

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LATİS MALZEMELERİN YÜK TAŞIMA VE ŞEKİL DEĞİŞTİRME
KAPASİTELERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Caner GENÇOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cihan TEKOĞLU

NİSAN 2023

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Caner GENÇOĞLU

İMZA

ÖZET

Doktora Tezi

LATİS MALZEMELERİN YÜK TAŞIMA VE ŞEKİL DEĞİŞTİRME KAPASİTELERİNİN İNCELENMESİ

Caner GENÇOĞLU

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

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Cihan TEKOĞLU

Tarih: Nisan 2023

Latis malzemeler periyodik olarak tekrar eden birim hücrelere sahip boşluklu katılardır. Dolu malzemelere göre hafif olmaları nedeniyle titreşim sönümlemede, şekil değiştiren yapılarda ve daha pek çok mühendislik uygulamalarında eşsiz çözümler sunmaktadır. Latis malzemelerin yük taşıma ve şekil değiştirme özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, latis yapıların iki farklı uygulama alanı çalışılmıştır. Bunlardan ilki latis malzemelerdeki kusurların eyleyici performansına olan etkisinin incelenmesi, diğeri de latis yapıların Kapasitif Mikroışlenmiş Ultrasonik Çevirgeç (KMUÇ) cihazlarında kullanımıdır.

Latislerde malzeme kusurlarının incelendiği bölümde, sınır şartları kaynaklı etkilerden arınacak kadar büyük latis yapılar ele alınmıştır. Eyleyici uygulamalarında olan başarıyla literatürde bilinen Kagome latisle birlikte buna alternatif olabilecek Çift Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome latis yapılar üzerinde orta bölümden eyleyici ile hareket verilmiş ve bu hareketin latis içerisindeki sönümlenme mesafesi ve eyleyicinin harcadığı enerji ölçülmüştür. Çalışmadaki latis yapılara, eyleyici hareketinin olduğu koridor boyunca tanımlı konuma tek kusur ve koridor harici tanımlı alanlara rastgele dağıtılmış kusurlar eklenmiştir ve bu kusurların eyleyici performansına ve yapının genel direngenliğine etkisi incelenmiştir. Latis üretiminde yaygın olarak görülebilen kırık hücre duvarı, eksik hücre, dalgalı hücre duvarı, sapmış hücre ve değişken kalınlıklı hücre duvarı kusurları çalışılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, kusurların eyleyici koridoru üzerinde olmaları halinde, kusursuz yapının sönümleme mesafesine kadar olan mesafede olduklarında hareketi durdurdukları, fakat bu mesafenin ötesinde olduklarında hareketi önemli ölçüde ileri taşıyabildikleri

görülmüştür. Eyleyici koridoru dışında rastgele dağılan kusurlar içinse tüm latis yapılarda kusurların eyleyici performansını iyileştirme ve yapı direngenliğini düşürme etkinlikleri benzer sıradadır. En önemli etkiyi kırık hücre duvarı yaparken bunu eksik hücre, ardından da dalgalı hücre duvarı kusurları izlemektedir. Sapmış hücre duvarı, etkisi diğer kusurlardan az olacak şekilde, kendi içinde rastgele parametreleri nedeniyle saçılğan bir davranış sergilemektedir. Değişken kalınlıklı hücre duvarı ise en düşük etkinliğe sahiptir. Yapı genelinde latislerin bağlantı sayılarını en fazla azaltan kırık hücre duvarı en etkili kusurken, bağlantı sayısını azaltmayan değişken kalınlıklı hücre duvarı en düşük etkiye sahiptir.

KMUÇ cihazı, kendisine uygulanan elektrik alan sebebiyle oluşan kapasitif kuvvetler neticesinde titreşen, bu titreşim ile bulunduğu akustik ortamla etkileşim için olan bir elektro-akustik enerji çevirgecidir. Bu cihazda bir tarafı vakum olan ankastre bir plaka doğal frekansında titreştirilerek diğer taraftaki akustik ortama dalgalar gönderilmektedir. Doğrusal rejimde çalıştırılmak istenen bu cihazlarda, ankastre plakanın mekanik hareketi kaynaklı doğrusal olmayan etkiler ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmada KMUÇ plakası üzerinde negatif Poisson oranına sahip latis yapıların kullanılmasıyla, katı plaka ile aynı doğal frekansa sahip olan fakat doğrusal çalışma aralığı 3 katına çıkan ve mekanik empedansı düşen tasarımların mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu sayede düz plaka tasarımlarının aksine dinamik davranış değiştirilmeden plaka hareketi daha düşük yüklerle arttırılmış doğrusal rejimde yapılabilecek ve çığır açıcı KMUÇ cihazlarının tasarlanması önü açılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Latis eyleyici, Latis kusurları, KMUÇ cihazları, Dinamik modelleme.

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

INVESTIGATION OF LOAD BEARING AND SHAPE MORPHING CAPACITIES OF LATTICE MATERIALS

Caner GENÇOĞLU

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

Supervisor: Doç.Dr. Cihan TEKOĞLU

Date: April 2023

Lattice materials are cellular solids with periodically repeating unit cells. They offer unique solutions to vibration isolation, morphing structures and many other engineering applications because of their lightweight structure. In this study which focuses on load bearing and shape morphing capacities of lattice materials, two different application fields are investigated. First application field is investigation of the lattice material faults on the actuation performance and the second one is usage of lattice structures on Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (CMUT) devices.

In the lattice fault investigation chapter, lattice structures large enough to neglect boundary condition effects are taken into consideration. Kagome structure, which proves its effectiveness in actuation application is investigated with two of its variants namely Dual Kagome and Kagome Triangular lattice, with an actuator in the middle of the structure, taking attenuation distance and actuation energy as actuation performance criterion. Effects of single fault on defined locations on the actuation corridor and multiple faults randomly distributed over defined areas on the structure are investigated in terms of actuation performance and general stiffness of the structure. Fractured cell wall, missing cell, cell wall waviness, cell wall misalignment and non-uniform wall thickness faults which are commonly encountered in lattice manufacturing are studied. As a result of this study, in case when there is a fault on the actuation corridor, the fault stops the motion if its closer than the attenuation distance of the perfect structure, otherwise it carries the actuation motion forward. In case of randomly distributed faults over the structure, effectiveness of different types

of faults are the same for different lattice types. The most important effect comes with fractured cell wall fault, followed by missing cells and cell wall waviness. Cell wall misalignment has its own random behavior due to its random parameters but is less effective. Non uniform wall thickness has the least significant effect. Order of effectiveness for different types of faults is related to how faults reduce the overall connectivity of the lattice structure. Fractured cell wall, which reduces the overall connectivity of the lattice structure the most has the largest effect while non-uniform wall thickness which does not change the connectivity has an insignificant effect.

CMUT device is an electro-acoustic energy transducer which vibrates due to capacitive forces as a result of applied electric field and interacts with the surrounding acoustic medium due to its vibration. In this device an encastered plate with vacuum on one side is vibrated at its natural frequency and waves are generated on the acoustic medium on the other side of the plate. Nonlinear effects due to motion of the encastered plate are generated and become apparent with increased motion, yet the device is desired to be operated at the linear regime. In this study it is shown that designs having the same natural frequency with the solid plate with 3 times larger linear working regime and reduced mechanical impedance are possible thanks to negative Poisson's ratio lattice stiffener structures applied to the CMUT plate. Thanks to this study despite solid plate designs, plate motion is increased in the linear regime with smaller forces without altering the dynamic behavior, allowing groundbreaking CMUT device designs to be made.

Keywords: Lattice actuation, Lattice faults, CMUT devices, Dynamic modelling.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç.Dr. Cihan TEKOĞLU ve kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine çok teşekkür ederim.

Doktora tezim sürecinde bana desteklerini eksik etmeyen Roketsan A.Ş.'deki Direktörüm Dr. Alper ÜNVER ve Müdürüm Mustafa İNCİ ile ekip arkadaşlarım Hasan Baran ÖZMEN, Özkan KAHVECİ, Hasan YETGİN, Yasin CİHANER, Zekai Uygur ZEREN, Kadir ERDEM, Recep Berk AVCIOĞLU, Eray HUMALI ve Yunus Emre ÖZTAŞ'a teşekkür ederim. Sizler olmasaydınız bu çalışma tamamlanamazdı.

Her zaman yanımda olan annem Fatma, babam Adil ile ağabeyim Cihangir ve sevgili eşim Dilek ile biricik kızım, neşe kaynağım Işıl'a çok teşekkür eder, bu çalışmayı onlara adarım.

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

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
SEMBOL LİSTESİ	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Latis Malzemeler	1
1.2 Tezin Amacı ve Organizasyonu	4
2. LATİS MALZEMELERİN ŞEKİL DEĞİŞİREBİLEN YAPILAR OLARAK KULLANIMI	5
2.1 Şekil Değiştirebilen Latislere Dair Literatür Araştırması	5
2.2 Problemin Tanımı	11
2.3 Sonlu Elemanlar (SE) Yöntemleri	12
2.4 Sonlu Elemanlar (SE) Analizleri ve Elde Edilen Sonuçlar	17
2.4.1 Eyleyici koridoru üzerinde tek kusur bulunması	18
2.4.2 Kusur bölgesinde rastgele dağıtılmış kusurların bulunması	24
2.5 Kusur İçeren Latislerde Eyleyici Uygulaması için Sonuçların Tartışılması	32
3. LATİS MALZEMELERİN KAPASİTİF MİKROİŞLENMİŞ ULTRASONİK ÇEVİRGEÇLERDE KULLANIMI	35
3.1 Latis Malzemelerin Titreşim Özellikleri	35
3.2 Kapasitif Mikroışlenmiş Ultrasonik Çevirgeçler	36
3.3 KMUÇ Sistemlerinde Kullanılmaya Aday Latisler için Ön Çalışmalar	38
3.3.1 Statik sonlu elemanlar analizleri	42
3.3.2 Dinamik sonlu elemanlar analizleri	46
3.4 İdeal ve Optimal Latis KMUÇ Plakaları Belirlemek için Analitik Hesaplamalar	52
3.5 Kaplamalı Latis KMUÇ Plakalarının Sonlu Elemanlar Analizleri	63
3.5.1 Ağ yakınsaması çalışmaları	63
3.5.2 Dinamik ve statik analiz sonuçları	69
3.6 KMUÇ Plakalarında Latis Uygulaması için Sonuçların Tartışılması	72
4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	75
4.1 Latis Malzeme Eyleyici Uygulamaları Sonuç	75
4.2 Latis Malzemelerin KMUÇ Uygulamaları Sonuç ve Değerlendirme	76
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	89

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Farklı mühendislik malzemelerinin elastik modülünün (Young's modulus) yoğunluğa (density) göre değişimini sunan Ashby diyagramı.	2
Şekil 1.2: Sonlu büyüklükte iki boyutlu Kagome latis yapı için bir örnek. Kırmızı ile çizilmiş kirişler Kagome latis yapı için birim hücreyi göstermektedir. Kagome latisin ihtiva ettiği her bir kirişin uzunluğu l , düzlem içi kalınlığı ise t_{di} 'dir.	4
Şekil 2.1: Şekil değiştirebilen bir sandviç yapı: (a) menteşe hareketi yaparken (izometrik görünüm), (b) burulurken (yandan görünüm).	6
Şekil 2.2: Latis malzemeler için Venn diyagramı.	6
Şekil 2.3: Bu çalışmada incelenen latis malzemeler(a, b, c) ve onların birim hücreleri (d, e, f): (a, d) Kagome, (b, e) Çift Kagome (ÇK), (c, f) Eşmerkez Üçgenli Kagome (KÜ). (a, b, c), için kesikli çizgiler eyleyiciyi gösterirken noktalı çizgiler eyleyici koridorunu göstermektedir. Doğrusal eyleyici Kagome ve ÇK için bir duvarın yerine takılırken KÜ için iki duvarın yerine takılmaktadır. Eyleyici koridoru yüksekliği Kagome ve KÜ için $h_k \approx \sqrt{3} l_0$ iken ÇK için $h_k \approx 2.1 l_0$ 'dır. (d, e, f) için kesikli çizgiler hücre sınırını göstermektedir.	9
Şekil 2.4: Hücreli katılarda sıklıkla rastlana üretim kusurları: (a) dalgalı hücre duvarı (DHD), (b) değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD), (c) kırık hücre duvarı (KHD), (d) sapmış (misaligned) hücre duvarı (SHD), (e) eksik hücreler (EH).	10
Şekil 2.5: Üretim kusurlarının 2B latislerin mekanik özellik ve şekil değiştirme yetilerine etkilerinin araştırılması için yapılan sonlu elemanlar (SE) çalışmalarında kullanılan latis bloğun şematik gösterimi.	11
Şekil 2.6: Tek bir doğrusal eyleyicinin, kırık hücre duvarı (KHD) kusurları içeren Kagome latisi şekil değiştirmeye zorlarken harcadığı enerjinin hesaplandığı SE analizlerinde kullanılan sınır koşulları. İçi boş mor çemberler, latis içerisinde rastgele dağıtılmıştır ve çemberlerin denk geldiği kirişler latisten çıkarılarak kırık hücre duvarları elde edilmiştir. Eyleyici ε_a gerinimine tabi tutulurken, latis yapının sınırlarındaki kiriş elemanların bütün serbestlik dereceleri (düzlemdeki yer değiştirmeler ve düzlem içi dönme) sabitlenmiştir.	14
Şekil 2.7: Üretim kusurlarının şematik gösterimi: (a) eksik hücreler (EH), (b) dalgalı hücre duvarı (DHD), (c) sapmış (<i>Ing.</i> misaligned) hücre duvarı (SHD), (d) değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD).	15
Şekil 2.8: Üretim kusurları için kusurları için sonlu elemanlar ağları üzerinde örnekler: (a) dalgalı hücre duvarı (DHD, dalganın genliği $A = 0.05$, frekansı ise $f = 2$, bkz. Denklem (2.5)), (b) sapmış hücre duvarı (SHD, $0 < r \leq l_0/2$ ve $0 \leq \theta \leq 2\pi$) ve (c) değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD, $t_{di} = 1$ mm, $R = 5$, bkz. Denklem (2.6)).	16

- Şekil 2.9: Tek bir doğrusal eyleyicinin, kusursuz bir Kagome latiste oluşturduğu toplam yer değiştirme alanı. Toplam yer değiştirme, U_T , düzlemdeki yer değiştirmelerin (U_1 ve U_2) vektörel toplamını ifade etmektedir. Deformasyon 50 kat abartılmıştır. 18
- Şekil 2.10: Eyleyici koridoru üzerinde tek bir (a) kırık hücre duvarı, (b) eksik hücre, (c) dalgalı hücre duvarı, (d) sapmış hücre duvarı ve (e) değişken kalınlıklı hücre duvarı bulunan, doğrusal bir eyleyici etkisinde şekil değiştiren Kagome latisteki toplam yer değiştirme alanı. Toplam yer değiştirme, U_T , düzlemdeki yer değiştirmelerin (U_1 ve U_2) vektörel toplamını ifade etmektedir. Deformasyon 50 kat abartılmıştır. 19
- Şekil 2.11: Kagome latis için eyleyici koridoru içine yerleştirilen tek kusurun —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (b) sönümlleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler göreceli kusur konumunun, $l_{gk} = l_k/l_{s0}$ fonksiyonudur. l_k kusurun eyleyiciye daha yakın olan ucuna mesafesi, ve l_{s0} and l_s sırasıyla kusursuz ve kusur içeren latis yapılar için sönümlleme mesafesidir. 21
- Şekil 2.12: Çift Kagome latis için eyleyici koridoru içine yerleştirilen tek kusurun —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (b) sönümlleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler göreceli kusur konumunun, $l_{gk} = l_k/l_{s0}$ fonksiyonudur. l_k kusurun eyleyiciye daha yakın olan ucuna mesafesi, ve l_{s0} and l_s sırasıyla kusursuz ve kusur içeren latis yapılar için sönümlleme mesafesidir. 23
- Şekil 2.13: Eşmerkez Üçgenli Kagome latis için eyleyici koridoru içine yerleştirilen tek kusurun —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (b) sönümlleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler göreceli kusur konumunun, $l_{gk} = l_k/l_{s0}$ fonksiyonudur. l_k kusurun eyleyiciye daha yakın olan ucuna mesafesi, ve l_{s0} and l_s sırasıyla kusursuz ve kusur içeren latis yapılar için sönümlleme mesafesidir. 23
- Şekil 2.14: Latis bloğunun merkezindeki tek bir eyleyici tarafından hareket verilen Kagome latis blok üzerindeki toplam yer değiştirme $U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ dağılımı. Blok üzerinde %10 oranında (a) kırık hücre duvarı (b) eksik hücre (c) dalgalı hücre duvarı (d) sapmış hücre duvarı (e) değişken kalınlıklı hücre duvarı kusurları rastgele olarak $l/L = 1/8$ ile tanımlı kusur bölgesine dağıtılmıştır (bkz. Şekil 2.5). Deformasyon 50 kat abartılmıştır. 25

- Şekil 2.15: Kagome latis için rastgele dağıtılan kusurların —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a,b) etkin elastik modüle, $\hat{E} = E/E_0$, (c,d) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (e,f) sönümleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler kusur yüzdesinin, K fonksiyonudur. Göreli kusur bölgesi (a,c,e) durumları için $l/L = 1/8$, (b,d,f) durumları için $l/L = 1$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 2.5). 28
- Şekil 2.16: Çift Kagome latis için rastgele dağıtılan kusurların —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a,b) etkin elastik modüle, $\hat{E} = E/E_0$, (c,d) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (e,f) sönümleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler kusur yüzdesinin, K fonksiyonudur. Göreli kusur bölgesi (a,c,e) durumları için $l/L = 1/8$, (b,d,f) durumları için $l/L = 1$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 2.5). 30
- Şekil 2.17: Eşmerkez Üçgenli Kagome latis için rastgele dağıtılan kusurların —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a,b) etkin elastik modüle, $\hat{E} = E/E_0$, (c,d) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (e,f) sönümleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler kusur yüzdesinin, K fonksiyonudur. Göreli kusur bölgesi (a,c,e) durumları için $l/L = 1/8$, (b,d,f) durumları için $l/L = 1$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 2.5). 31
- Şekil 3.1: KMuÇ çalışma prensibinin şematik olarak gösterimi: (a) KMuÇ kesit görüntüsü (tepe plaka/elektrot, taban plakası ve yalıtkan dielektrik; cihaz pasif durumda). (b) Elektrotlara DC gerilim verilmesiyle oluşan kapasitif yükler sonucu, esnek tepe plakası taban plakasına doğru bir miktar çekilir; cihaz aktif durumda. (c) Elektrotlara verilen DC gerilimin üstüne AC gerilim eklenerek tepe plakası titreştirilerek ortama akustik dalgalar gönderilir. (d) AC gerilimin verilmediği durumda, DC gerilim verilerek aktive edilen KMuÇ cihazının elektrotları arasındaki gerilim ölçülerek, cihazın içinde bulunduğu akustik ortamdaki dalgalar tespit edilir. 37
- Şekil 3.2: KMuÇ plakası için tanımlanan üçgen latis geometrisi. " r " parametresi plakanın çapını, " l " parametresi ise eşkenar üçgenlerin kenar uzunluğunu ifade etmektedir. 39
- Şekil 3.3: Ön çalışma kapsamında incelenen KMuÇ plakaları: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Her bir plakadaki kırmızı nokta, statik analiz sonucunda tepe yer değiştirmesi değerinin okunduğu düğüm noktasını göstermektedir. Büyük Üçgen Latis için $r/l = 2.5$, diğer bütün latisler için $r/l = 5$ 'tir; bkz. Şekil 3.2. 41
- Şekil 3.4: 1 N'luk kuvvet uygulanan KMuÇ plakalarında, Şekil 3.3'te gösterilen kırmızı noktalardan elde edilen, uygulanan kuvvet doğrultusundaki tepe yer değiştirmesinin (U_{tepe} mm) uygulanan toplam kuvvete (F) göre değişimi. 43

- Şekil 3.5: Ön çalışma kapsamında incelenen KМУÇ plakaları için (bkz. Fig. 3.3), yüzeyden yayılı yük olarak uygulanan toplam 1 N'luk statik dik kuvvet altında, toplam yer değıştirme ($U_{\text{Toplam}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$) dağılımının, deforme olmuş konfigürasyonda gösterimi: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Büyük Üçgen Latis için $r/l = 2.5$, diğer bütün latisler için $r/l = 5$ 'tir; bkz. Şekil 3.2. 44
- Şekil 3.6: Latis plakaların Dolu Plaka sonuçlarına göre normalize edilmiş tepe yer değıştirme ve karekök ortalama yer değıştirmelerinin (bkz. Denklem(3.1)) yüzeye uygulanan yüke göre (F)değışimleri: (a, c, e) normalize tepe yer değıştirme; (b, d, f) karekök ortalama (KO) yer değıştirme. Latis plakaların yarıçap-hücre duvarı uzunluğu oranları (a, b) için $r/l = 5$, (c, d) için $r/l = 9$, (e, f) için $r/l = 15$ 'tir. 45
- Şekil 3.7: Birinci titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır. . . 49
- Şekil 3.8: İkinci titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır. . . 49
- Şekil 3.9: Üçüncü titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır. . . 50
- Şekil 3.10: Dördüncü titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır. . . 50
- Şekil 3.11: Üçgen-Üçgen latis plaka. Şekildeki çizimde plaka yarıçapının latis hücre duvarı uzunluğuna oranı $r/l = 5$ alınmıştır. 51
- Şekil 3.12: Bir latis plakayla (solda) aynı etkin mekanik özelliklere ve aynı ilk doğal frekansa sahip, boşluksuz, homojen plaka (sağda). 53
- Şekil 3.13: Denklem (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanan tepe yer değıştirme-basınç eğrilerinin şematik gösterimi. Tepe yer değıştirme, plakanın merkez noktasında oluşmaktadır. Mavi ve kırmızı doğru parçaları, sırasıyla, doğrusal yer değıştirme limitinde ($e = e_{D\text{-limit}}$) Denklem (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanan tepe yer değıştirme değerlerine karşılık gelmektedir. 54

