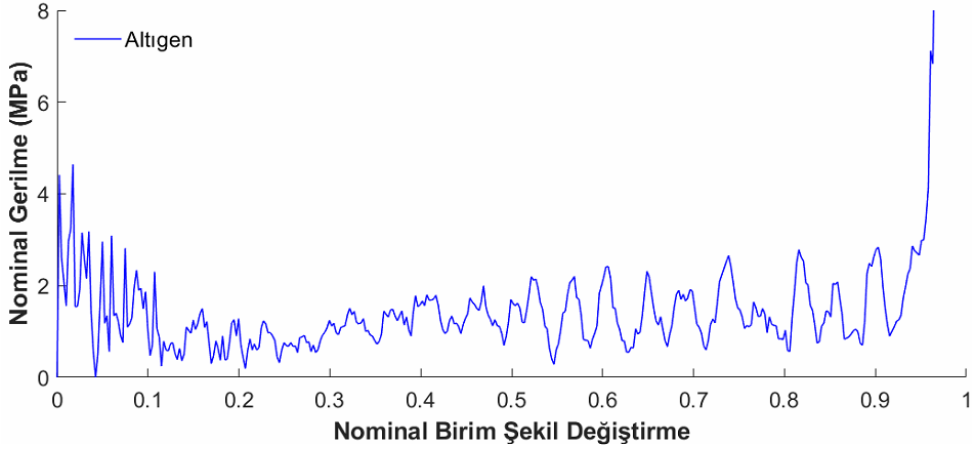
Şekil Ek. 2.6 : Tez kapsamında incenen DK-II latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



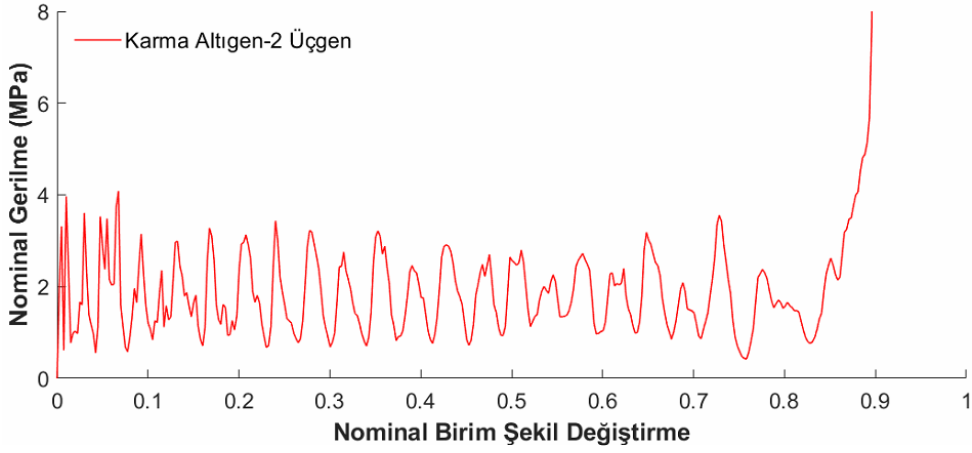
Şekil Ek. 2.7 : Tez kapsamında incenen DK-III latis yapının geçiş deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