- Şekil 3.14: Yarıçapları ve ilk doğal frekansları Dolu Plaka ile aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel latis plakaların, Dolu Plaka kalınlığına bölünerek elde edilmiş normalize kalınlıklarının ($h_{\text{latis}}/h_{\text{DP}}$), latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{\text{latis}}/G_{\text{latis-HS}}$, $G_{\text{latis-HS}} = E_{\text{katβ}}\rho^*/8$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimi. Latis plakaların bağıl yoğunluğu $\rho^* = \rho_{\text{latis}}/\rho_{\text{DP}} = 0.1$ olarak alınmıştır. Normalize plaka kalınlığının 6'dan büyük olduğu durumlarda latis plaka ince plaka olarak modellenemeyeceği için ($h_{\text{latis}}/h_{\text{DP}} > 6 \implies h_{\text{latis}} > 2r/10$), normalize plaka kalınlığı yüzeyi $h_{\text{latis}}/h_{\text{DP}} = 6$ değeriyle sınırlandırılmıştır. 57
- Şekil 3.15: Yarıçapları ve ilk doğal frekansları Dolu Plaka ile aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel latis plakaların, normalize doğrusal yer değiştirme limitlerinin ($u_{\text{D-limit-latis}}/u_{\text{D-limit-DP}}$), latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{\text{latis}}/G_{\text{latis-HS}}$, $G_{\text{latis-HS}} = E_{\text{katβ}}\rho^*/8$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimi. 58
- Şekil 3.16: Yarıçapları ve ilk doğal frekansları Dolu Plaka ile aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel latis plakaların, $P_{\text{D-limit-DP}}$ basıncı altında normalize yer değiştirmelerinin ($u_{\text{latis-@P}_{\text{D-limit-DP}}}/u_{\text{D-limit-DP}}$), latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{\text{latis}}/G_{\text{latis-HS}}$, $G_{\text{latis-HS}} = E_{\text{katβ}}\rho^*/8$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimi. $u_{\text{latis-@P}_{\text{D-limit-DP}}}/u_{\text{D-limit-DP}}$ hesaplanırken $P_{\text{D-limit-DP}}$ basıncı altında latisin deformasyonunun doğrusal kalacağı varsayılmıştır. 60
- Şekil 3.17: Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilen yüzeylerin kesişimi ve bu çalışma kapsamında incelenen farklı latislerin normalize yer değiştirme değerlerinin bu yüzeyler üzerindeki konumları. İki yüzeyin kesiştiği eğri yeşil renkte gösterilmiştir. 61
- Şekil 3.18: Kaplamalı üçgen latis plaka üzerinde "kaplama" ve "latis" bölümleri. Kaplama bölümü latisle aynı malzemeden yapılmış homojen, ince düz bir katman olup latis yapının üzerini kapatmaktadır. Böylelikle hem devamlı bir elektrot yüzeyi hem de plaka hareketini akustik ortama iletecek sürekli bir basınç aktarma yüzeyi elde edilmektedir. Latis yapı ise ince kaplama tabakasına güçlendirme unsuru olarak kullanılmaktadır. 63
- Şekil 3.19: Dolu plaka için farklı tipte katı elemanlar ile kalınlık boyunca artan adetlerde eleman kullanılarak elde edilen normalize tepe ve karekök ortalama (KO) yer değiştirme sonuçları. Değerler analitik hesaplama sonucuna göre normalize edilmiştir. 65
- Şekil 3.20: Dolu için farklı tipte katı elemanlar ile kalınlık boyunca artan adetlerde eleman kullanılarak elde edilen normalize ilk doğal frekans sonuçları. Değerler analitik hesaplama sonucuna göre normalize edilmiştir. 65

Şekil 3.21: Abaqus sonlu elemanlar yazılımı eleman kütüphanesinin C3D20 kuadratik katı elemanları kullanılarak kaplamalı üçgen latis plaka için oluşturulan sonlu elemanlar ağı (solda) ve plakanın statik yükleme altında deforme olmuş hali (sağda). Latisin yarıçap-hücre duvarı kenar uzunluğu oranı, $r/l = 5$ 'tir. Sonlu elemanlar ağında, latisin hücre duvarı kalınlığı boyunca en az dört eleman, kaplama kalınlığı boyunca en az iki eleman bulunmakta olup ağıdaki toplam eleman sayısı 2166429'dur.	67
Şekil 3.22: Üçgen latis için farklı tipte elemanlardan oluşturulan sonlu elemanlar modelleri kullanılarak elde edilen normalize tepe ve karekök ortalama (KO) yer değiştirme sonuçları. Kırmızı çizgi Şekil 3.21'de gösterilen referans model için elde edilen sonuçlara karşılık gelmektedir.	68
Şekil 3.23: Üçgen latis için farklı tipte elemanlardan oluşturulan sonlu elemanlar modelleri kullanılarak elde edilen normalize ilk doğal frekans sonuçları. Kırmızı çizgi Şekil 3.21'de gösterilen referans model için elde edilen sonuçlara karşılık gelmektedir.	68
Şekil 3.24: Latis plakaların birinci titreşim mod şekilleri: (a) Üçgen Latis ($r/l = 5$), (b) Hiyerarşik-3 Üçgen Latis ($r/l = 9$).	70
Şekil 3.25: (a) Altıgen latis, (b) Değiştirilmiş Girintili (<i>İng.</i> Modified Re-entrant) latisin ve (c) Girintili latisin eğilme yükü altında aldıkları şekiller: (a) antiklastik (textiting: anticlastic), (b) monoklastik ve (c) senklastik (<i>İng.</i> synclastic) Gauss eğrilikleri (<i>İng.</i> Gaussian curvatures).	73

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Ön çalışma kapsamında incelenen KМУÇ plakaları (Şekil 3.3) için; görelі yoğunluk-duvar kalınlığı ilişkisini veren denklemler, görelі yoğunluk (ρ^*) değerleri, düzlem içi ve düzlem dışı duvar kalınlıkları (sırasıyla, $t_{\text{lati}}s$ ve $h_{\text{lati}}s$).	40
Çizelge 3.2: Ön çalışma kapsamında incelenen KМУÇ plakaları (bkz. Şekil 3.3) için SE analizlerde kullanılan malzeme özellikleri (tipik bir alüminyum alaşımasının mekanik özellikleri esas alınmıştır).	42
Çizelge 3.3: Ön çalışma kapsamında incelenen bütün KМУÇ plakaları (bkz. Şekil 3.3) için elde edilen doğal frekans değerleri (Hz cinsinden). Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır. "Mod S.", ilgili moda karşılık gelen simetrik modu ifade etmektedir.	48
Çizelge 3.4: Silikon için kullanılan malzeme özellikleri.	51
Çizelge 3.5: Çalışma kapsamında incelenen plakaların malzeme özellikleri ve Şekil 3.17’de bu plakalar için gösterilen sonuçlara karşılık gelen sayısal değerler.	62
Çizelge 3.6: Kaplamalı latisler için eleman tipi belirlemede kullanılan modeller.	69
Çizelge 3.7: Kaplamalı latis KМУÇ plakalarının statik analiz sonuçları.	71

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E	Elastisite Modülü
G	Kesme Modülü
ν	Poisson Oranı
ρ	Yoğunluk
$\rho_{\text{katı}}$	Katı malzeme yoğunluğu
ρ_{latis}	Latis malzeme yoğunluğu
ρ^*	Latis malzeme göreceli yoğunluğu
l	Latis giriş boyu
t_{di}	Latis giriş düzlem içi kalınlığı
t_{do}	Latis giriş düzlem dışı kalınlığı
W	Eyleyici enerjisi
W_0	Referans eyleyici enerjisi
$\hat{W}$	Normalize eyleyici enerjisi
ϵ_a	Eyleyici gerinimi
K	Kusur yüzdesi
E_k	Etkin elastik modül
E_0	Kusursuz yapı için etkin elastik modül
$\hat{E}$	Normalize etkin elastik modül
l_{gk}	Göreceli kusur konumu
l_s	Sönümleme mesafesi
l_{s0}	Kusursuz yapı için sönümleme mesafesi
$\hat{l}_s$	Normalize sönümleme mesafesi
x_{KO}	Plaka yüzeyinin karekök ortalama deformasyonu
r	Plaka yarıçapı
h	Plaka kalınlığı
F	Plakaya uygulanan toplam kuvvet
P	Plakaya uygulanan basınç
D	Plakanın eğilme direngenliği
P_{DO}	Doğrusal olmayan denklem için basınç
P_{D}	Doğrusal denklem için basınç
e	Doğrusal ve doğrusal olmayan denklemler arası hata
$u_{\text{D-limit}}$	Tanımlı bir doğrusal-doğrusal olmayan denklemler arası hata değeri için doğrusal deformasyon limiti
$u_{\text{DO-limit}}$	Doğrusal limite ulaşıldığında doğrusal olmayan deformasyon
$u_{\text{D-merkez}}$	Plakanın merkezindeki maksimum doğrusal deformasyon
$u_{\text{DO-merkez}}$	Plakanın merkezindeki maksimum doğrusal olmayan deformasyon

ω_1	Plakanın rad/s cinsinden 1. doğal frekansı
f_1	Plakanın Hz cinsinden 1. doğal frekansı
$u_{D-e\vartheta\omega_1}$	Katı plakayla aynı 1. doğal frekansa sahip latis plakaların doğrusal deformasyonu



1. GİRİŞ

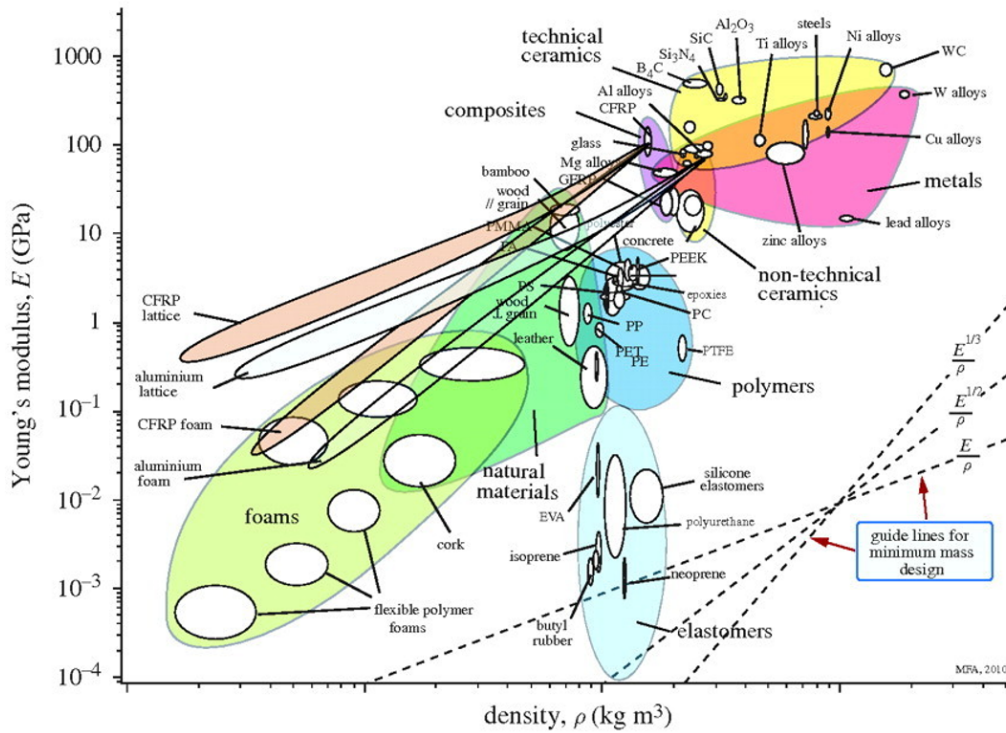
1.1 Latis Malzemeler

Birçok doğal malzeme üstün mekanik özelliklere sahiptir; tahtanın birim ağırlık başına düşen mukavemeti en güçlü çeliğinkiyle kıyaslanabilir düzeydedir, kemiğin kırılma tokluğu mühendislik malzemesi olarak kullanılan birçok seramiğinkine göre bir büyüklük mertebesi daha yüksektir [1]. Oysaki doğal malzemeleri oluşturan yapı taşları, mekanik özellikleri bakımından ayrıcalıklı malzemeler değildir. Doğal malzemelerin mekanik performansını üstün kılan, yapı taşlarının dizilimi, yani **mikro-mimaridir**. Tabiattaki malzemelerin böylesine etkin bir yapıya sahip olması, bilim insanları ve mühendisler için ilham kaynağı olmuş, geçtiğimiz yıllarda birçok yeni mikro-mimari tasarımı mühendislik malzemesi üretilmiştir. **Hücreli katılar** (*İng.* cellular solids), mikro-mimari tasarımı mühendislik malzemelerine verilebilecek en güzel örnekler arasında yer alır. Gibson ve Ashby, yeni ufuklar açan kitaplarında hücreli malzemeleri “hücrelerin kenar ve yüzeyleri, birbirlerine bağlı bir katı çubuk veya plaka ağından oluşan” malzemeler olarak tanımlamıştır [2]. Mikro-mimarileri sayesinde, yoğun katı malzemelerin ulaşamayacağı çok farklı mekanik ve fiziksel özellik kombinasyonlara sahip olabilen hücreli katılar [3–5]; titreşim kontrol sistemleri, enerji emen sistemler, ısı eşanjörleri gibi birçok farklı mühendislik alanlarında kullanılmaktadır [6–10].

Latis malzemeler (*İng.* lattice materials), tıpkı **köpük malzemeler** (*İng.* foams) gibi, hücreli katılar ailesine dahildir. Ancak hücrelerin boyut ve şekillerinin düzensiz dağılımlara sahip olduğu köpük malzemelerin aksine latis malzemelerde tüm hücreler birbirinin aynısıdır. Latis malzemelerde her bir hücre, birbirlerine hücre duvarlarında bağlanan narin kiriş veya kabuklardan oluşmaktadır. Bu malzemelere latis denmesinin sebebi, latisin hücre duvarlarını oluşturan kirişlerin birleştiği düğüm noktalarının, uzayda düzenli dizilime sahip latis noktalarına denk gelmesidir. Latis yapılar (*İng.* lattice structures), literatürde kafes yapı olarak da anılmaktadır. Hücre duvarı uzunluğunun latisin makroskobik boyutlarına yakın olduğu durumlarda latis yapı terimi daha uygundur. Malzeme terimi ise, latis boyutlarının hücre duvarı uzunluğundan çok daha fazla olduğu durumları ifade etmektedir. Bu terim, latisin sonlu bir kafes yapı değil, mukavemet ve elastik modül gibi makroskobik özelliklere sahip bir malzeme olduğunu vurgulamak için kullanılır. Zira bir "malzemenin" (fiziksel, mekanik, ısı, vb.) özellikleri boyuttan bağımsızken, bir "yapının" etkin

özellikleri boyuta göre değişmektedir.

Latis malzemeler, boşluksuz malzemelere göre yüksek direngenlik/ağırlık oranlarına erişerek hafif yapıların kullanımını gerektiren mühendislik problemlerinde çözüm sağlamaktadır [11]. Farklı mühendislik malzemelerinin elastik modülünün (*İng.* Young's modulus) yoğunluğa (*İng.* density) göre değişimi sunan Ashby diyagramı Şekil 1.1'de verilmiştir (bkz. [12]). Değişik mikro-mimarileri sayesinde üstün özellikler sergileyen yeni latis malzemeler tasarlanarak elastisite modülü-yoğunluk çizelgesinde halihazırda hiçbir malzeme tarafından doldurulamamış bölgelere ulaşılması mümkündür. Latisler çok fonksiyonlu malzemeler oldukları için "üstün" özellik kavramı uygulamadan uygulamaya farklılık göstermektedir. Kimi uygulamada yüksek direngenlik ön plandayken, kimi uygulamada Poisson oranı veya ısı özellikler önemlidir. Her yeni tasarlanan (yani farklı bir mikro-mimariye sahip) latis, farklı özelliklere sahip olup, değişik uygulama alanları için avantajlar sağlamaktadır.



Şekil 1.1: Farklı mühendislik malzemelerinin elastik modülünün (Young's modulus) yoğunluğa (density) göre değişimini sunan Ashby diyagramı.

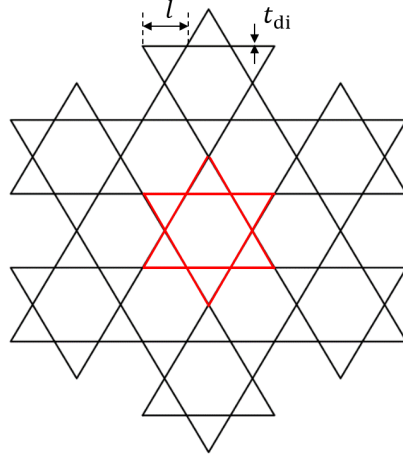
Üstün mekanik özellik kapsamında düşünebilecek bir özellik de latisin negatif Poisson oranına sahip olmasıdır. Negatif Poisson oranına sahip malzemeler, bir doğrultuda çekildiklerinde, çekme doğrultusuna dik diğer iki doğrultuda genişlemekte, bir

doğrultuda basıldıklarında ise, basma doğrultusuna dik diğer iki doğrultuda büzüşmektedir (bkz. [13–16]). **Metamalzeme** veya **öksetik** (*İng.* auxetic) malzeme olarak da adlandırılan negatif Poisson oranına sahip malzemeler, yüksek kesme ve indentasyon dirençleri ve yüksek enerji emme kapasitelerinden dolayı; bağlantı elemanları, sensörler, yapay kan damarı gibi medikal uygulamalar, kurşungeçirmez miğfer ve yelekler, akıllı tekstiller gibi birçok alanda önemli avantajlar sunmaktadır (bkz. [17–21]). Bu üstün özelliklerine rağmen, literatürde bilinen, negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin birçoğu anizotropik mekanik özelliklere sahiptir ve direngenlikleri görece düşüktür (bkz. [17, 22]). Bu yüzden, mevcut negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin farklı yöntemlerle direngenliklerini arttırmak veya izotropik mekanik özelliklere ve yüksek direngenliğe sahip yeni latis malzemeler tasarlamak aktif bir araştırma alanıdır (bkz. [22–25]).

Birim ağırlık başına düşen direngenlik ve mukavemet değerlerinin yoğun malzemelere ve stokastik dağılıma sahip hücreli malzemelere kıyasla daha yüksek olması, latis malzemeleri birçok farklı mühendislik uygulaması için cazip kılmaktadır. Düşük ağırlık, yüksek direngenlik/mukavemet, yüksek şekil değiştirme kapasitesi gibi farklı özelliklere sahip olan latis malzemeler [3–5]; enerji soğurucular [26–29]; titreşim ve ses kontrol cihazları [30–32], düşük ısıl genleşmeye sahip yapılar [33–35], ısı eşanjörleri [36], düşük ağırlıklı yapısal paneller [37–39] ve daha bir sürü çok fonksiyonlu uygulamada [7, 9, 10, 40, 41] kullanılmaktadırlar.

Şekil 1.2, katı malzeme ve boşluktan oluşan iki fazlı bir kompozitin düşük yoğunluklarda sahip olabileceği en yüksek elastik mekanik özellikleri sergileyen **Kagome** latisi göstermektedir. Şekil 1.2’de kırmızı ile çizilmiş kirişler Kagome latis yapı için altıgen bir birim hücreye karşılık gelmektedir; her bir kirişin uzunluğu l , düzlem içi kalınlığı ise t_{di} ’dir. Sayfa düzlemine dik doğrultudaki kalınlığı, sayfa düzlemindeki boyutlarına kıyasla oldukça düşük olan latisler, literatürde "iki boyutlu (2B)" veya "düzlemsel" latis olarak anılmaktadır. Bir latis malzemenin makroskobik mekanik özellikleri üç temel faktöre bağlıdır: i-) latisi oluşturan kirişlerin (yani hücre duvarlarının) malzemesi, ii-) latisin bağıl yoğunluğu (yani hücre duvarlarının oylum oranı) ve iii-) latisin mikro-mimarisi [bkz. 1, 6, 42, 43]. Bu üç faktör arasında en önemlisi mikro-mimaridir. Zira bir latisin kendisine uygulanan bir yüke, ihtiva ettiği kirişlerin eksenel doğrultuda şekil değiştirmesiyle mi yoksa eğilmesiyle mi cevap vereceği, diğer bir değişle latisin uzama-baskın (*İng.* stretching-dominated) mı yoksa eğilme-baskın (*İng.* bending-dominated) mı olduğu, o latisin mikro-mimarisine bağlıdır. Kirişlerin eksenel direngenlikleri eğilme direngenliklerine kıyasla oldukça yüksek olduğu için, uzama-baskın latislerin

makroskobik direngenlik ve mukavemetleri eğilme-baskın latislere göre çok daha yüksektir.



Şekil 1.2: Sonlu büyüklükte iki boyutlu Kagome latis yapı için bir örnek. Kırmızı ile çizilmiş kirisler Kagome latis yapı için birim hücreyi göstermektedir. Kagome latisin ihtiva ettiği her bir kirisin uzunluğu l , düzlem içi kalınlığı ise t_{di} 'dir.

1.2 Tezin Amacı ve Organizasyonu

Latis malzemelerin yük taşıma ve şekil değiştirme kapasitesinin araştırıldığı bu tez çalışmasında, bu malzemelerin kullanıldığı iki temel uygulama alanı ele alınmaktadır. Birinci uygulama alanı iki boyutlu latis malzemelerde eyleyici uygulamasında latis içindeki yapısal kusurların eyleyici performansına olan etkisinin incelenmesidir. Bu kapsamda farklı latis malzemelerde, tanımlı konumlara yerleştirilen ve belirli bölgelere rastgele dağıtılan belirli kusur tiplerinin, latis malzemedde oluşturulan bir eyleyici hareketini nasıl değiştirdiği incelenmiştir. İkinci uygulama alanı da Kapasitif Mikroışlenmiş Ultrasonik Çevirgeçler (KMUÇ, *İng.* Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers, CMUT) üzerinedir. Bu çalışmada latis malzemelerin KMUÇ titreşim plakalarına uygulandığında elde edilen avantajlar sunulmaktadır. Tez çalışması bu ana başlıklara göre organize edilmiş ve her bir başlık kendi içinde bağımsız bölümler olarak yazılmıştır.

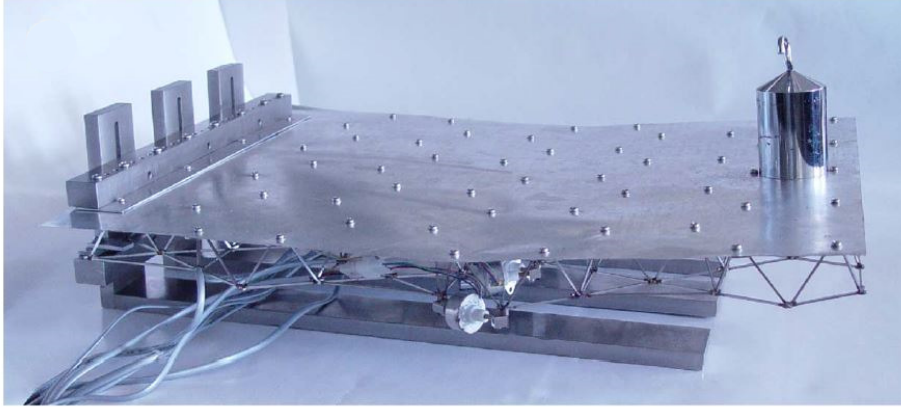
2. LATİS MALZEMELERİN ŞEKİL DEĞİŞİREBİLEN YAPILAR OLARAK KULLANIMI

2.1 Şekil Değiştirebilen Latislere Dair Literatür Araştırması

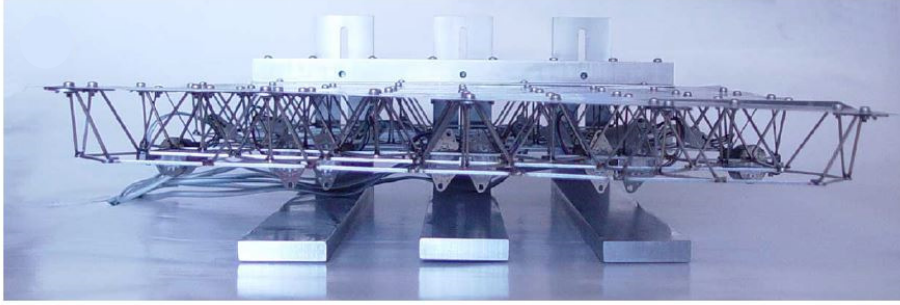
Yüksek direngenlik ve yüksek mukavemet sahibi, düşük ağırlıklı malzemelere olan ihtiyacın her geçen gün artması ve eklemeli imalat gibi üretim teknolojilerindeki gelişmeler, latis malzemelerin birçok farklı mühendislik uygulamalarında kullanılmasına imkan vermiştir [bkz. örn. 37, 44–46]. Bu uygulamalara en dikkat çekici örneklerden birisi **istemli şekil değiştirebilen yapılardır** (*Ing. shape morphing structures*). İstemli olarak şekil değiştirebilen yapılar; sıcaklık, basınç gibi çevresel şartlardaki veya yükleme koşullarındaki değişikliklerle birlikte önceden tasarlanmış şekillere girebilmekte, şekil değişikliğini tetikleyen etkiler ortadan kalkınca ise hiçbir hasara uğramadan ilk şekillerine geri dönebilmektedirler. Şekil 2.1’de, şekil değiştirebilen yapılara bir örnek gösterilmiştir [bkz. 47, Şekil 13]. Bu örnekteki sandviç yapının üst yüzeyi katı polikarbonat bir levhadan, alt yüzeyi ise 304 paslanmaz çelikten yapılmış Kagome latisten oluşmakta, iki yüzey birbirlerine, 304 paslanmaz çelikten yapılmış, üç boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) latislerle bağlanmaktadır. Kagome latisi oluşturan kırımlardan sekiz tanesi, Şekil 2.1 (a)’da bir tanesi görülen doğrusal eyleyicilerle değiştirilmiştir. Eyleyiciler harekete geçince sandviç yapı şekil değiştirmekte, eyleyiciler ilk konumlarına geri döndüğünde yapı da ilk şekline geri dönmektedir. Eyleyicilerden bir kısmı uzarken bir kısmının kısalması sayesinde sandviç yapı oldukça farklı şekiller alabilmektedir. Örneğin, sandviç yapı Şekil 2.1 (a)’da bir menteşe gibi hareket ederken 1 kg’lık bir yük taşımakta, yani hem şekil değiştirebilmekte hem de dış yüklere karşı direnç gösterebilmektedir. Şekil 2.1 (b)’de ise, farklı eyleyiciler çalıştırılarak sandviç yapının burulduğu görülmektedir. Şekil değiştirme yetisine sahip ideal bir yapının alt yüzeyini oluşturan 2B latisin, bir taraftan düzlem içi izotropik, yüksek direngenlik ve mukavemete sahip olması (yani tüm yönlerden gelen dış yüklere karşı yüksek direnç gösterebilmesi), bir taraftan da düşük enerji ile yüksek oranda şekil değiştirebilmesi gerekmektedir.

Bir latisin mekanik özelliklerinin düzlem içi izotropik olabilmesi için gerekli ve yeterli şart, latisin birim hücresinin **üçlü dönel** (*Ing. three-fold rotational*) simetriye sahip olmasıdır. n ’li dönel simetriye sahip bir cisim, $360/n$ kadar döndürüldüğünde sanki hiç döndürülmemiş gibi gözükür. Örneğin, Şekil 2.2’de gösterilen latislerden kare latis hariç hepsi izotropiktir (bkz. [42], Şekil 1). İki boyutta üçlü dönel simetriye

sahip her cisim, altılı dönel simetriye de sahiptir [bkz. 48].

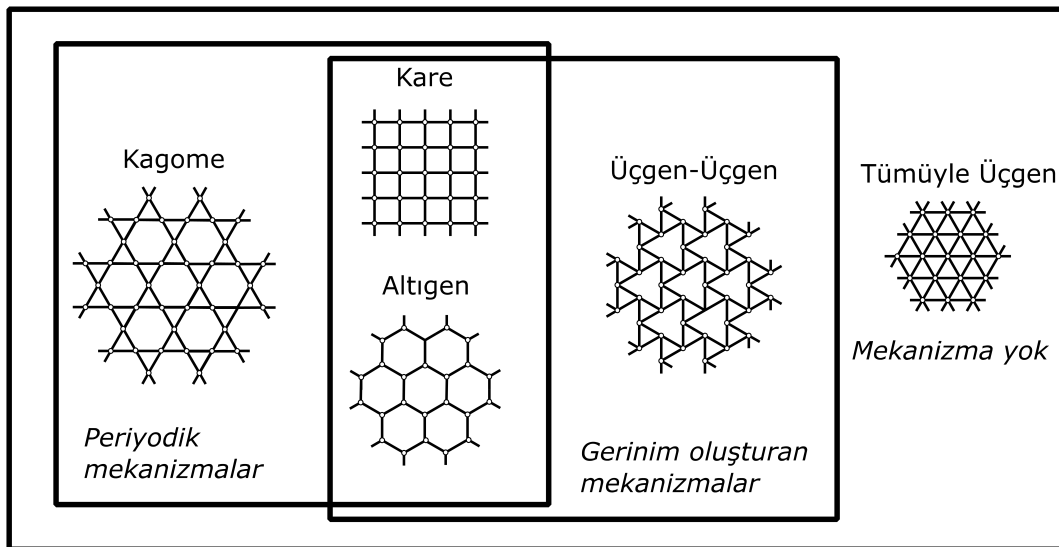


(a)



(b)

Şekil 2.1: Şekil değiştirebilen bir sandviç yapı: (a) menteşe hareketi yaparken (izometrik görünüm), (b) burulurken (yandan görünüm).



Şekil 2.2: Latis malzemeler için Venn diyagramı.

Latislerin mekanik özelliklerini belirleyen mikro-mimari unsurlarından önemli bir tanesi, bir düğüm noktasına kaç giriş bağlandığıdır. Bu sayı arttıkça latisin hem direngenliği hem de şekil değiştirmek için ihtiyaç duyduğu enerji artmaktadır. Örneğin, Şekil 2.2’de gösterilen, her bir düğüm noktasına altı giriş bağlı olan tümüyle üçgen latis, **uzama-baskın** bir latistir ve birçok bağlı yoğunluk değerinde, kayma ve hacimsel (*Ing. bulk*) elastik modül değerleri için (tıpkı Kagome latis gibi) Hashin-Shtrikman üst limitlerini sağlamaktadır [bkz. 49, 50]. Ancak, tümüyle üçgen latisin şekil değiştirmek için ihtiyaç duyduğu enerji Kagome latisinkinden birkaç büyüklük mertebesi daha fazladır. Şekil 2.2’de gösterilen, her bir düğüm noktasına üç giriş bağlı olan altıgen latis ise, şekil değiştirebilmek için Kagome latisten çok daha az enerjiye ihtiyaç duysa da **eğilme-baskın** bir yapıya sahip olduğu için elastik modül değerleri Kagome latisinkinden birkaç büyüklük mertebesi daha düşüktür [51]. Dört düğüm noktalı Kagome latis hem mekanik özellikler hem de şekil değiştirmek için ihtiyaç duyduğu enerji bakımından optimal değerlere sahiptir. Dolayısıyla, şekil değiştiren yapılarla ilgili mevcut literatürdeki çalışmaların çoğunluğu Kagome latise odaklanmıştır [bkz. örn. 47, 52–57].

Sonsuz periyodik bir kafes yapının direngenlik ve mukavemet değerleri, yapının **statik ve kinematik belirliliklerine** ve dolayısıyla **kendiliğinden gerilme durumları** (*Ing. states of self stress*) ve **mekanizmalarına** bağlıdır. Statik ve kinematik belirlilik kavramları esasen sonlu kafes yapılar için geliştirilmiş olup [bkz. örn. 58–62], latis malzemelerin mekanik davranımlarını belirleyebilmek amacıyla sonradan sonsuz kafes yapılara uyarlanmıştır [bkz. örn. 56, 63–65]. Toplam b adet çubuğun j adet sürtünmesiz pimle birbirlerine bağlandığı ve rijit bir zemine k adet kinematik kısıt ile sabitlenmiş sonlu bir kafes yapı düşünelim. Bu yapının statik olarak belirli olabilmesi için, kafesin düğüm noktalarına etkiyen dış yüklerden dolayı çubuklarda oluşan çekme/basma iç kuvvetlerinin yalnızca denge denklemleri kullanılarak hesaplanabiliyor olması gereklidir. Şimdi de statik olarak belirli bir kafes yapıya, bağlandığı iki pim arasındaki mesafeden daha kısa bir çubuğun (çekilip uzatılarak) eklendiğini varsayalım. Bu fazladan çubukta oluşacak çekme gerilmesinden dolayı, bu çubuğun bağlandığı pimplere bağlı diğer çubuklarda da çekme veya basma gerilmeleri oluşacaktır. Yani, pimplere etkiyen dış yük sıfır olduğu halde, çubuklardaki gerilme sıfırdan farklı olacaktır. Artık statik olarak belirsiz olan kafeste, fazladan bağlanan bir çubuk sebebiyle bir tane kendiliğinden gerilme durumu oluşmuştur, yani, $s = 1$ ’dir. Sonlu bir kafesin kinematik olarak belirli olabilmesi için ise, kafesin düğüm noktalarının yerlerini belirleyebilmek için yalnızca kafesi oluşturan çubukların uzunluklarının bilinmesi yeterli olmalıdır. Başka bir deyişle, kinematik olarak belirli kafes, çubukları uzayıp kısalmadan şekil değiştiremez. Kinematik olarak belirli sonlu

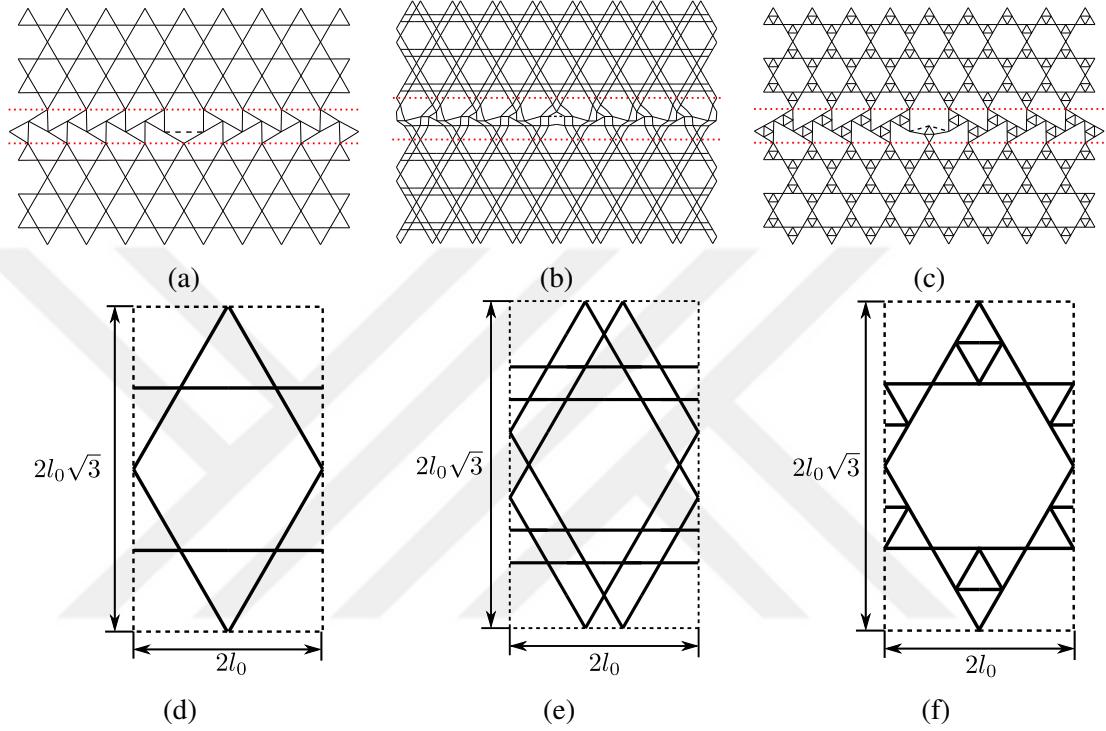
bir kafesten bir çubuk çıkarıldığında, kafes artık çubukları uzayıp kısalmadan şekil değiştirebilecek, yani bir mekanizma sahibi olacaktır ve $m = 1$ 'dir. Sonlu kafeslerden farklı olarak, sonsuz periyodik bir kafesin hem statik hem kinematik olarak belirli (yani izostatik) olamayacağı Guest ve Hutchinson (2003) tarafından ispat edilmiştir. Ancak bu, örneğin Kagome latis gibi, hem uzama-baskın hem de şekil değiştirmeye uygun latis malzeme olamayacağı anlamına gelmez.

Düzlem içi izotropik mekanik özelliklere sahip 2B bir latis malzemenin hem uzama-baskın hem de şekil değiştirmeye uygun olabilesi için, bu latisle aynı birim hücreye sahip sonsuz periyodik bir kafesin sağlaması gereken aşağıdaki kriterler geliştirilmiştir. [bkz. 42]. Sonsuz periyodik bir kafes:

1. $s - m = b - 2j = 0$ olarak ifade edilen genelleştirilmiş Maxwell belirlilik kriterini sağlamalıdır (b ve j , sırasıyla birim hücredeki çubuk ve düğüm sayısına karşılık gelmektedir),
2. sonsuzda uygulanan düzlemsel çekme/basma ve kesme kuvvetlerini çökmeden taşıyabilmelidir,
3. yalnızca makroskobik birim şekil değiştirme oluşturmayan (periyodik) mekanizmalara sahip olmalıdır [bkz. 42, 43].

Yukarıdaki kriterler gerekli olmakla birlikte yeterli değildir; yani, yalnızca ön eleme yapmak için kullanılmalıdır. Kriterleri sağlamayan bir latisin performansının Kagome'ye eşit veya ondan üstün olması mümkün değildir. Mikro-mimarisi bu kriterleri sağlayan bir latis için yapılması gereken ise mekanik ve şekil değiştirme özelliklerinin (nümerik ve/veya gerçek) deneyler yapılarak tespit edilmesidir. Nelissen, Ayas ve Tekoğlu tarafından, demi, yarı ve tam düzenli dizilim ailelerinin tüm üyelerini incelenmiş, Kagome hariç şekil değiştirmeye uygun bir mikro-mimari bulunamamıştır. Dolayısıyla, literatürde mevcut olmayan, yeni latis mikro-mimariler tasarlamaya başlanmıştır. Bu bağlamda Kagome ailesine ait iki yeni latis malzeme **Çift Kagome (ÇK)** ve **Eşmerkez Üçgenli Kagome (KÜ)** olarak tasarlanmıştır (Bkz. Şekil 2.3). Tasarlanan bu latis malzemelerinin her birisinin mekanik özellikleri ve şekil değiştirme yetileri, **sonlu elemanlar (SE)** çalışmaları yapılarak belirlenmiştir. Bu latislerin tamamının uzama-baskın olduğu, ancak aralarından yalnızca çift Kagome (ÇK bkz. Şekil 2.3 (b), (d)) latisin Kagome latise eşdeğer, optimal mekanik özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ÇK latise yerleştirilen bir eyleyicinin, Kagome latise yerleştirilen bir eyleyiciyle aynı miktarda uzamak/kısalma için daha az enerjiye ihtiyaç duyduğu gözlenmiştir. Halihazırda ÇK latisin Kagome latise kıyasla tespit

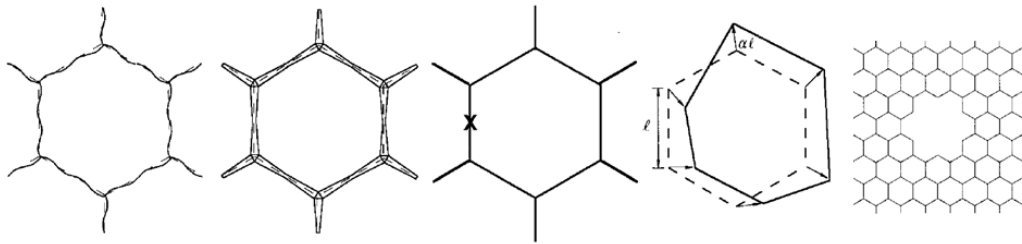
edilebilen tek eksiği, eyleyicinin hareketiyle latiste oluşan yer değiştirme alanının Kagome'dekine kıyasla daha kısa mesafede sönümlenmesidir (bkz. [43]). Bu durum ise aynı enerji sağlandığında Kagome latisin daha fazla şekil değiştirebileceğine işaret etmektedir. Buna rağmen, ÇK latisin bu kadar üstün mekanik ve şekil değiştirme özelliklerine sahip olması, geliştirilen kriterler ışığında, Kagome'ye rakip olabilecek yeni latis malzemeler tasarlanabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 2.3: Bu çalışmada incelenen latis malzemeler(a, b, c) ve onların birim hücreleri (d, e, f): (a, d) Kagome, (b, e) Çift Kagome (ÇK), (c, f) Eşmerkez Üçgenli Kagome (KÜ). (a, b, c), için kesikli çizgiler eyleyiciyi gösterirken noktalı çizgiler eyleyici koridorunu göstermektedir. Doğrusal eyleyici Kagome ve ÇK için bir duvarın yerine takılırken KÜ için iki duvarın yerine takılmaktadır. Eyleyici koridoru yüksekliği Kagome ve KÜ için $h_k \approx \sqrt{3} l_0$ iken ÇK için $h_k \approx 2.1 l_0$ 'dır. (d, e, f) için kesikli çizgiler hücre sınırını göstermektedir.

Hücreli katı malzemelerin her geçen gün artan uygulama alanlarının daha hızlı genişlemesinin önündeki önemli bir engel, üretim kusurlarının bu malzemelerin mekanik özellik ve şekil değiştirme yetilerine olan etkileridir. Şekil 2.4, hücreli katılarda sıklıkla karşılaşılan beş farklı üretim kusurunu göstermektedir: (a) **dalgalı hücre duvarı (DHD)**, (b) **değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)**, (c) **kırık hücre duvarı (KHD)**, (d) **sapmış (İng. misaligned) hücre duvarı (SHD)** ve (e) **eksik hücreler (EH)** (bkz. Chen vd., 1999 [66], Şekil 1). Günümüzde; elektron

hüzme eritmesi (electron beam melting), seçkili lazerli sinterleme (selective laser sintering), stereolitografi gibi eklemeli imalat teknikleri kullanılarak, farklı büyüklük mertebelerinde, oldukça karmaşık mikro-mimarilere sahip hücreli malzemelerin üretimi imkânlı hale geldiyse de [örn. 67, 68], bu yöntemlerle üretilen köpük ve latis malzemeler bahsi geçen üretim kusurlarından muaf değildir [örn. 68–71]. Üretim kusurlarının hücreli katıların performansına etkileri birçok deneysel ve nümerik çalışmaya konu olmuştur. Deneysel çalışmaların bir kısmı kusurların mekanik davranıma etkilerini konu alırken [örn. 72–76], bir kısmı da kusurların hasar mekanizmalarına etkilerine odaklanmıştır [örn. 9, 71, 77–81]. [82] ve [83]; dalgalı, eksik veya yanlış hizalanmış hücre duvarlarının tümüyle üçgen, Kagome ve altıgen latislerin elastik mekanik özelliklerine etkilerini SE çalışmaları yaparak incelemiştir. [83], kusurların etkisiyle hacimsel ve kayma modüllerinde görülen azalmanın Kagome latiste diğer iki latisten daha fazla olduğunu göstermiştir [84]. SE çalışmaları yaparak dalgalı hücre duvarlarının 3B tekstil latislerin hem elastik modül hem de mukavemet değerlerinde %20'lere varan azalmalara yol açtığını göstermişlerdir. Chen, Lu ve Fleck, yaptıkları SE çalışmalarıyla altıgen latislerin akma mukavemetini en fazla azaltan kusurun kırık hücre duvarları olduğunu ve bunu, sırasıyla, eksik hücrelerin, dalgalı, yanlış hizalanmış ve kalınlığı sabit olmayan hücre duvarlarının izlediğini belirlemişlerdir [66]. Özet olarak hem deneysel hem nümerik çalışmaların ortak sonucu, üretim kusurlarının hücreli katıların mekanik özelliklerine menfi bir etkisi olduğu, ancak bu etkinin büyüklüğünün malzemenin mikro-mimarisine göre değiştiğidir.