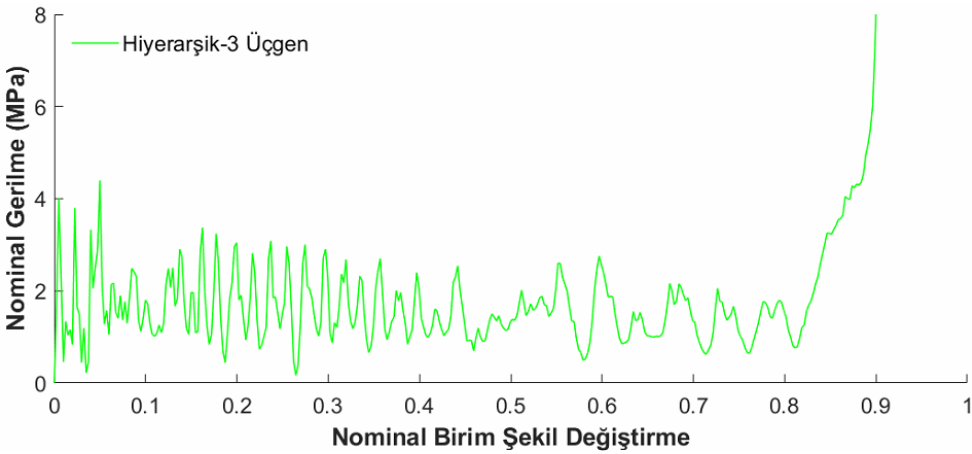
EK 3



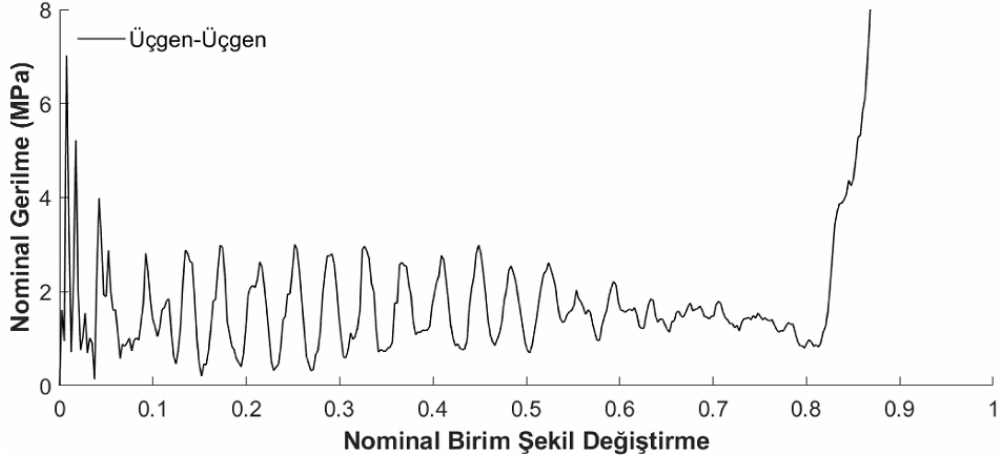
Şekil Ek. 3.1 : Tez kapsamında incenen Altıgen latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



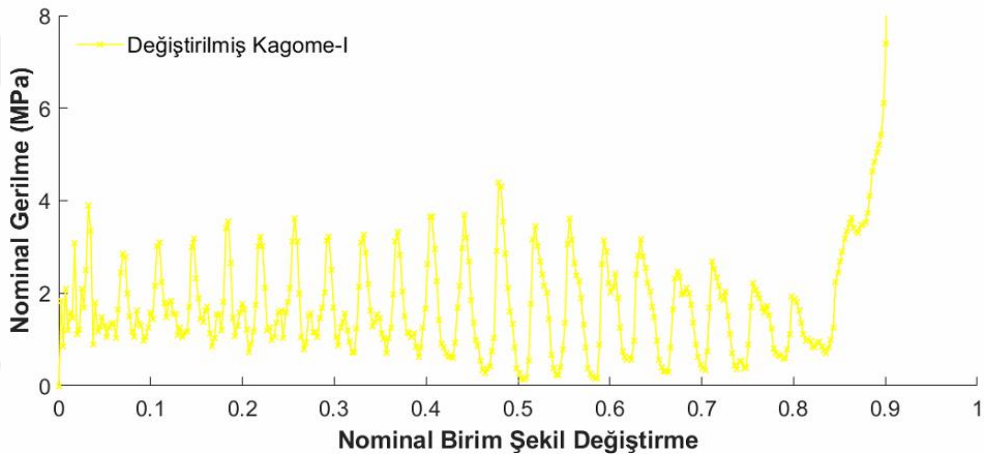
Şekil Ek. 3.2 : Tez kapsamında incenen Karma Altıgen-2 latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