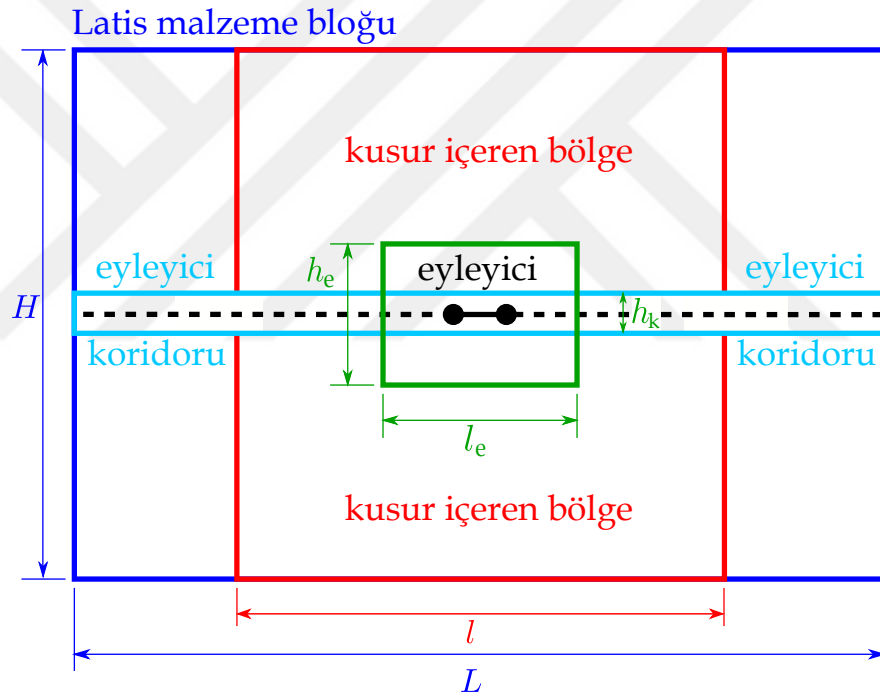


Şekil 2.4: Hücreli katılarda sıklıkla rastlana üretim kusurları: (a) dalgalı hücre duvarı (DHD), (b) değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD), (c) kırık hücre duvarı (KHD), (d) sapmış (misaligned) hücre duvarı (SHD), (e) eksik hücreler (EH).

Mevcut literatürde, üretim kusurlarının hücreli katıların mekanik özellik ve hasar mekanizmalarına etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunsa da, bu kusurların latis malzemelerin şekil değiştirme yetisine etkilerine adanmış bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu tez kapsamında bu alanda yapılan çalışmalar literatürde bir ilk olmuş ve önemli bir boşluğu doldurmuştur [bkz. 85].

2.2 Problemin Tanımı

Bu çalışmada amaç, imalat kusurlarının Kagome, Çift Kagome (ÇK) ve Eşmerkez Üçgenli Kagome (KÜ) latislerin direngenliklerine ve şekil değiştirme yetilerine olan etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla, Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilen, geometrik merkezinde eyleyici bulunan latis blok üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çalışılan üç latis için birim hücre genişliğinin $2l_0 = 2.0$ mm olduğu durumda, latis malzeme bloğunun yüksekliği $H \approx 30\sqrt{3} l_0$ ve boyu $L \approx 800 l_0$ kadardır. Eyleyici uzadığı (veya kısaldığı) zaman latis malzemedeki **eyleyici koridoru** olarak adlandırılan bölgede (bkz. Şekil 2.5) deformasyon gözlemlenmektedir. Eyleyici koridorunun Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome latisler için yüksekliği $h_k \approx \sqrt{3} l_0$, Çift Kagome latis için yüksekliği $h_k \approx 2.1 l_0$ kadardır.



Şekil 2.5: Üretim kusurlarının 2B latislerin mekanik özellik ve şekil değiştirme yetilerine etkilerinin araştırılması için yapılan sonlu elemanlar (SE) çalışmalarında kullanılan latis bloğun şematik gösterimi.

Bu çalışmada latis malzemenin şekil değiştirme yetisi iki farklı ölçüte göre değerlendirilmiştir. Birinci ölçüt ϵ_a [bkz. 43, 51] değerinde bir birim şekil değiştirmesine tabi olan bir eyleyicinin harcadığı enerji olarak tanımlanan **eyleyici enerjisi**'dir. İkinci ölçüt ise, eyleyicinin latise kuvvet aktardığı ucu ile, eyleyici tarafından latis üzerinde (eylem yönünde) yaratılan yer değiştirmenin, eyleyicinin ucundaki (en yüksek) değerinin %20'sine indiği nokta arasındaki mesafe olarak

tanımlanan **sönümlenme mesafesi**'dir [bkz. 43, 51]. Eyleyici enerjisinin düşük, sönümlenme mesafesinin uzun olduğu durumlarda latis malzemenin şekil değiştirme performansı yüksektir.

Latis malzemenin eyleyici koridorunda kusur bulunması halinde, koridor dışında kusur olsa da olmasa da sönümlenme mesafesi ciddi ölçüde düşmektedir. Dolayısıyla bu çalışma, tek bir kusurun koridor içerisinde tanımlandığı durumlar ve kusurların koridor içerisinde olmasına izin verilmeyip, Şekil 2.5'te belirlenmiş **kusur içeren bölgeye** rastgele dağıtıldığı durumlar olmak üzere iki ana bölüme ayrılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde tek bir kusur (farklı kusur tipleri için bkz. Şekil 2.7), eyleyici koridoru üzerine eyleyici ucundan tanımlı mesafelerde bir tasarım unsuru gibi yerleştirilmiştir. İkinci bölümde ise Şekil 2.5'te kırmızı renk ile gösterilen $H \times l$ ebatlarına sahip bölgede, eyleyici koridoru ve Şekil 2.5'te yeşil renk ile gösterilen $h_e = 8\sqrt{3} l_0 \times l_e = 10 l_0$ ebatlarına sahip eyleyicinin hemen komşuluğundaki bölge hariç tutularak rastgele kusur yerleşimi yapılmıştır. Şekil 2.5'te yeşil renk ile gösterilen eyleyici komşuluğu bölgesine kusur konulmamasının sebebi, eyleyicinin oluşturduğu hareketin henüz latis ile iletmeden sönümlenmesinin önüne geçmektir.

2.3 Sonlu Elemanlar (SE) Yöntemleri

Bu çalışma kapsamında yapılan bütün çalışmalar, ticari bir SE yazılımı olan ABAQUS 2020 (bkz. [86] dokümantasyon) kullanılarak yapılmıştır. Gerek elastik modül hesaplama gerekse şekil değiştirme performansı ölçümü için yapılan SE analizlerinde, latis malzemeleri oluşturan hücre duvarları, ABAQUS eleman kütüphanesinin Euler-Bernoulli kiriş varsayımını barındıran B23 elemanı kullanılarak modellenmiştir. Hücre duvarlarının; yükleme öncesi düzlem içi uzunluğu $l_0 = 1$ mm, düzlem içi kalınlığı t_{di} , düzlem dışı kalınlığı ise $t_{do} = 0.01$ mm olan dikdörtgen bir kesit alanına sahip oldukları varsayılmıştır. Latis malzemelerin göreceli yoğunluğu, yani hücre duvarlarının dolu plakaya olan hacimsel oranı $\rho^* = 0.01$ alınmıştır.

Wicks ve Guest (2004) [51] ve Nelissen vd. (2019) [43]'de olduğu gibi, bir latis malzemenin şekil değiştirmeye karşı direnci, latisi oluşturan kirişlerden birisi bir eyleyiciyle değiştirilip, eyleyicinin harcadığı enerji ölçülerek belirlenmiştir. ϵ_a gerinimine tabi tutulan doğrusal bir eyleyicinin harcadığı enerji, W ,

$$W = -\frac{1}{2} t l_0 \epsilon_a \quad (2.1)$$

olarak hesaplanır. Denklem (2.1)'de t deformasyon sonrası eyleyicide oluşan çekme

kuvvetini, l_0 ise eyleyicinin deformasyon öncesi boyunu ifade etmektedir. Eyleyicinin geometrik ve malzeme özelliklerinin latis oluşturan kirişlerinkine eşit olduğu varsayılmıştır. Eyleyiciyi çevreleyen latis yapının tamamen rijit olduğu varsayılarak bir de referans enerjisi, W_0 , tanımlanmıştır:

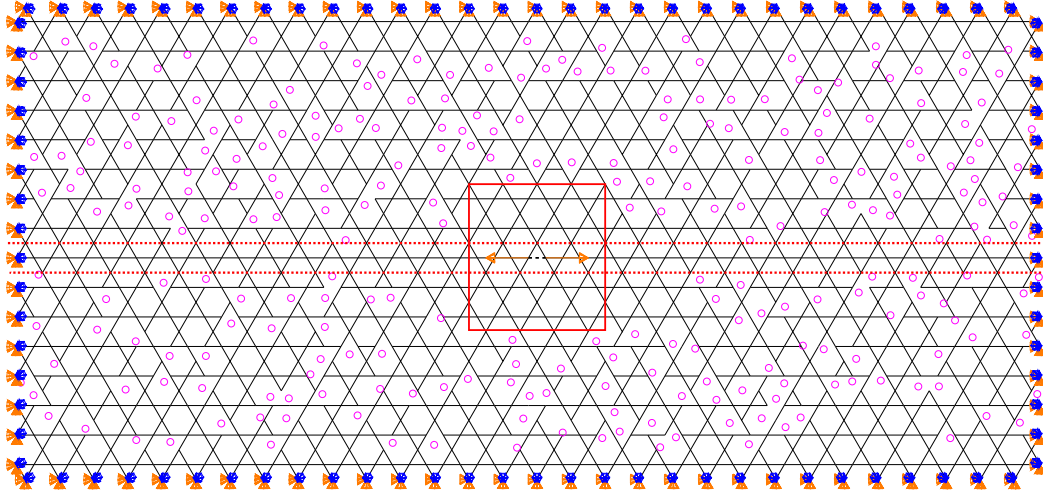
$$W_0 = -\frac{1}{2}t_0l_0\epsilon_a \quad (2.2)$$

$$t_0 = -E_sA_0\epsilon_a \quad (2.3)$$

$$W_0 = \frac{1}{2}E_sA_0l_0\epsilon_a^2 \quad (2.4)$$

Denklem (2.3)'te t_0 , eyleyiciyi çevreleyen latis yapının tamamen rijit olduğu durumda, kuvvet uygulanmasıyla eyleyicide oluşan (negatif) çekme kuvvetini, E_s eyleyicinin yapıldığı katı malzemenin elastik modülünü, A_0 ise eyleyicinin deformasyon öncesi dik kesit alanını ifade etmektedir. Böylelikle, normalize eyleyici enerjisi $\hat{W} = W/W_0$ olarak tanımlanır. $\hat{W}$ değerinin düşük olması, ilgili latisin düşük enerjiyle, yani kolaylıkla şekil değiştirebildiğini gösterir.

Şekil 2.6, tek bir doğrusal eyleyicinin, kırık hücre duvarı kusurları içeren Kagome latisi şekil değiştirmeye zorlarken harcadığı enerjinin hesaplandığı SE analizlerinde kullanılan sınır koşullarını göstermektedir. İçi boş mor çemberler, latis içerisinde rastgele dağıtılmıştır ve çemberlerin denk geldiği kirişler latisten çıkarılarak kırık hücre duvarları elde edilmiştir. Latis bloğun merkezindeki eyleyici ϵ_a birim şekil değiştirmesine tabi tutulurken, latis yapının sınırlarındaki kiriş elemanların bütün serbestlik dereceleri (düzlemdeki yer değiştirmeler ve düzlem içi dönme) sabitlenmiştir. Dikdörtgen şeklindeki latis bloğun uzunluğu $L = 800l_0$, yüksekliği ise $H = 32\sqrt{3}l_0$ olarak alınmıştır (bkz. [43, 51]). Hesaplamalarda böylesine büyük bir latis blok kullanılması sayesinde, sınırdaki kiriş elemanlar serbest bırakıldığında bile $\hat{W}$ değeri değişmemekte, yani elde edilen sonuçlar sınır koşullarından bağımsız olmaktadır. Çalışmada sunulan sonuçlar, sınırlarındaki kiriş elemanların bütün serbestlik dereceleri sabitlenerek elde edilmiştir.

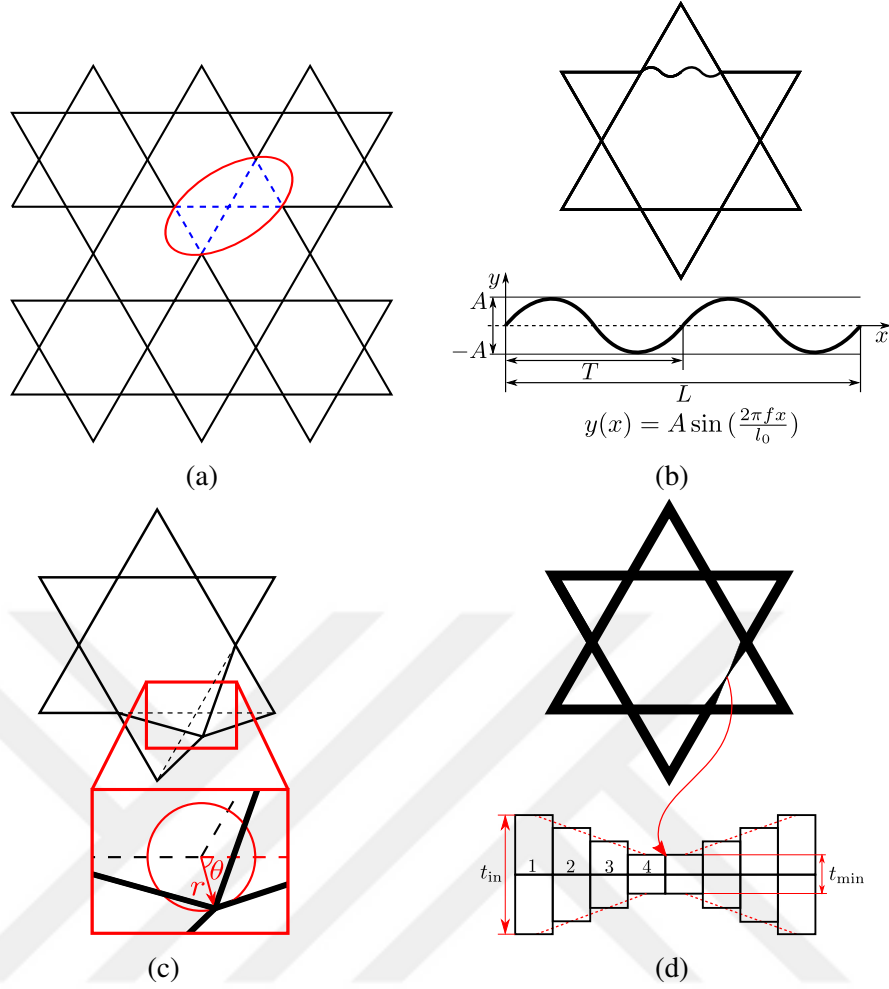


Şekil 2.6: Tek bir doğrusal eyleyicinin, kırık hücre duvarı (KHD) kusurları içeren Kagome latisi şekil değiştirmeye zorlarken harcadığı enerjinin hesaplandığı SE analizlerinde kullanılan sınır koşulları. İçi boş mor çemberler, latis içerisinde rastgele dağıtılmıştır ve çemberlerin denk geldiği kırışlar latisten çıkarılarak kırık hücre duvarları elde edilmiştir. Eyleyici ε_a gerinimine tabi tutulurken, latis yapının sınırlarındaki kırış elemanların bütün serbestlik dereceleri (düzlemdeki yer değiştirmeler ve düzlem içi dönme) sabitlenmiştir.

Şekil değiştiren yapılar, mühendislik uygulamalarında genellikle elastik bölgede yüklenmektedir. Dolayısıyla SE analizlerinde, **doğrusal olmayan** (nonlinear) malzeme ve geometrik etkiler ihmal edilmiştir (ABAQUS terminolojisinde NLGEOM = NO). Latisin üretildiği malzemenin alüminyum alaşımı olduğu varsayılmış, Young modülü $E_s = 70$ GPa ve Poisson oranı $\nu = 1/3$ alınmıştır. Ancak belirtmek gerekir ki, latisin üretildiği malzemenin mekanik özellikleri elde edilen sonuçların mutlak değerlerini etkilese de genel eğilimler mekanik özellik değerlerinden bağımsızdır.

Kusur yüzdesi, kusurlu kırış sayısının, Şekil 2.5'teki kusurlu bölgedeki toplam kırış sayısına oranını ifade etmektedir. Kusurlu kırışlar, kusurlu bölgedeki kırışlar arasından rastgele seçilmektedir. Kırık hücre duvarlarını temsil eden her bir kırış, Şekil 2.6'da gösterildiği üzere, SE açısından kaldırılmıştır. Şekil 2.7, geriye kalan dört üretim kusurunu şematik olarak göstermektedir. Eksik hücre kusurunu temsilen, her bir eksik hücre için Şekil 2.7 (a)'da kesik mavi çizgilerle gösterilen altı kırış SE açısından kaldırılmıştır. Dalgalı hücre duvarı, Şekil 2.7 (b)'de gösterildiği üzere, kırışın uzun eksenine dik doğrultuda sinüzoidal bir yer değiştirme uygulanarak elde edilmiştir:

$$y(x) = A \sin\left(\frac{2\pi f x}{l_0}\right) \quad (2.5)$$



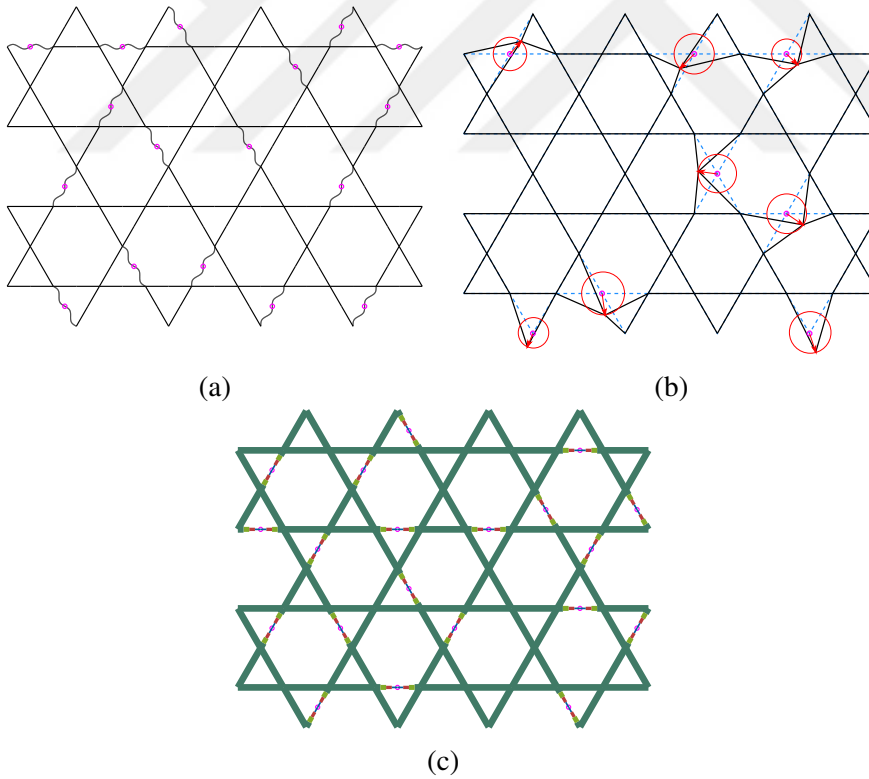
Şekil 2.7: Üretim kusurlarının şematik gösterimi: (a) eksik hücreler (EH), (b) dalgalı hücre duvarı (DHD), (c) sapmış (*Ing.* misaligned) hücre duvarı (SHD), (d) değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD).

Denklem (2.5)'te, y ve x sırasıyla kirişin uzun eksenine dik ve paralel doğrultulardaki koordinat eksenlerini, A ve f sırasıyla dalga'nın genlik ve frekansını, l_0 ise kirişin deformasyon öncesi boyunu temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan SE analizlerinde $A = 0.05$ ve $f = 2$ alınmıştır. Şekil 2.7 (c), sapmış hücre duvarlarını göstermektedir. SE ağında sapmış hücre duvarları başka bir deyişle yer değiştirmiş düğüm noktaları oluşturmak için, rastgele seçilen düğüm noktaları ilk konumlarından saptırılmaktadır. Düğüm noktasının sapmış konumu; noktanın ilk konumu merkez alınarak çizilen, Şekil 2.7 (c)'de kesik kırmızı çizgilerle gösterilen, r yarıçaplı dairenin üzerindedir ve latisin global yatay eksenine θ açısı yapmaktadır. Hem $0 < r \leq l_0/2$ yarıçapı hem de $0 \leq \theta \leq 2\pi$ açısı rastgele seçilmektedir. Şekil 2.7 (d), değişken kalınlıklı hücre duvarı kusurunun SE ağına nasıl aktarıldığını göstermektedir. Değişken kalınlıklı kirişler, uzunlukları eşit sekiz küçük kiriş elemana bölünmektedir. Sekiz elemandan oluşan yeni kiriş, kendi merkezine göre simetriktir; yani merkezden eşit

uzaklıktaki elemanların geometrik özellikleri aynıdır. Kirişin sağ ve sol uçlardaki düğüm noktalarına bağlanan iki elemanın düzlem içi kalınlıkları, latisin bağlı yoğunluğuna göre belirlenen düzlem içi kalınlık değerine eşittir. İki uçtaki düğüm noktalarından uzaklaştıkça elemanların düzlem içi kalınlıkları

$$t_k = \left(\frac{1-R}{3R} \right) t_{di} k - \left(\frac{1-4R}{3R} \right) t_{di}, \quad (2.6)$$

denklemleriyle, doğrusal olarak azalmaktadır. Bu denklemde $k = 1, 2, 3, 4$, düzlem içi kalınlığı (t_k) hesaplanan elemanı, R ise kalınlık azalma oranını ifade etmektedir. Kiriş merkeze göre simetrik olduğu için yalnızca ilk dört elemanın düzlem içi kalınlıklarını hesaplamak yeterlidir. Denklem (2.6), $k = 1$ için $t_k = t_{di}$ değerini, $k = 4$ için (yani düzlem içi kalınlığı en küçük eleman için) $t_k = t_{mdi} = t_{di}/R$ değerini vermektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan SE analizlerinde $R = 5$ alınmıştır. Şekil 2.8; (a) dalgalı hücre duvarı (DHD), (b) sapmış hücre duvarı (SHD) ve (c) değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD) kusurları için sonlu elemanlar ağları üzerinde örnekler göstermektedir.



Şekil 2.8: Üretim kusurları için kusurları için sonlu elemanlar ağları üzerinde örnekler: (a) dalgalı hücre duvarı (DHD, dalganın genliği $A = 0.05$, frekansı ise $f = 2$, bkz. Denklem (2.5)), (b) sapmış hücre duvarı (SHD, $0 < r \leq l_0/2$ ve $0 \leq \theta \leq 2\pi$) ve (c) değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD, $t_{di} = 1$ mm, $R = 5$, bkz. Denklem (2.6)).

Sonlu elemanlar yöntemi ile içerisinde rastgele dağılmış kusur içeren latis malzemenin oluşturulmasının ardından analizler Şekil 2.6'da gösterilen sınır koşullarına göre gerçekleştirilmektedir. Burada, latis malzemenin dış kenarlarına karşılık gelen düğüm noktaları tüm serbestlik derecelerinde (düzlem içi yer değiştirme ve düzlemde dönme) tutulurken eyleyici noktalarına karşılık gelen düğüm noktalarına yatay yönde birbirine zıt yönde tanımlı bir hareket uygulanmaktadır. Böylece malzeme üzerinde eyleyici ile verilmek istenen gerinim (*İng.* strain) değerine uyumlu şekilde eyleyicinin düğüm noktalarında $\delta = (\epsilon_a l_o)/2$ kadar yatay yönde yer değiştirme verilmiş olur. Bu analiz sonrası eyleyici hareketi uygulanan düğüm noktalarından elde edilen reaksiyon kuvveti, eyleyici üzerinde oluşan kuvvet değerini (*t*) vermektedir. Eyleyici hareket analizi dışında, kusurlar sebebiyle latis malzemenin etkin elastik modülündeki değişim belirlenmek istenmiştir. Bu bağlamda ABAQUS yazılımında aynı model üzerinde bir basınç uygulama analizi çözdürülmektedir. Bu analizde latisin alt yüzeyindeki düğüm noktaları sadece yüzey normalinde tutulmakta, üst yüzeydeyse birim gerinim yaratmak amacıyla tanımlı bir yer değiştirme yükü (δ_p) verilmektedir. Latisin uzun yüzeyinde tanımlı bir yer değiştirme yükü ile elde edilen basınç yöntemi elbette uç etkilerinden (*İng.* end effect) muaf değildir fakat $800l_o \times 32\sqrt{3}l_o$ ebatındaki yapıda karşılaştırma yapabilmek ve etkin elastik modül üzerindeki düşüş trendini görebilmek adına fikir vericidir. Bu analizin ardından latisin etkin elastik modülü aşağıdaki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$E_k = \frac{\sum_{i=1}^n R_y(x, H)}{\delta_p L t_{do}} H, \quad (2.7)$$

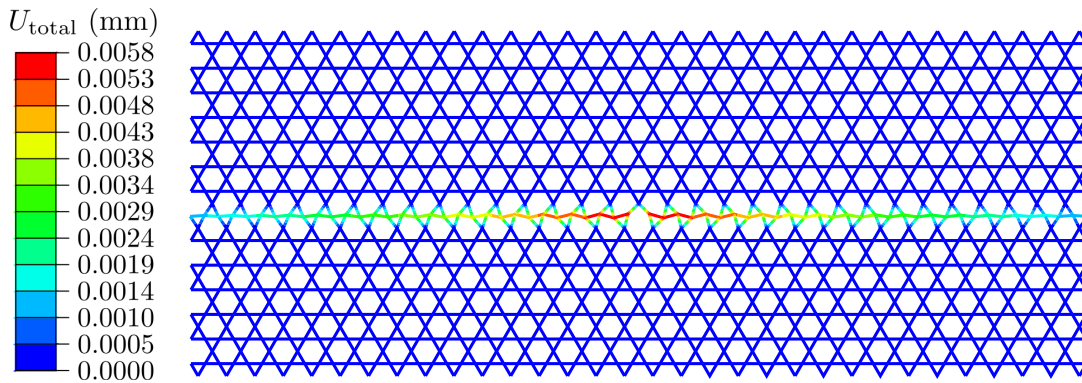
Burada $R_y(x, H)$ fonksiyonu, latisin üst yüzeyinde ($y = H$) basınç için yer değiştirme yükü (δ_p) uygulanmış düğüm noktalarından analiz sonucu elde edilen reaksiyon kuvveti çıktısını vermektedir. Bu düğüm noktalarının tamamındaki reaksiyon kuvvetlerinin toplamının uygulanan yer değiştirmeye oranı, kusurlu latisin etkin elastik modül değerini (E_k) vermektedir.

2.4 Sonlu Elemanlar (SE) Analizleri ve Elde Edilen Sonuçlar

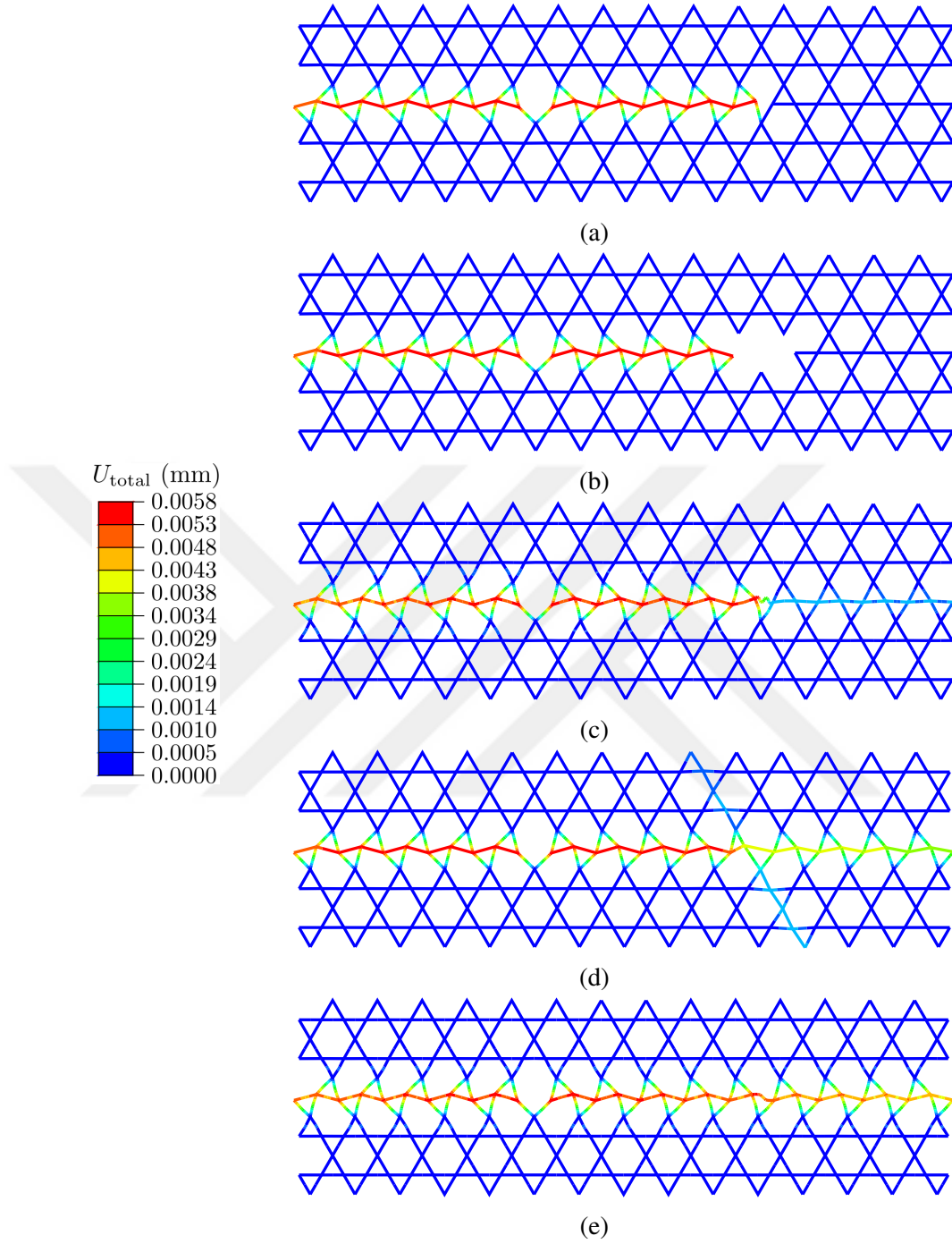
Kusurlu latislerin şekil değiştirme yetisi incelenirken, kusurun eyleyici koridoru üzerine denk gelmesinin sönümlenme mesafesini önemli ölçüde azalttığı fark edilmiştir. Dolayısıyla kusurların etkisi iki farklı çalışma yapılarak incelenmiştir. İlk çalışmada, eyleyici koridoru üzerine, eyleyiciden belirli uzaklıklara tek bir kusurlu kiriş/hücre yerleştirilmiştir. İkinci çalışmada ise kusurlar, Şekil 2.5'te “üretim kusurlarının bulunduğu bölgeye” rastgele dağıtılırken, eyleyici koridoru üzerine hiç kusur denk gelmemesi sağlanmıştır.

2.4.1 Eyleyici koridoru üzerinde tek kusur bulunması

Şekil 2.9’da, merkezindeki tek bir eyleyici tarafından hareket verilen kusursuz bir Kagome latisteki toplam yer değiştirme $U_{\text{total}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ alanı gösterilmektedir. Latisteki yer değiştirme, $h_k \approx \sqrt{3} l_0$ yüksekliğine sahip bir eyleyici koridoru içerisinde kalmaktadır. En yüksek yer değiştirme eyleyicinin uç kısmında gerçekleşmekte ve yer değiştirme hareketi koridor içinde eyleyiciden uzaklaştıkça azalmaktadır. Koridor içerisinde bir adet kırık hücre duvarı (KHD) veya eksik hücre (EH) kusuru olması halinde yer değiştirme hareketi kusurun konulduğu noktada anında durdurulmaktadır (KHD için bkz. Şekil 2.10 (a) ve EH için bkz. Şekil 2.10 (b)). Buna karşın, koridor üzerinde bir adet dalgalı hücre duvarı (DHD) veya sapmış hücre duvarı (SHD) kusuru olması halinde eyleyici hareketi tam olarak durmamaktadır. DHD için kusurun olduğu bölgedeki yer değiştirme, eyleyicinin latise uyguladığı yer değiştirmenin %20’sine düşmektedir (bkz. Şekil 2.10 (c)). SHD kusuru için, kusurun kendi içerisinde rastgele davranış barındıran sapma parametreleri r ve θ değerlerine göre değişen bir sönümlenme meydana gelmektedir. Şekil 2.10 (d)’de verilen örnekte, kusurun olduğu bölgedeki yer değiştirme, eyleyicinin latise uyguladığı yer değiştirmenin %60’ına denk gelmektedir. SHD kusuru, gelen hareketi yine kusurun kendine özgü parametrelerine göre 60° , 120° , 240° veya 300° bir açı ile latis içerisinde eyleyici koridoru dışına yönlendirmektedir. Ayrıca, değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD), komşu hücre duvarlarına göre daha fazla deformasyon olsa da eyleyicinin latise uyguladığı yer değiştirmeyi azaltmadan komşu hücre duvarlarına iletebilmektedir.



Şekil 2.9: Tek bir doğrusal eyleyicinin, kusursuz bir Kagome latiste oluşturduğu toplam yer değiştirme alanı. Toplam yer değiştirme, U_T , düzlemdeki yer değiştirmelerin (U_1 ve U_2) vektörel toplamını ifade etmektedir. Deformasyon 50 kat abartılmıştır.

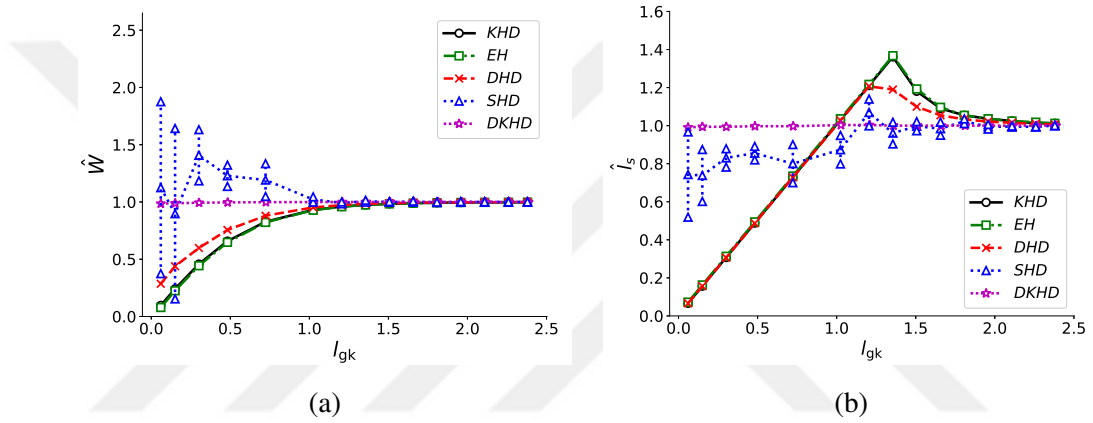


Şekil 2.10: Eyleyici koridoru üzerinde tek bir (a) kırık hücre duvarı, (b) eksik hücre, (c) dalgalı hücre duvarı, (d) sapmış hücre duvarı ve (e) değişken kalınlıklı hücre duvarı bulunan, doğrusal bir eyleyici etkisinde şekil değiştiren Kagome latisteki toplam yer değiştirme alanı. Toplam yer değiştirme, U_T , düzlemdeki yer değiştirmelerin (U_1 ve U_2) vektörel toplamını ifade etmektedir. Deformasyon 50 kat abartılmıştır.

Şekil 2.11, Kagome latis için, eyleyici koridoru içine yerleştirilen tek bir kusurun—kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)—normalize edilmiş eyleyici enerjisine ($\hat{W} = W/W_0$) ve sönümlenme mesafesine ($\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$) olan etkilerini görelî kusur konumuna ($l_{gk} = l_k/l_{s0}$) bağılı olarak göstermektedir. l_k , kusurun eyleyiciye daha yakın olan ucuna mesafesi, l_{s0} ve l_s ise, sırasıyla, kusursuz ve kusur içeren latis yapılar için sönümlenme mesafesidir. Şekil 2.11 (a)'da gösterildiği üzere; KHD, EH ve DHD kusurları, eyleyici enerjisi üzerinde benzer etkiye sahiptir. Kusur eyleyiciye yakın olduğunda bu kusurlar için en düşük eyleyici enerjisi elde edilmektedir. Bu durumun sebebi, kusur nedeniyle eyleyici hareketinin durdurulmasıdır. Görelî kusur konumu l_{gk} değeri artarak 1'e yaklaşırken eyleyici enerjisi de artarak W_0 değerine yakınsamaktadır. KHD ve EH kusurlarında tüm l_{gk} noktaları için normalize eyleyici enerjisi değerleri neredeyse aynıdır. Bununla beraber, DHD kusurunun normalize eyleyici enerjisi, KHD ve EH kusurları için hesaplanan değerlerden daha büyüktür. Bunun sebebi, eyleyici koridorunun harekete karşı koyan lokal direngenliğinin, DHD kusuru için KHD ve EH kusurlarına göre daha az bir düşüş göstermesidir. Diğer bir sonuç ise DKHD kusurunun, eklendiği bölgedeki duvarı komşu duvarlardan daha fazla deforme etse de hareket iletimini ve eyleyici enerjisini hiç etkilememesidir. Diğer kusurlardan farklı olarak SHD kusuru, kendine özgü ve tanımlı aralıklarda rastgele değerler alabilen r ve θ (bkz. Şekil 2.7) parametreleri nedeniyle her hesaplamada farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu amaçla, üç farklı model oluşturularak bunlardan elde edilen sonuçlar, verilerin ortalaması ve bu ortalamaya hata çubuğu olarak eklenen verilerin standart sapması şeklinde sunulmuştur (bkz. Şekil 2.11 (a)). Sapmış düğüm noktasının aldığı konuma göre eyleyici enerjisinde artma veya azalma gözlemlenebilmektedir. Burada belirli durumlar için eyleyici enerjisinde gerçekleşen artışın sebebi, SHD kusurunun $l_{gk} < 1$ konumundayken eyleyiciden gelen hareketin yönünü değiştirerek bu hareketi eyleyici koridorunun dışına doğru yönlendirebilmesidir. Beş kusurdan herhangi biri için, kusur konumu kusursuz Kagome latisine ait sönümlenme mesafesinin ötesine geçtiğinde ($l_{gk} \geq 1$), sönümlenme enerjisi 1'e yakınsamaktadır ($W \rightarrow W_0$). KHD, EH ve DHD kusurları için normalize eyleyici enerjisi ($\hat{W}$) her zaman 1'in altındadır.

Normalize sönümlenme mesafesi bakımından KHD, EH ve DHD kusurları benzer bir davranış göstermektedir. Bu üç kusur için başlangıçta normalize sönümleme mesafesi ve görelî kusur konumu çakışıktır (yani $\hat{l}_s = l_{gk}$). Bu sonuca, bahsi geçen üç kusurdan KHD ve EH konulduğunda eyleyiciden kaynaklı hareketin aniden durdurulduğunu veya DHD konulduğunda hareketin ciddi oranda düştüğünü gösteren Şekil 2.10 üzerinden de varılabilir. Burada ilginç olan bulgu ise $\hat{l}_s$ ve l_{gk} eşitliğinin,

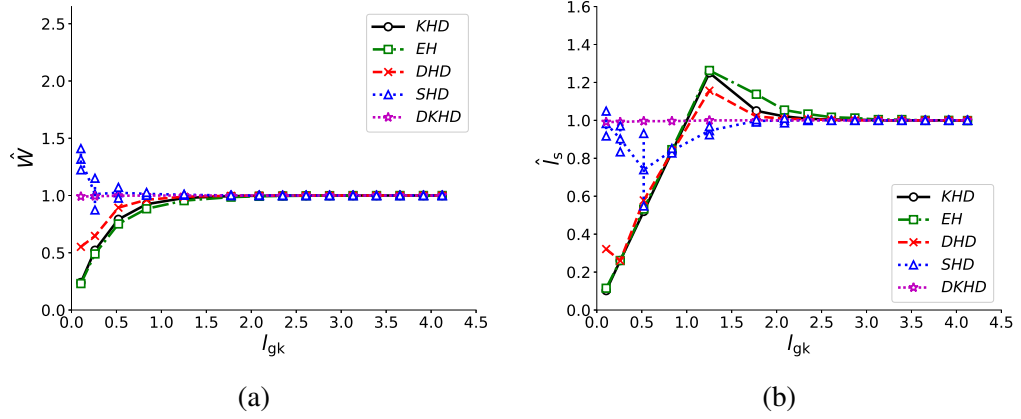
kusur konumu $l_{gk} = 1$ ötesinde de devam ederek KHD ve EH için $l_{gk} \approx 1.35$ değerine, DHD içinse $l_{gk} \approx 1.2$ değerine kadar artmasıdır. Başka bir deyişle, kusursuz Kagome latisteki sönümlenme mesafesinin ötesine KHD veya EH kusuru yerleştirilerek sönümlenme mesafesini %35'e; DHD kusuru yerleştirilerek de %20'ye kadar artırmak mümkündür. Artan l_{gk} değerine bağlı olarak $\hat{l}_s$ değerindeki doğrusal artış, tepe değerinin aşılmasının ardından düşüşe geçmekte ve tüm kusur tipleri için $l_{gk} > 2.5$ olduğunda l_s değeri l_{s0} değerine yakınsamaktadır. DKHD kusuru, eyleyici enerjisi üzerinde hiçbir etki yapmamaktadır. SHD kusurunun $l_{gk} < 1$ bölgesinde, kusurun sahip olduğu r ve θ değerlerine göre rastgele şekilde sönümlenme mesafesini düşürdüğü, fakat $l_{gk} > 1.5$ olduğunda etkisinin ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu görülmektedir.



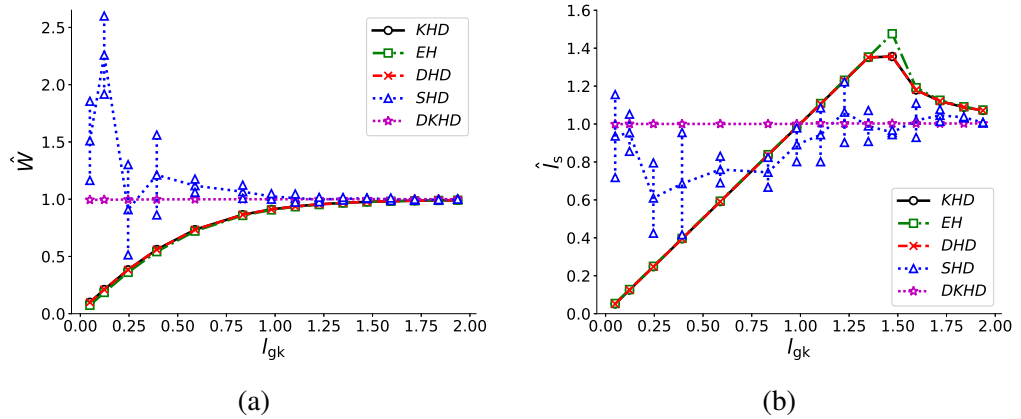
Şekil 2.11: Kagome latis için eyleyici koridoru içine yerleştirilen tek kusurun —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (b) sönümleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler göreceli kusur konumunun, $l_{gk} = l_k/l_{s0}$ fonksiyonudur. l_k kusurun eyleyiciye daha yakın olan ucuna mesafesi, ve l_{s0} and l_s sırasıyla kusursuz ve kusur içeren latis yapılar için sönümleme mesafesidir.