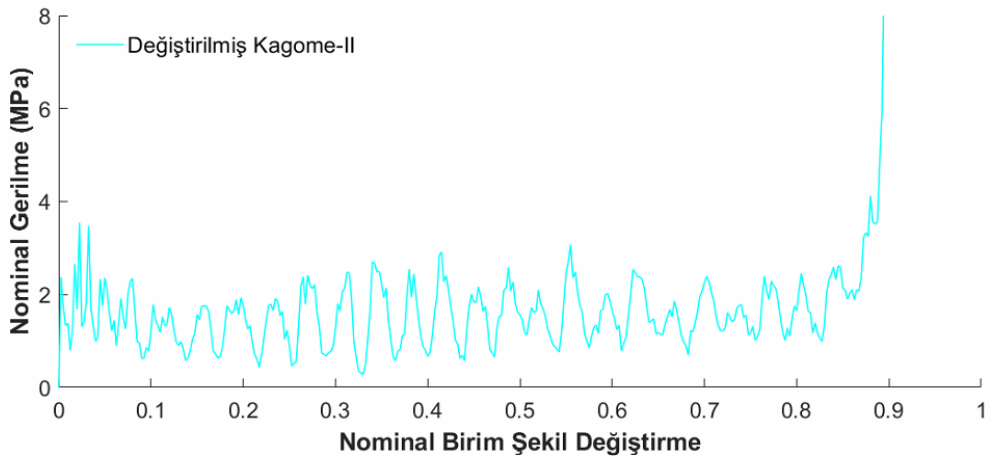
Şekil Ek. 3.3 : Tez kapsamında incenen Hiyerarşik-3 Üçgen latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



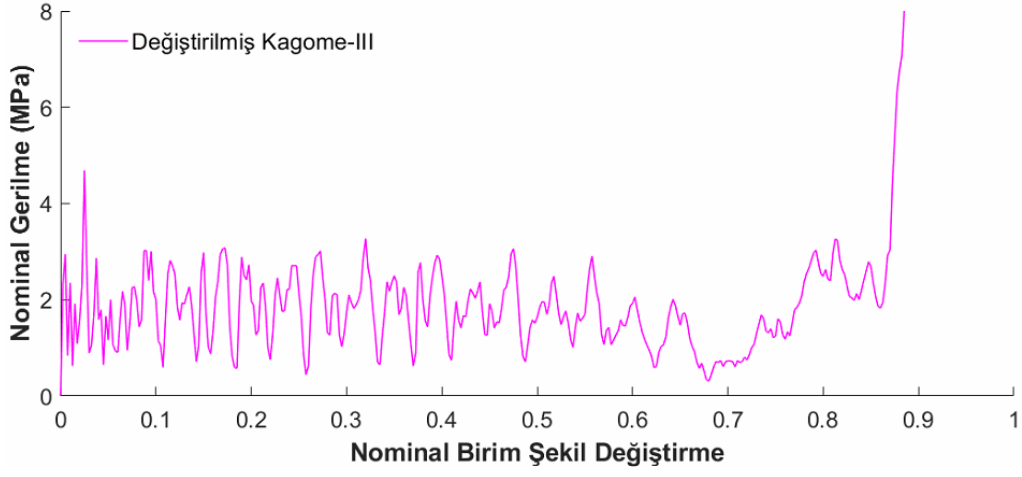
Şekil Ek. 3.4 : Tez kapsamında incenen Üçgen-Üçgen latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil Ek. 3.5 : Tez kapsamında incenen DK-I latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil Ek. 3.6 : Tez kapsamında incenen DK-II latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil Ek. 3.7 : Tez kapsamında incenen DK-III latis yapının dinamik deformasyon modunda nominal gerilme-nominal birim şekil değişirme eğrisi.