Şekil 2.12 ve 2.13, sırasıyla, Çift Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome latisler için elde edilen sonuçları göstermektedir. Ele alınan üç latis mikro mimarisi arasındaki temel bir fark, mükemmel yapıdaki normalize sönümlenme mesafesinin (sönümleme mesafesinin hücre duvarı uzunluğuna oranının) Kagome, Çift Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome için sırasıyla $l_{s0}/l_0 = \{165, 96, 204\}$ olmasıdır. Şekil değiştirme performansındaki farklılıkları vurgulamak için, eyleyici uç noktasından kusurların mutlak mesafesi, l_k , her üç latis için de aynı değerde alınmıştır. Bu nedenle, kusur eyleyiciden, örneğin 165 mm uzaktaysa, Kagome, Çift Kaogme ve Eşmerkez Üçgenli

Kagome için karşılık gelen görelî kusur konumları sırasıyla $l_{gk} = \{1.00, 1.72, 0.81\}$ şeklindedir. Buna göre, x -ekseni aralıkları Şekil 2.11, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13 için farklılık gösterirken, y eksenî aralıkları, kolay karşılaştırma amacıyla aynı tutulmuştur. Her bir kusur türünün etkisi, bazı nicel farklılıklarla birlikte, her üç latis yapıda da aynı eğilimi göstermektedir. SHD içeren latislerde en büyük $\hat{W}$ değeri; Eşmerkez Üçgenli Kagome için yaklaşık 2,65'e, Kagome için 2,13'e ve Çift Kagome için 1,42'ye kadar yükselebilmektedir. Kusurların sönümlenme mesafesi üzerindeki etkileri, eyleyici enerjisi üzerindeki etkiler ile doğrudan ilişkilidir. KHD veya EH kusurları için normalize sönümlenme mesafesi artan l_{gk} ile doğrusal olarak artarak $l_{gk} > 1$ 'in ötesinde bir tepe yapmakta, buradan da doğrusal olmayan bir şekilde $\hat{l}_s \approx 1$ değerine azalarak yakısamaya başlamaktadır. Normalize sönümlenme mesafesi $\hat{l}_s$ tepe değerine, Kagome ve Çift Kagome yapıları için KHD ve EH kusurları ile, Eşmerkez Üçgenli Kagome için EH kusuru ile erişilmektedir. Tepe normalize sönümlenme mesafesi değerleri Kagome latis için $\hat{l}_s \approx 1.35$, Çift Kagome latis için $\hat{l}_s \approx 1.26$, ve Eşmerkez Üçgenli Kagome için $\hat{l}_s \approx 1.48$ 'dir. Çift Kagome latis için DHD kusurunun sönümlenme mesafesine etkisi, kusurun farklı uzunluklara sahip iki tip hücre duvarı ailesinden hangisine karşılık geldiği ile ilgilidir. DHD kusuru kısa bir hücre duvarı üzerinde meydana gelirse bu kusurun sönümlenme mesafesi üzerinde yapıtğı etki daha küçüktür; bu durum Şekil 2.12 (b)'de verilen $l_{gk} - \hat{l}_s$ grafiğinden gözlemlenebilir. En küçük l_{gk} değeri için, DHD kusuru, uzunluğu $l_{hd} = l_{hd1} = 0.4$ mm olan kısa duvara karşılık gelmektedir. Diğer l_{gk} değerleri için ise kusur $l_{hd} = l_{hd2} = 0.8$ mm olan uzun duvarlarda oluşmaktadır. DHD kusuru için $\hat{l}_s$ grafiğinin ilk veri noktasındaki olağan dışı davranış bu şekilde açıklanabilir. SHD kusuru için eyleyici enerjisinde en büyük düşüş Eşmerkez Üçgenli Kagome latiste görülmekte, bunu Kagome ve Çift Kagome latisler izlemektedir. DKHD, üç latis için de eyleyici enerjisini veya sönümlenme mesafesini etkilememektedir.



Şekil 2.12: Çift Kagome latis için eyleyici koridoru içine yerleştirilen tek kusurun —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (b) sönümlenme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler göreceli kusur konumunun, $l_{gk} = l_k/l_{s0}$ fonksiyonudur. l_k kusurun eyleyiciye daha yakın olan ucuna mesafesi, ve l_{s0} and l_s sırasıyla kusursuz ve kusur içeren latis yapıları için sönümlenme mesafesidir.

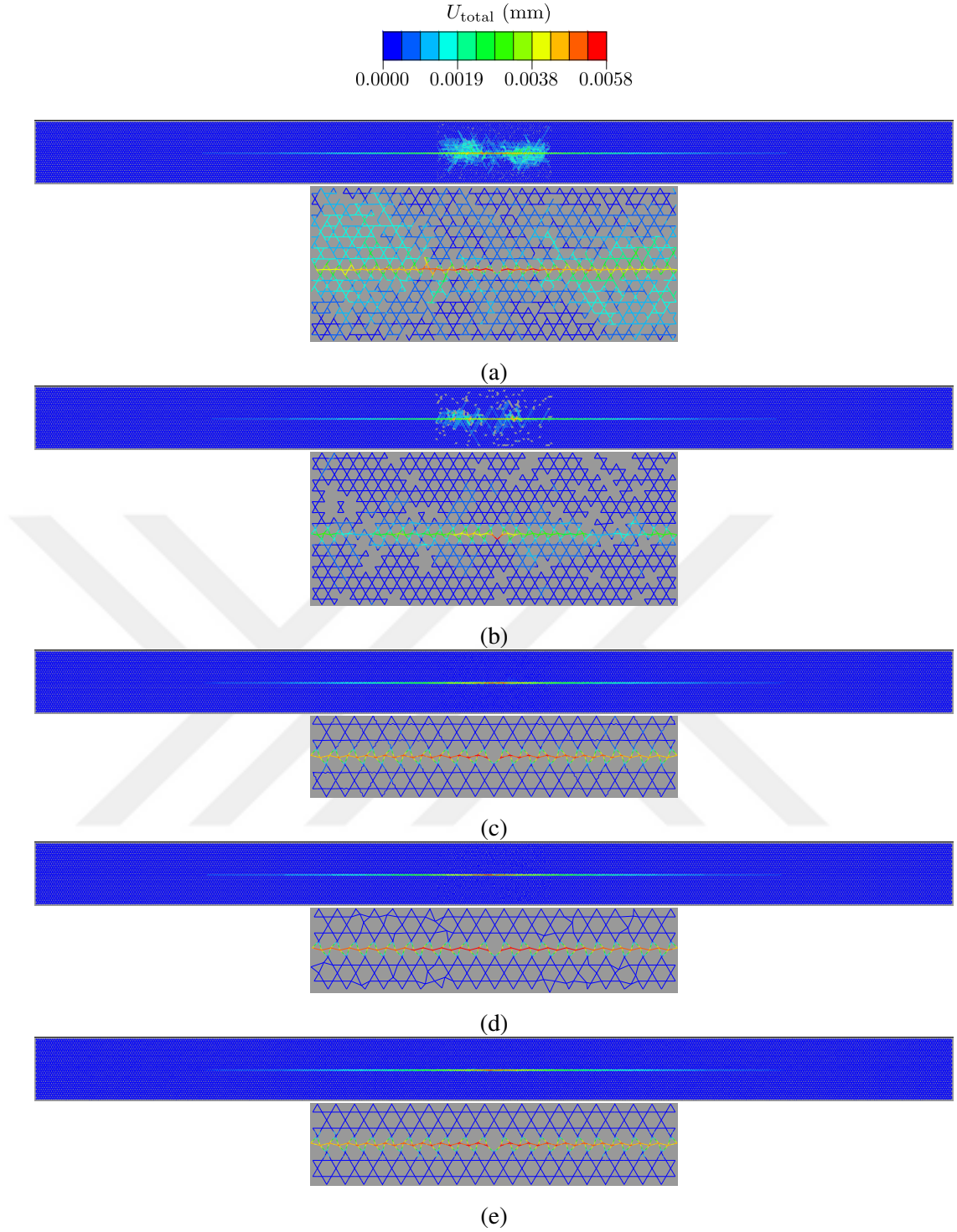


Şekil 2.13: Eşmerkez Üçgenli Kagome latis için eyleyici koridoru içine yerleştirilen tek kusurun —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (b) sönümlenme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler göreceli kusur konumunun, $l_{gk} = l_k/l_{s0}$ fonksiyonudur. l_k kusurun eyleyiciye daha yakın olan ucuna mesafesi, ve l_{s0} and l_s sırasıyla kusursuz ve kusur içeren latis yapıları için sönümlenme mesafesidir.

2.4.2 Kusur bölgesinde rastgele dağıtılmış kusurların bulunması

Bu bölümde, $K = \%1, \%2, \%5, \%10$ oranında kusur, kusur bölgesinde rastgele dağıtılırken, eyleyici koridoru ve eyleyici yakın çevresi kusursuz olarak modellenmiştir. İki farklı analiz seti gerçekleştirilmiştir: kusur bölgesinin göreceli uzunluğu (bkz. Şekil 2.5) $l/L = 1/8$ ve $l/L = 1$ olanlar. Her analiz seti için K kusur yüzdesi, kusurun tipine bağlı olarak, kusurlu hücrelerin, hücre duvarlarının veya yer değiştirmiş düğüm noktalarının, kusur bölgesindeki karşılık gelen toplam (hücre, hücre duvarı veya düğüm noktası) sayısına göre yüzdesini temsil etmektedir. Dolayısıyla belirli bir K değeri için toplam kusur sayısı, $l/L = 1$ olan analizlerde $l/L = 1/8$ olan analizlerdekinden sekiz kat daha fazladır.

Şekil 2.14, geometrik merkezinde bulunan bir doğrusal eyleyici tarafından deforme edilmiş Kagome latis bloğundaki toplam yer değiştirme büyüklüğünün ($U_{\text{toplam}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$) dağılımını göstermektedir. Şekil 2.14 (a)'da %10 KHD, Şekil 2.14 (b)'de %10 EH, Şekil 2.14 (c)'de %10 DHD, Şekil 2.14 (d)'de %10 SHD ve Şekil 2.14 (e)'de %10 DKHD kusuru içeren Kagome latis yapıları gösterilmiştir. Bu kusurlar Kagome latis blok üzerinde $l/L = 1/8$ olarak tanımlı kusur bölgesine rastgele dağıtılmıştır. Her kusur türü için, hem latis bloğunun tamamı hem de eyleyici çevresindeki bölgenin yakından görünimleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir. KHD ve EH için, eyleyiciden kaynaklanan deformasyon, kusurlu bölge içinde birçok farklı doğrultuda yayılırken, latis bloğun kusursuz bölümlerinde deformasyon eyleyici koridoru ile sınırlıdır. Diğer üç kusur için ise deformasyon tüm blok boyunca eyleyici koridorunda yoğunlaşmaktadır. İleride değinileceği gibi, kusurlar latis bloğun etkin Young modülünü, eyleyici enerjisini ve sönümlenme mesafesini azaltmaktadır.



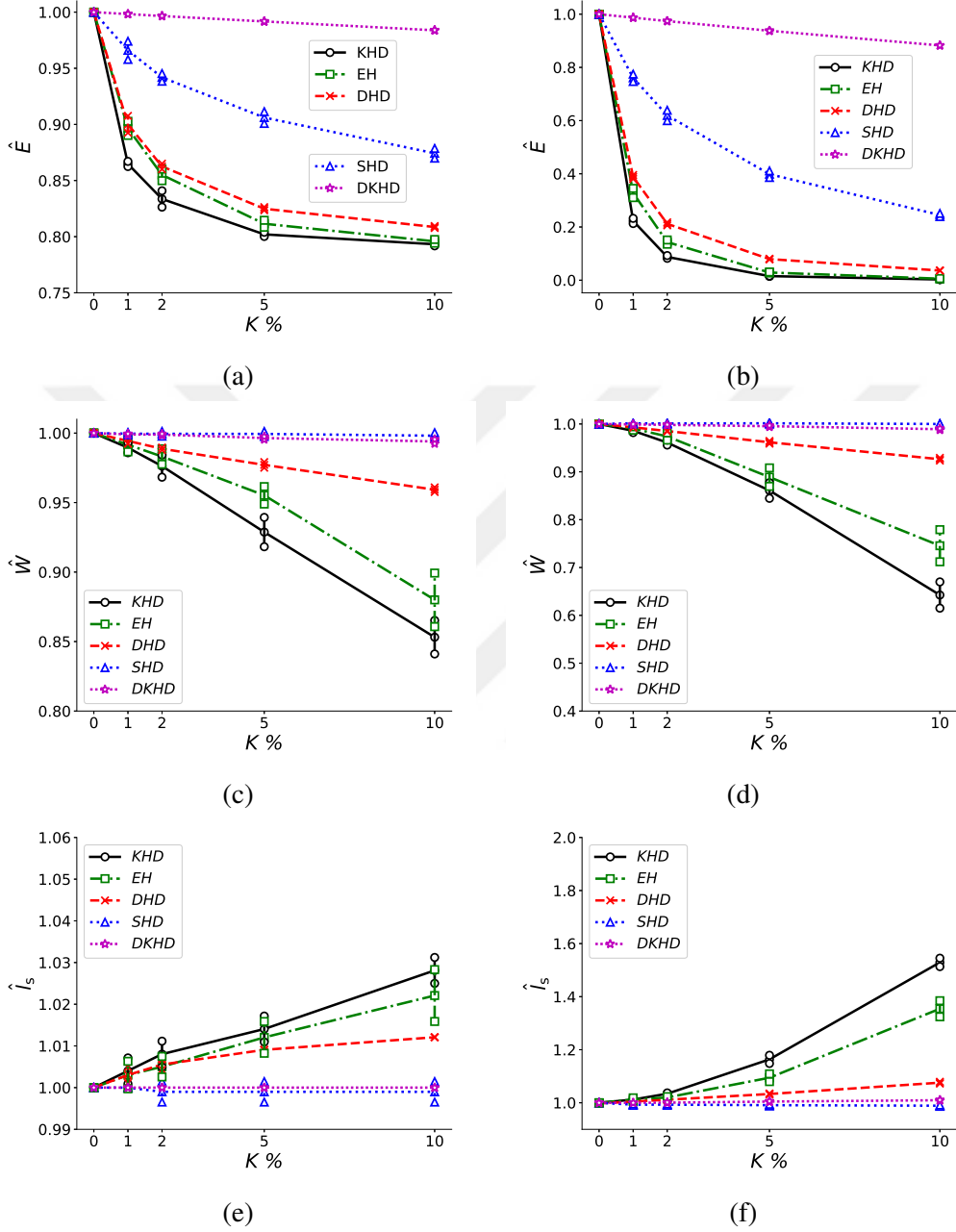
Şekil 2.14: Latis bloğunun merkezindeki tek bir eyleyici tarafından hareket verilen Kagome latis blok üzerindeki toplam yer değiştirme $U_{\text{total}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ dağılımı. Blok üzerinde %10 oranında (a) kırık hücre duvarı (b) eksik hücre (c) dalgalı hücre duvarı (d) sapmış hücre duvarı (e) değişken kalınlıklı hücre duvarı kusurları rastgele olarak $l/L = 1/8$ ile tanımlı kusur bölgesine dağıtılmıştır (bkz. Şekil 2.5). Deformasyon 50 kat abartılmıştır.

Şekil 2.15, Kagome yapı üzerinde rastgele dağıtılmış kusurların—kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)—etkilerini kusur yüzdesi K 'ya bağlı olarak göstermektedir. Şekil 2.15 (a) ve (b) kusurların normalize etkin Young modülüne ($\hat{E} = E/E_0$), Şekil 2.15 (c) ve (d) kusurların eyleyici enerjisine ($\hat{W} = W/W_0$), Şekil 2.15 (e) ve (f) kusurların sönümlenme mesafesine ($\hat{l}_a = l_a/l_{a0}$) olan etkilerini göstermektedir. Göreli kusur bölgesi uzunluğu Şekil 2.15 (a), (c) ve (e) için $l/L = 1/8$; Şekil 2.15 (b), (d) ve (f) için $l/L = 1$ 'dir. Normalize etkin Young modülü, $\hat{E} = E/E_0$, dikey eksenle yapılan sıkıştırma analizleri sonucunda kusurlu blok (E) ve kusursuz blok (E_0) için elde edilen makroskobik Young modülü değerlerinin oranını ifade etmektedir. Kagome latisteki kusurların uzamsal (*İng. spatial*) dağılımının stokastik etkisini hesaba katmak amacıyla, her bir kusur türü için kusurların rastgele dağılımlarının altı farklı tekrarlı hesaplaması yapılmıştır. Şekil 2.15'te analiz sonuçları standart sapmalarla birlikte hata çubukları olarak sunulmaktadır. Kagome latiste hataların standart sapmalarının oldukça küçük olduğu tespit edildiği için Çift Kagome ve Eşmerkez Eksenli Kagome latislerde analizler için üç tekrar yapılması yeterli görülmüştür (bkz. Şekil 2.16 ve 2.17).

Beş farklı kusur tipinin her biri, artan K değerine bağlı olarak $\hat{E}$ değerinde bir düşüşe neden olmaktadır. $\hat{E}$ değerindeki en büyük düşüş KHD için meydana gelmekte, bunu, sırasıyla, EH, DHD, SHD ve DKHD izlemektedir. Etkin Young modülündeki düşüş seviyesi, KHD, EH ve DHD kusurları için karşılaştırılabilir düzeyde olmakla birlikte, DKHD için önemli ölçüde daha azdır. SHD için ise artan K değerine bağlı olarak $\hat{E}$ değerindeki düşüş, DKHD kusurundakine göre daha az, diğer kusurlara göre daha fazladır. $\hat{E}$, doğrusal bir eğilim izlediği DKHD dışında, tüm kusur türleri için doğrusal olmayan bir şekilde azalır. KHD kusuru için $l/L = 1/8$ ve $K = \%10$ olan bir kusurlu bölge için $\hat{E} \approx 0.8$ değerini alırken, DKHD kusuru için bu değer $\hat{E} \approx 0.98$ 'e ulaşmaktadır (bkz. Şekil 2.15 (a)). DKHD dışında kalan kusurlar için artan K değerine bağlı olarak $\hat{E}$ değerindeki azalma, $l/L = 1$ olduğunda önemli ölçüde daha belirgindir: $K = \%1$ için bile, KHD kusurunda $\hat{E} \approx 0.22$, EH kusurunda $\hat{E} \approx 0.33$, DHD kusurunda $\hat{E} \approx 0.39$, SHD kusurunda ise $\hat{E} \approx 0.75$ olmaktadır. Kusur yüzdesi $K = \%10$ olduğunda, KHD ve EH kusurları için $\hat{E}$ neredeyse sıfırdır (bkz. Şekil 2.15 (b)). Normalize eyleyici enerjisi ($\hat{W} = W$) göz önüne alındığında, kusurların yaratmış olduğu düşüşün etkinlik sırası, etkin Young modülündeki ($\hat{E}$) durum ile aynıdır. Yalnızca DKHD kusurunun etkinliği burada daha azdır (bkz. Şekil.2.15 (c) ve (d)). Normalize eyleyici enerjisi ($\hat{W} = W$), SHD kusurlarına karşı neredeyse tamamen duyarsızdır; ancak, KHD ve EH kusurları nedeniyle önemli ölçüde azalmaktadır. Normalize eyleyici enerjisindeki ($\hat{W} = W$) azalma miktarı, artan K ile artmaktadır.

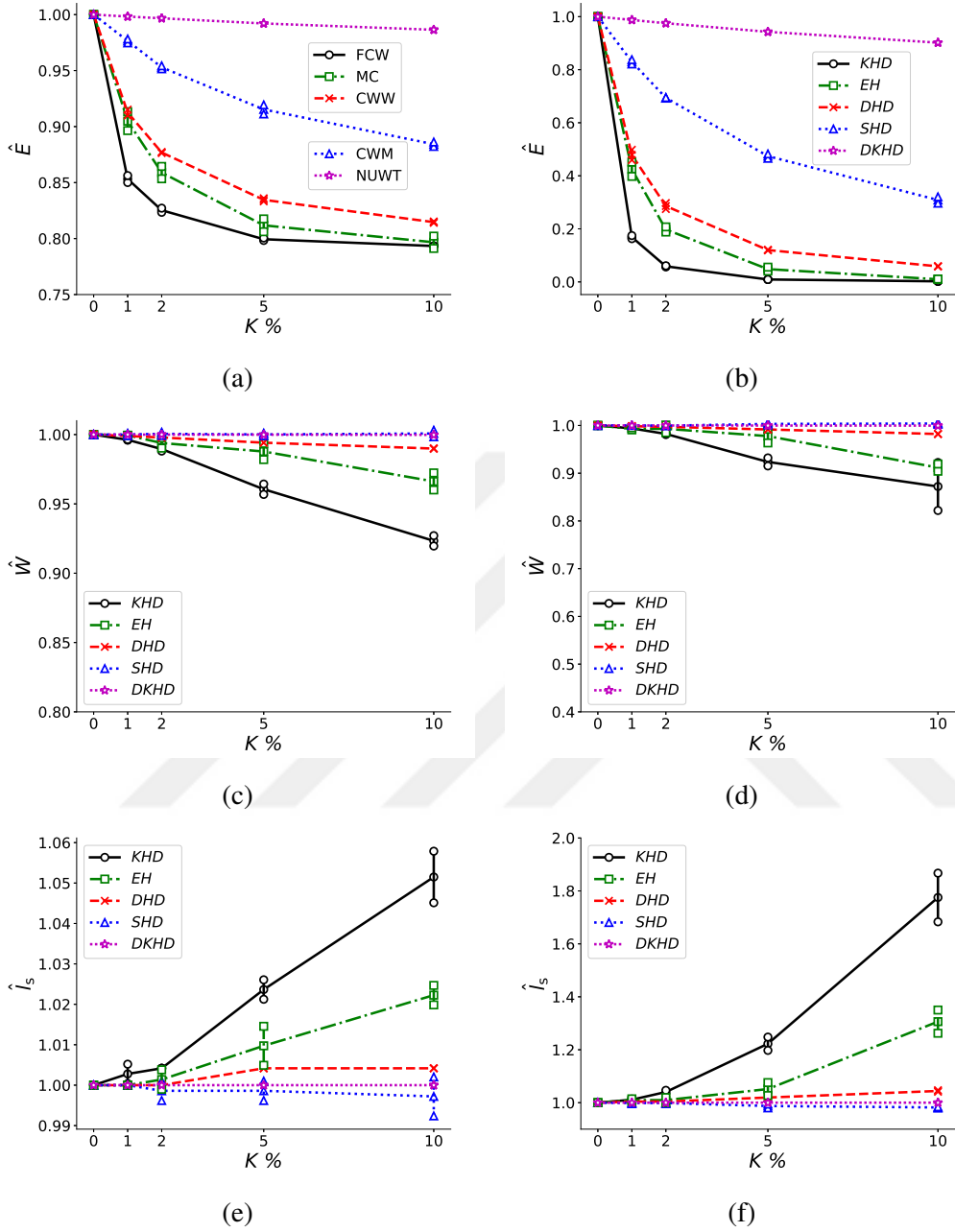
Benzer şekilde, normalize sönümlenme mesafesi ($\hat{l}_s$); KHD, DHD ve EH kusurları için artan K ile artmaktadır. KHD en yüksek artış oranına neden olurken, DHD en düşük artış oranına neden olmaktadır, DKHD kusurunun $\hat{l}_s$ üzerinde hiçbir etkisi yoktur ve SHD kusurunun etkisi marjinaldir. SHD kusuru, yer değiştirmiş düğüm noktalarının uzamsal dağılımına bağlı olarak, $\hat{l}_s$ değerini yalnızca biraz azaltmakta veya artırmaktadır. Her bir kusur türünün etkisi, $l/L = 1/8$ ve $l/L = 1$ için aynı eğilimi takip etmekte, ancak, ilgili parametredeki düşüş veya artış $l/L = 1$ için daha büyük olmaktadır.



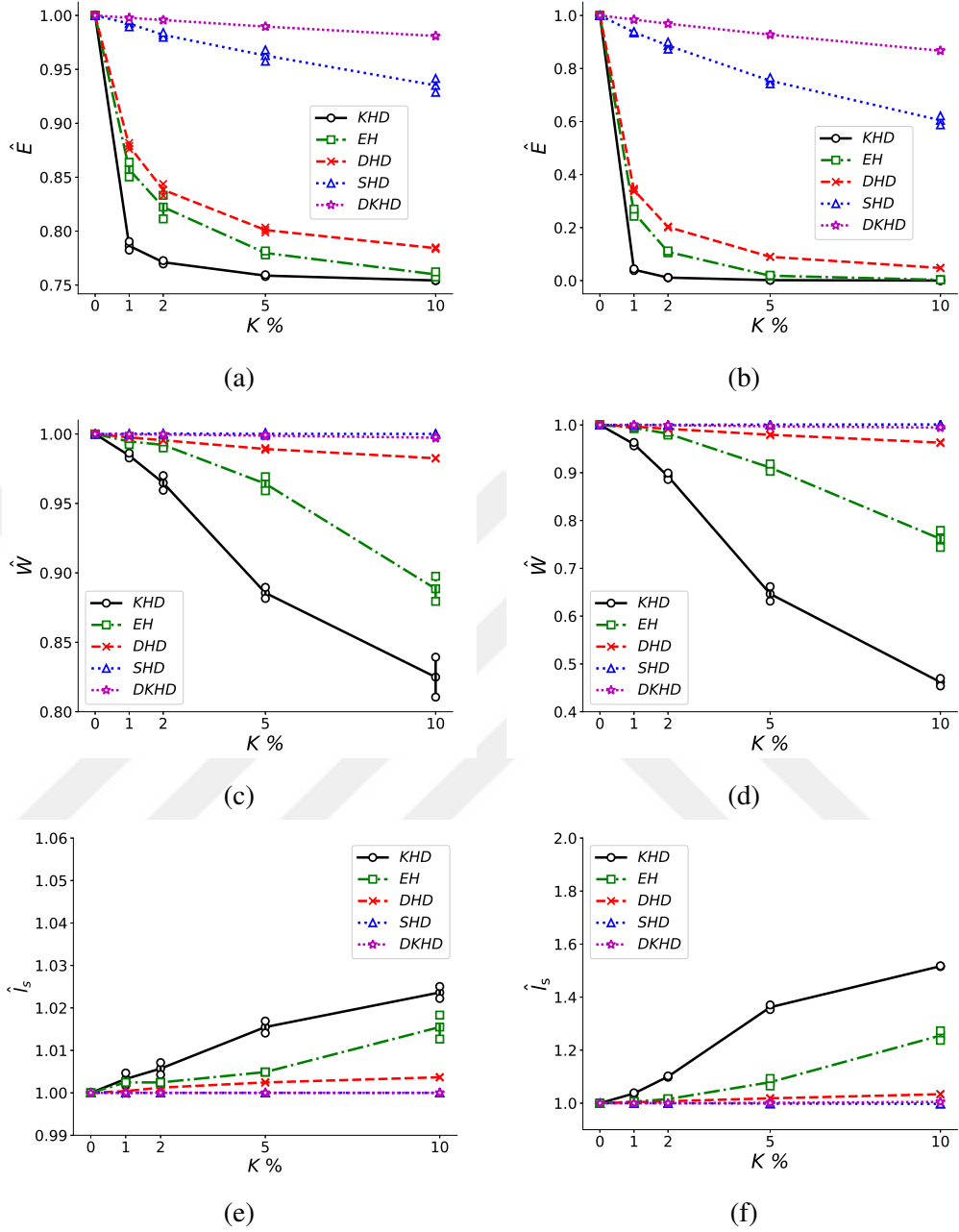


Şekil 2.15: Kagome latis için rastgele dağıtılan kusurların —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a,b) etkin elastik modüle, $\hat{E} = E/E_0$, (c,d) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (e,f) sönümleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler kusur yüzdesinin, K fonksiyonudur. Göreli kusur bölgesi (a,c,e) durumları için $l/L = 1/8$, (b,d,f) durumları için $l/L = 1$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 2.5).

Şekil 2.16 ve 2.17, Çift Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome latisler için elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Farklı latislere karşılık gelen sonuçların kolaylıkla karşılaştırabilmesi x ve y eksen aralıkları bütün latisler için eşit alınmıştır. Her üç latis için de; normalize etkin Young modülünün, eyleyici enerjisinin ve sönümlenme mesafesinin kusurlara duyarlılığı, artan K ile aynı şekilde gelişmektedir. DKHD kusurundan dolayı normalize etkin Young modülündeki azalma seviyesi, üç latiste hemen hemen aynıdır. SHD kusurlarına karşı en az duyarlı olan Eşmerkez Üçgenli Kagome latis iken, en duyarlı olan Kagome latistir. Çift Kagome latis için azalma, Kagome latistekinden biraz daha azdır. Azalan sırada; KHD, EH ve DHD kusurlarından kaynaklanan normalize etkin Young modülündeki düşüş, en çok Eşmerkez Üçgenli Kagome latis için belirgindir. Kagome ve Çift Kagome latisleri, EH ve DHD kusurlarına eşit derecede duyarlıdır. Ancak, normalize etkin Young modülünde KHD kusurundan kaynaklı azalma, özellikle $K < 5$ olan bölgede, Çift Kagome latiste Kagome latistekine göre daha belirgindir. Normalize eyleyici enerjisi göz önüne alındığında, her üç latis de SHD kusuruna karşı duyarsızdır ve DKHD kusuruna karşı yalnızca marjinal olarak duyarlıdır. $\hat{W}$ 'deki en büyük azalma, her üç latiste de KHD için meydana gelmekte, KHD kusurunu, azalan sırayla, EH ve DHD takip etmektedir. KHD ve EH nedeniyle azalma seviyesi, Eşmerkez Üçgenli Kagome latis için en büyük, Çift Kagome latis için ise en küçüktür. Öte yandan, DHD kusurunun etkisi, en çok Kagome latisi için belirginken, bu kusur Çift Kagome latisi Eşmerkez Üçgenli Kagome latisten biraz daha az etkilemektedir. Eyleyici enerjisi durumuna benzer şekilde, SHD ve DKHD kusurları, sönümlenme mesafesi üzerinde de ihmal edilebilir etkilere sahiptir. Bununla birlikte, KHD, EH ve DHD, her üç latis mikro mimarisinde de normalize edilmiş sönümlenme mesafesinde bir artışa neden olur. Artışın büyüklük sıralaması; en yüksekte en düşüğe doğru, KHD, EH ve DHD şeklindedir. Çift Kagome latis, KHD ve EH kusurlarına karşı en hassas latisksen, Kagome latis, DHD kusuruna karşı en hassas olan latistir.



Şekil 2.16: Çift Kagome latis için rastgele dağıtılan kusurların — kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a,b) etkin elastik modüle, $\hat{E} = E/E_0$, (c,d) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (e,f) sönümleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler kusur yüzdesinin, K fonksiyonudur. Görelî kusur bölgesi (a,c,e) durumları için $l/L = 1/8$, (b,d,f) durumları için $l/L = 1$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 2.5).



Şekil 2.17: Eşmerkez Üçgenli Kagome latis için rastgele dağıtılan kusurların —kırık hücre duvarı (KHD), eksik hücre (EH), dalgalı hücre duvarı (DHD), sapmış hücre duvarı (SHD), değişken kalınlıklı hücre duvarı (DKHD)— normalize edilmiş (a,b) etkin elastik modüle, $\hat{E} = E/E_0$, (c,d) eyleyici enerjisine, $\hat{W} = W/W_0$, ve (e,f) sönümleme mesafesine, $\hat{l}_s = l_s/l_{s0}$, etkisi. Bu etkiler kusur yüzdesinin, K fonksiyonudur. Göreli kusur bölgesi (a,c,e) durumları için $l/L = 1/8$, (b,d,f) durumları için $l/L = 1$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 2.5).

2.5 Kusur İçeren Latislerde Eyleyici Uygulaması için Sonuçların Tartışılması

Şekil değiştirmeye uygun bir latis malzeme; izotropik elastik mekanik özelliklere sahip olup eyleyici aktif olmadığı zaman direngen ve uzama-baskın bir davranış sergilemeli, eyleyici aktif olduğunda ise kolaylıkla deforme olabilen eğilme-baskın bir karaktere bürünmelidir. Bir latis malzemenin yüklemeye karşı uzama-baskın mı eğilme-baskın mı bir davranış sergileyeceği, o latis malzemenin, düğüm noktalarında sürtünmesiz pimler bulunan, eş değer kafes yapısının mekanizmaları incelenerek tespit edilebilir. Birim şekil değiştirme oluşturmayan bir mekanizmanın varlığı eyleyici aktif olmadığında latisin dış yükler altında direngen olmasına engel oluşturmazken, eyleyici aktif olduğunda ise kolaylıkla deforme olabilen eğilme-baskın bir karaktere bürünmesine olanak vermektedir. Birim şekil değiştirme oluşturan mekanizmalar ise latisin dış yükler altında eğilme-baskın bir davranış göstermesine sebebiyet vermektedir. Kısaca ifade edilecek olursa, şekil değiştirmeye uygun latis malzemeler Maxwell–Calladine kriterini sağlarlar ve yalnızca birim şekilde değiştirme oluşturmayan mekanizmalara sahiptirler. Tez kapsamında düşük eyleyici enerjisi ve yüksek sönümlenme mesafesine sahip oldukları tespit edilen Kagome, Çift Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome latisler de yalnızca birim şekilde değiştirme oluşturmayan mekanizmalara sahiptirler.

Latis malzemelerin elastisite modülünde üretim kusurlarından kaynaklı azalma en fazla kırık hücre duvarları için oluşmakta, bu kusuru azalan sırayla; eksik hücreler, dalgalı hücre duvarı, sapmış hücre duvarı ve değişken kalınlıklı hücre duvarı kusurları izlemektedir. Kırık hücre duvarları, latisin koordinasyon sayısını (*Ing.*, coordination number; bir düğüm noktasına kaç kirişin bağlı olduğunu ifade eder) azaltarak latiste birim şekil değiştirme oluşturan mekanizmaların ortaya çıkmasına ve dolayısıyla elastisite modülünün büyük oranda azalmasına sebebiyet vermektedir. Eksik hücrelere bir araya toplanmış kırık hücre duvarları olarak bakılabilir. Bir araya toplanma, kırık hücrelerin lokal etkisini artırırken global etkisini azaltmakta, yani latisin koordinasyon sayısındaki azalma, eksik hücreler olması durumunda kırık hücrelere nazaran daha az olmaktadır. Dolayısıyla eksik hücreler yüzünden elastisite modülündeki düşme, kırık hücreler yüzünden oluşan düşmeden daha azdır. Dalgalı hücre duvarı, latisin koordinasyon sayısını değiştirmese de aynı düğüm noktasına bağlı dalgalı kirişlerin düz kirişlere göre daha kolay deforme olabilmesinden ötürü, birim şekil değiştirme oluşturan mekanizmaların ortaya çıkmasına ve elastisite modülünün azalmasına sebebiyet vermektedir. Sapmış hücre duvarının etkisi büyük oranda lokal bir etki olup, latisin global kinematik/statik belirliliğini değiştirmemektedir. Elastisite modülünün azalma bu lokal etkilerden kaynaklı olup, kırık hücre duvarları, eksik hücreler ve

dalgalı hücre duvarı kusurlarında görüldüğü kadar fazla değildir. Değişken kalınlıklı hücre duvarının latisin kinematik/statik belirliliğine hiçbir etkisi yoktur ve birim şekil değiştirme oluşturan mekanizmaların ortaya çıkmasına sebep olmamaktadır. Elastisite modülünde bu kusurdan kaynaklı marjinal azalma, değişken kalınlıklı hücre duvarlarının eksenel ve eğilme direngenliklerinin homojen kalınlıklı hücre duvarlarına kıyasla daha az olmasından ötürüdür.

Kırık hücre duvarı, eksik hücreler, dalgalı hücre duvarı ve değişken kalınlıklı hücre duvarı kusurları için elastisite modülünde görülen azalma, eyleyici enerjisinde de bir azalmaya sebebiyet vermektedir. Oysaki sapmış hücre duvarının eyleyici enerjisine etkisi yok denecek kadar azdır. Eyleyicinin latise aktardığı enerji temel olarak latisin eyleyici koridorundaki (kısmen de koridor dışındaki) hücrelerin deforme olmasına sebebiyet verir. Yani eyleyici enerjisini belirleyen temel parametre eyleyici koridorunun lokal direngenliğidir. Sapmış hücre duvarları, yalnızca kendilerine çok yakın bölgeleri etkilemektedir ve eyleyici koridorunun dışında olduklarında eyleyici enerjisine etkileri ihmal edilebilir düzeydedir. Artan kusur yüzdesiyle latisin elastisite modülü ve eyleyici koridorunun lokal direngenliği azaltmakta, bu ise eyleyici enerjisinin azalmasına ve sönümlenme mesafesinin artmasına sebep olmaktadır. Ancak, elastisite modülündeki azalmayla birlikte gerçekleşen sönümlenme mesafesinin artması, şekil değiştirme uygulamaları için tercih edilen bir durum değildir. Zira elastisite modülündeki azalma latis hasara daha yatkın hale getirmektedir.

Eyleyicinin latiste oluşturduğu yer değiştirme alanı, kırık bir hücre duvarı veya eksik bir hücre ile karşılaşıldığında hemen durur. Zira yer değiştirme alanı yayılabilmek için bir ortama ihtiyaç duymaktadır. Eyleyici koridorunda dalgalı bir hücre duvarının varlığı, yer değiştirme büyüklüğünün dalgalı bir duvardan geçerken başlangıç değerinin %20'sinden daha azına düşmesi bakımından, kırık bir hücre duvarının veya eksik bir hücrenin varlığıyla karşılaştırılabilir. Yer değiştirme büyüklüğündeki bu önemli azalmanın sebebi, sisteme sağlanan eyleyici enerjisinin önemli bir kısmının, neredeyse tamamen bükülerek deforme olan dalgalı hücre duvarında depolanmasıdır. Eyleyici koridorunda değişken kalınlıklı bir hücre duvarının varlığı ise eyleyici enerjisini ve sönümlenme mesafesini etkilememektedir. Diğer dört kusurun aksine, sapmış hücre duvarı, sapan düğüm noktasının yeni konumuma bağlı olarak sönümlenme mesafesinin artmasına da sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca eyleyici hareketinin yönünü koridor dışına saptırması nedeniyle sapmış hücre duvarı kusuru, eyleyici enerjisinde kusursuz yapıya göre artışa yol açabilmektedir. Eyleyiciden uzaklaştıkça bütün beş kusurun etkileri de azalmaktadır. Bu çalışmanın ortaya

koyduğu önemli bir sonuç da eyleyici koridorunda kırık bir hücre duvarı, eksik bir hücre veya dalgalı bir hücre duvarının bulunmasının latisin etkin elastik modülünü korurken sönümlenme mesafesini artırabileceğidir. Bu etkinin ortaya çıkabilmesi için kusur, kusursuz latisteki sönümlenme mesafesinin ötesine, ancak eyleyici koridorunun lokal direngenliğinin kusurun varlığından etkileneceğı kadar yakın bir mesafeye yerleştirilmelidir.



3. LATİS MALZEMELERİN KAPASİTİF MİKROİŞLENMİŞ ULTRASONİK ÇEVİRGEÇLERDE KULLANIMI

Latis malzemelerin farklı titreşim uygulamalarında kullanıldığı/denendiği çalışmalar olsa da, literatürde bu malzemelerin Kapasitif Mikroışlenmiş Ultrasonik Çevirgeçler (KMUÇ, *İng.* Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers, CMUT) alanında kullanımına rastlanılmamıştır. Eğilme yükleri altında kolaylıkla kubbe şeklini alabildikleri için negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin, bir KMUÇ üzerindeki en temel mekanik eleman olan **titreşim plakasında** kullanılabileceği hipotezi ortaya atılmış, bu kapsamda teorik ve numerik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

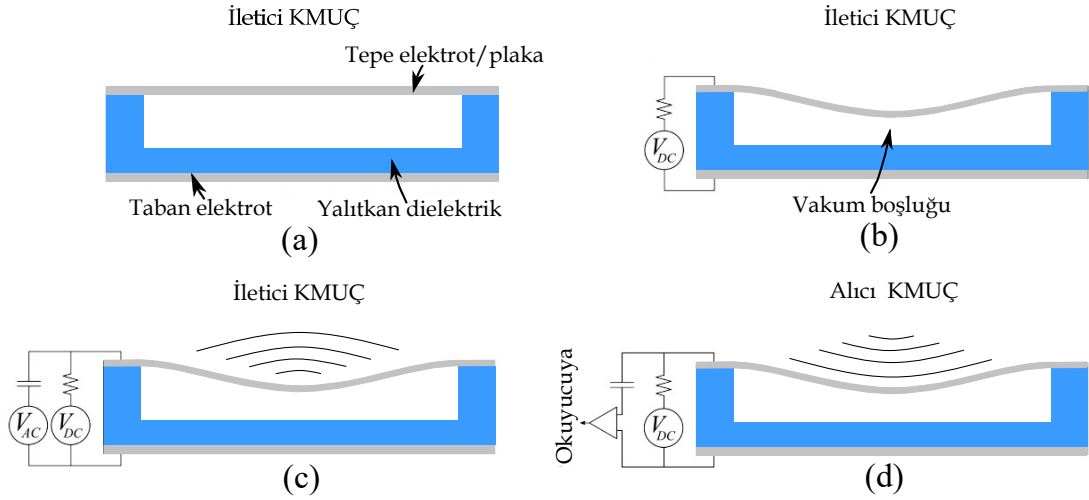
3.1 Latis Malzemelerin Titreşim Özellikleri

Hücrel mikromimarileri sayesinde latis malzemeler, titreşim sönümleme dahil bir çok alanda, diğer katı malzemelere nazaran üstün özellikler sergilemektedir. Dalga fiziği hesaba katılarak tasarlanan latis malzemelerin belirli frekans aralıklarında yüksek titreşim sönümleme kapasitesine sahip oldukları farklı çalışmalarda gösterilmiştir [87, 88]. Titreşim haricinde; ani yükleme, darbe ve mekanik/piroteknik şok yüklerine karşı sönümleme gereksinimi olan durumlarda da latis dolgulu sandviç plakalar diğer malzemelerden üretilen plakalara göre daha üstün davranışlar sergilemektedir [89]. Zira latis malzemelerin hücre boyutu, duvar/çubuk kalınlığı gibi geometrik parametreleri değiştirilerek belirli çalışma koşulları için en uygun sönümleme seviyesini elde etmek mümkündür [90, 91]. Latis malzemelerde geometrik parametre optimizasyonu, sönümleme oranında olduğu kadar yapıların doğal frekanslarını belirlemede de etkindir. Latis dolgulu bir sandviç plakanın doğal frekans değerleri, aynı malzemedan üretilmiş ve aynı ağırlığa sahip homojen katı bir plakaya göre daha yüksek olabilmektedir [92]. Ancak, ağırlık değil de plaka kalınlığı eşit alınırsa homojen katı plaka için daha yüksek doğal frekans değerleri elde edilmektedir. Bununla beraber, latis dolgulu bir sandviç plakada hücre içi boşlukların viskoelastik bir malzeme ile doldurulması durumunda plakada oluşacak doğal frekans kaynaklı titreşimler sönümlenmekte ve dinamik yalıtım bakımından daha başarılı ve daha hafif bir plaka elde edilebilmektedir [93].

3.2 Kapasitif Mikroışlenmiş Ultrasonik Çevirgeçler

Kapasitif Mikroışlenmiş Ultrasonik Çevirgeçler (KMUÇ), ultrasonik dalgaların oluşturulmasında ve bu dalgaların tespit edilmesinde kullanılan cihazlardır. KMUÇ cihazlarının tıbbi görüntülemeye viskozite ölçümüne kadar çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır [94, 95]. Bu cihazlar genellikle çok sayıda, dizi halinde yerleştirilmiş KMUÇ hücrelerinden oluşur. Bir KMUÇ hücresi milimetre-mikrometre mertebelerinde ölçülere sahiptir [96] ve tipik olarak esnek bir tepe plakası, sabit bir taban plakası ve bu ikisi arasındaki boşluktan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Esnek tepe plakası kenarlarından sabitlenmekte, tepe ve taban plakalarının üzerinde elektrotlar bulunmaktadır [97]. KMUÇ cihazı, elektrotlara uygulanan gerilimin etkisiyle tepe ve taban plakalar arasında ortaya çıkan elektrik alan ile aktive edilir. Elektrik alandan kaynaklı kapasitif kuvvetler esnek tepe plakasını taban plakasına doğru bir miktar çeker. Elektrotlar arası uygulanan sabit DC (*İng.* Direct Current, zamana göre sabit sinyalleri ifade etmektedir) gerilimin üzerine değişken AC (*İng.* Alternating Current, zamana göre değişken sinüs formunda büyüklüğü ve frekansı olan sinyalleri ifade etmektedir) gerilim verilmesi ile KMUÇ plakası titreterek içinde bulunduğu akustik ortama dalgalar gönderir. AC gerilim uygulanmadığı zaman ise aynı KMUÇ plakası akustik ortamdan kendi üzerine gelen dalgaları tespit ederek sensör görevi yapar. KMUÇ cihazının çalışma prensibi, Şekil 3.1’de şematik olarak anlatılmıştır [bkz. 98].

KMUÇ cihazı bulunduğu ortamdaki akustik enerjiyi tepe plakası aracılığıyla mekanik enerjiye, mekanik enerjiyi de elektrotlar aracılığıyla elektrik enerjisine çevirir. Bu cihaz kullanılarak yukarıda bahsedilen enerji dönüşümünün tersini gerçekleştirmek de mümkündür; elektrotlar aracılığıyla verilen elektrik enerjisi sayesinde elektrotlar arası kapasitif kuvvet elde edilmekte, bu kuvvetle titretilen KMUÇ plakası da içinde bulunduğu ortama akustik dalgalar yaymaktadır. Yani, bir KMUÇ cihazı, üzerine uygulanan AC gerilimi sayesinde bulunduğu akustik ortama dalgalar gönderip, akustik ortamdan kendisine iletilen dalgaları da elektrik sinyalleri formunda okuyabilen dinamik bir enerji çevirgeçidir. KMUÇ cihazı tasarımlarında; altıgen, dörtgen, dairesel gibi farklı geometrilere sahip plakalar kullanılması mümkündür. Bu plakaların mekaniği ve plakaların enerji iletiminde bulunduğu akustik ortam, bütünüyle sonlu elemanlar yöntemi ile modellenebilir [99]. Bir KMUÇ plakasının titreşim özelliklerini belirleyebilmek için modal analiz yapılması sıklıkla başvuru bir yöntemdir. Modal analizde, plakanın direngenlik ve kütle özellikleri kullanılarak, sistem dinamiğini temsil eden özdeğer ve özvektörler, yani plakanın doğal frekansları ve mod şekilleri bulunur [100]. KMUÇ plakasının dinamik davranışında baskın hareketin plakanın ilk normal modu olduğu düşünülürse, sistemin ilk doğal frekansı ve ilk mod şekli kullanılarak mekanik sistemin indirgenmiş modeli elde edilebilir [101].



Şekil 3.1: KMuÇ çalışma prensibinin şematik olarak gösterimi: (a) KMuÇ kesit görüntüsü (tepe plaka/elektrot, taban plakası ve yalıtkan dielektrik; cihaz pasif durumda). (b) Elektrotlara DC gerilim verilmesiyle oluşan kapasitif yükler sonucu, esnek tepe plakası taban plakasına doğru bir miktar çekilir; cihaz aktif durumda. (c) Elektrotlara verilen DC gerilimin üstüne AC gerilim eklenerek tepe plakası titreştirilerek ortama akustik dalgalar gönderilir. (d) AC gerilimin verilmediği durumda, DC gerilim verilerek aktive edilen KMuÇ cihazının elektrotları arasındaki gerilim ölçülerek, cihazın içinde bulunduğu akustik ortamdaki dalgalar tespit edilir.

Dinamik sistemler olmalarından dolayı KMuÇ cihazları için **frekans bant genişliği, iletim oranı** ve **doğrusallık** gibi özellikler tanımlanabilmektedir. Dinamik bir sistem için, girdi ve çıktı arasındaki frekansa bağlı kazanç ve faz ilişkisini tanımlayan bağıntıya **transfer fonksiyonu** denir. Sistemin bant genişliği ise, transfer fonksiyonunda girdi ve çıktı arasındaki kazancın tepe değerinin -3 dB altında kaldığı frekans bandı olarak tanımlanır. Bir enerji çevirgeci için iletim oranı, bu sistemin dönüşüm yaptığı iki farklı fiziksel büyüklük arasındaki dönüşüm katsayısı olarak tanımlanabilir. Örneğin, bir KMuÇ cihazı için iletim oranı, cihazın bulunduğu ortama yaydığı akustik basıncın, cihaza uygulanan elektriksel gerilime oranı olarak tanımlanabilir. Doğrusallık, bir çevirgecin girdi parametresindeki değişimle, bu girdiye karşılık gelen çıktı parametresindeki değişimin oranını tanımlar. İdeal çevirgeçlerde çıktı girdiye göre sabit bir oranda (yani doğrusal olarak) değişir. Girdi-çıkı ilişkisindeki oranın değişken olması **doğrusalsızlık** olarak tanımlanır.

KMuÇ cihazlarına DC gerilim uygulandığında, KMuÇ tepe plakası taban plakasına doğru çekilmeye başlar ve artan gerilimle birlikte plakanın çekilme miktarı da artar.

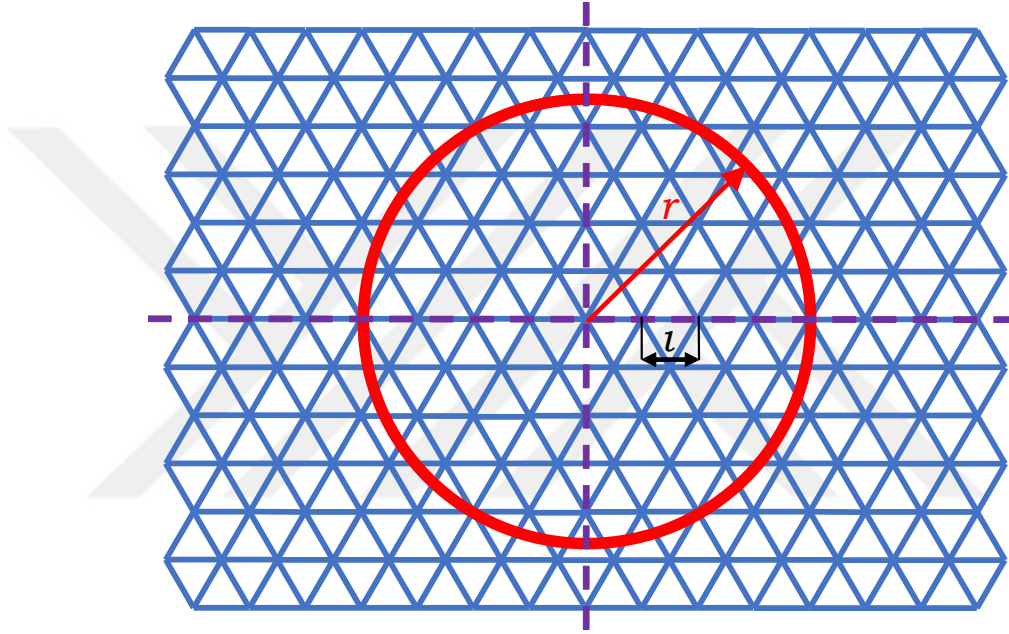
Belirli bir gerilim değeri aşıldığında tepe plakası bir anda taban plakasına yapışır; plakanın çöktüğü bu gerilim değeri **çökme gerilimi** olarak tanımlanır. KМУÇ cihazları, **çökmüş modda** doğrusal rejimin dışındadır. Bir KМУÇ cihazını çökmüş modda çalıştırarak çökmemiş moda göre daha yüksek iletim oranları elde etmek mümkündür [102–104].

KМУÇ sistemlerinde farklı operasyonel isterler için farklı plaka tasarımları çalışılmıştır. Yapılan alternatif tasarımlardan birinde, dolaylı yoldan esnek plaka üzerine bağlanmış, genişletilmiş elektrot yaklaşımı ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, halka şekilli esnek plakanın içine doğru bir katman oluşturularak bu katmana daha geniş bir rijit elektrot bağlanmıştır. Hareket boyunca şekli düz kalan bir elektrot içeren bu tasarımla klasik KМУÇ tasarımlarına göre daha yüksek elektromekanik iletim oranları elde edilebildiği gösterilmiştir [105]. Benzer mantıkla hareketla Şenlik v.d. tarafından yapılan çalışmada ise, orta bölümü kenarlarından daha kalın bir plakaya sahip olan bir KМУÇ sisteminin, iletim oranı ve frekans bant genişliği gibi performans parametrelerini incelenmiştir [106]. Orta bölümünün kenarlarından daha kalın olması sayesinde plakanın hem ikinci doğal frekansı hem de antirezons frekansı yükselmiş ve sonuç olarak KМУÇ'un çalışma bant genişliği artmıştır.

3.3 KМУÇ Sistemlerinde Kullanılmaya Aday Latisler için Ön Çalışmalar

Bu bölümde yapılan çalışmaların amacı, latis malzemelerin KМУÇ plakası olarak kullanılıp kullanılmayacağını belirlemektir. Nihai KМУÇ tasarımında düzlemsel bir latis yapı, ince düz bir plakaya güçlendirme elemanı olarak eklenecektir. Ancak, nihai tasarıma geçmeden önce, KМУÇ plakası için en uygun latis yapıyı belirlemek gereklidir. Bu amaçla, farklı latis yapıların titreşim özellikleri, latis yapılar, ince düz bir plakaya bağlanmadan, sadece latis yapılar olarak modellenip incelenmiştir. Yapılan ön çalışmanın hedefi, titreşim sönümlenme alanında üstün özellikleri ile kendilerini kanıtlamış latis malzemelerin, bir diğer uygulama alanı olan KМУÇ cihazlarında, doğrusallık ve bant genişliği gibi parametrelerde ne tür avantajlar veya dezavantajlar doğuracağını belirlemektir. Bu kapsamda, daire şeklindeki düzlemsel latis yapılar, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve statik ve modal analizlere tabi tutulmuştur. Statik analizler ile latis yapıların yük altında doğrusal deformasyon limitleri belirlenecektir. Plakanın tepe doğrusal deformasyon limitinin yüksek olması KМУÇ cihazının ölçüm hassasiyetini artıracığı için önemlidir. Modal analiz sonucu elde edilecek doğal frekans değerleri ise ilgili latis yapıyı barındıracak KМУÇ cihazının bant genişliği hakkında fikir verecektir.

Şekil 3.2’de gösterildiği üzere, incelenen **dairesel latis plakasının** yarıçapı “ r ” parametresi ile ifade edilmektedir. İlk incelenen latis, literatürde yaygın olarak kullanılan üçgen latistir. Şekil 3.2’deki dairesel plakayı oluşturan üçgen latis, her bir kenarı “ l ” uzunluğunda eşkenar üçgenlerden oluşmaktadır. Tasarım için önemli bir parametre olan “ r/l ” oranı, dairenin yarıçapına kaç adet eşkenar üçgen sığabileceğini belirlemektedir. Örneğin Şekil 3.2’deki dairesel plakayı oluşturan üçgen latis için $r/l = 4$ ’tür.



Şekil 3.2: KMuÇ plakası için tanımlanan üçgen latis geometrisi. “ r ” parametresi plakanın çapını, “ l ” parametresi ise eşkenar üçgenlerin kenar uzunluğunu ifade etmektedir.

Ön çalışma kapsamında; Dolu Plaka (DP), Üçgen latis (ÜL), Büyük Üçgen latis (BÜL), Altıgen latis (AL), Kagome latis (KAG), Karma Altıgen-2 Üçgen latis (KA-2ÜL), Hiyerarşik-2 Üçgen latis (H-2ÜL) ve Hiyerarşik-3 Üçgen latis (H-3ÜL) plakalar analiz edilmiştir, bkz. Şekil 3.3. Büyük Üçgen latiste eşkenar üçgenlerin kenar uzunluğu, Üçgen latise oranla 2 kat daha fazladır. Karma Altıgen-2 Üçgen latis (KA-2ÜL), Hiyerarşik-2 Üçgen latis (H-2ÜL) ve Hiyerarşik-3 Üçgen latis (H-3ÜL) yapıların her biri negatif Poisson oranına sahiptir. Latis yapıları oluşturan hücre duvarlarının düzlem içi kalınlığını ifade etmek için “ t_{latis} ” parametresi, düzlem dışı kalınlığı ifade etmek için ise için “ h_{latis} ” parametresi kullanılmıştır. Ön çalışmada incelenen plakalar için $30 h_{\text{latis}} = r = 0.5 \text{ mm}$, latis plakaların bağıl yoğunluğu ise $\rho^* = \rho_{\text{latis}}/\rho_{\text{DP}} = 0.2$ olarak alınmıştır. Çizelge 3.1, ön çalışma kapsamında incelenen tüm

dairesel plakalar için; görelî yoğunluk-duvar kalınlığı denklemlerini, görelî yoğunluk değerlerini, düzlem içi ve düzlem dışı duvar kalınlıklarını göstermektedir.

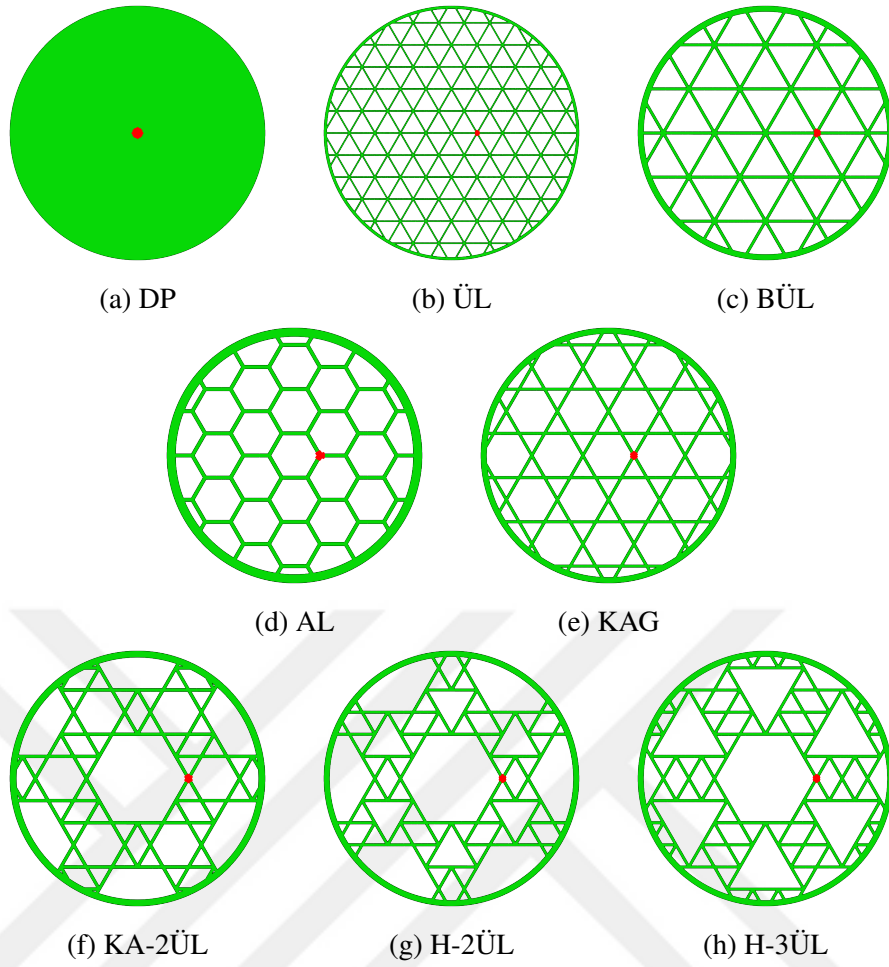
Çizelge 3.1: Ön çalışma kapsamında incelenen KMuÇ plakaları (Şekil 3.3) için; görelî yoğunluk-duvar kalınlığı ilişkisini veren denklemler, görelî yoğunluk (ρ^*) değerleri, düzlem içi ve düzlem dışı duvar kalınlıkları (sırasıyla, t_{latis} ve h_{latis}).

Plaka Tipi	Kısaltma	$t_{\text{latis}} - \rho^*$ ilişkisi	ρ^*	t_{latis} μm	h_{latis} mm
Dolu Plaka	DP	-	1	-	0.5/30
Üçgen	ÜL	$t_{\text{latis}} = (\sqrt{3}/6)\rho^*l$	0.2	5.8	0.5/30
Büyük Üçgen	BÜL	$t_{\text{latis}} = (\sqrt{3}/6)\rho^*2l$	0.2	11.6	0.5/30
Altıgen	AL	$t_{\text{latis}} = (\sqrt{3}/2)\rho^*l$	0.2	15	0.5/30
Kagome	KAG	$t_{\text{latis}} = (\sqrt{3}/3)\rho^*l$	0.2	11.6	0.5/30
Karma Altıgen-2 Üçgen	KA-2ÜL	$t_{\text{latis}} = (3\sqrt{3}/8)\rho^*l$	0.2	13	0.5/30
Hiyerarşik-2 Üçgen	H-2ÜL	$t_{\text{latis}} = (\sqrt{3}/3)\rho^*l$	0.2	11.6	0.5/30
Hiyerarşik-3 Üçgen	H-3ÜL	$t_{\text{latis}} = (\sqrt{3}/3)\rho^*l$	0.2	11.6	0.5/30

Şekil 3.3'te her bir plaka üzerindeki kırmızı nokta, farklı plakaların doğrusal rejimde yer değiştirme limitlerini karşılaştırmak için kullanılan ölçütlerden birisi olan **tepe yer değiştirme** değerinin okunduğu noktaya karşılık gelmektedir. Dolu Plaka için plakanın geometrik merkezine denk gelen tepe yer değiştirme noktası, latis plakaların her biri için merkezden farklı uzaklıktaki noktalara karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, plakaların doğrusal rejimde yer değiştirme kapasiteleri karşılaştırılırken tepe yer değiştirme değerlerinin yanı sıra **karekök ortalama** (KO, *İng.* root mean square, RMS) yer değiştirme değerleri de dikkate alınmıştır:

$$d_{i-KO} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (d_{i-j})^2}. \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de d_{i-KO} ($i \in x, y, z$), ilgili yer değiştirme bileşeninin karekök ortalamasını, n ise plaka yüzeyindeki toplam düğüm noktası sayısını ifade etmektedir.



Şekil 3.3: Ön çalışma kapsamında incelenen KMuÇ plakaları: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Her bir plakadaki kırmızı nokta, statik analiz sonucunda tepe yer değıştirmesi değeri nin okunduğı düğüm noktasını göstermektedir. Büyük Üçgen Latis için $r/l = 2.5$, diğ er bütün latisler için $r/l = 5$ 'tir; bkz. Şekil 3.2.

Ön çalışma kapsamında yapılan analizlerde plakaları modellemek için ABAQUS yazılımının, doğrusal, 8 nodlu katı elemanı (C3D8) kullanılmıştır. Global eleman boyutu, parçadaki en ince kalınlığı en az 3 sıra eleman geçecek şekilde belirlenmiştir. Malzeme özellikleri olarak, alüminyum alaşımlarını temsilen, Çizelge 3.2'de verilen özellikler kullanılmıştır. Statik analizlerde plakaların yüzeyine homojen yayılı yük uygulanarak yer değıştirmeler elde edilirken doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmıştır (ABAQUS terminolojisinde, "NLGEOM" (non-linear geometry) parametresi açık tutulmuştur). Plakalara uygulanan basınç, toplam kuvvet farklı tipte plakalar için aynı kalacak şekilde hesaplanmıştır. Statik analizlere ek olarak dinamik analizler yapılarak dairesel formdaki latis plakaların doğal frekansları ve mod şekilleri

belirlenmiştir. Tüm analizlerde sınır şartı olarak dairesel plakaların kenar bölgesi ankastre olarak ($U_x = U_y = U_z = 0$) tutulmuştur.

Çizelge 3.2: Ön çalışma kapsamında incelenen KMuÇ plakaları (bkz. Şekil 3.3) için SE analizlerde kullanılan malzeme özellikleri (tipik bir alüminyum alaşımının mekanik özellikleri esas alınmıştır).

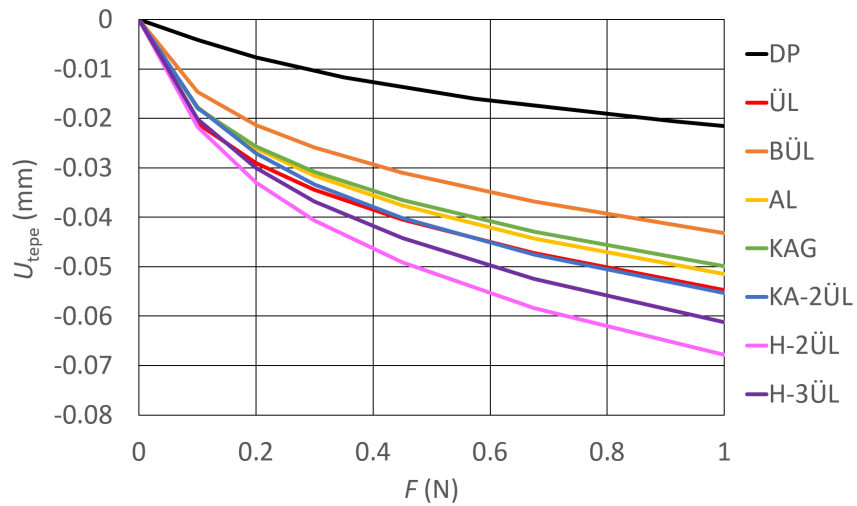
Özellik	Değer
Elastik Modülüs	68910 MPa
Yoğunluk	2.768E-9 ton/mm ³
Poisson Oranı	0.3

3.3.1 Statik sonlu elemanlar analizleri

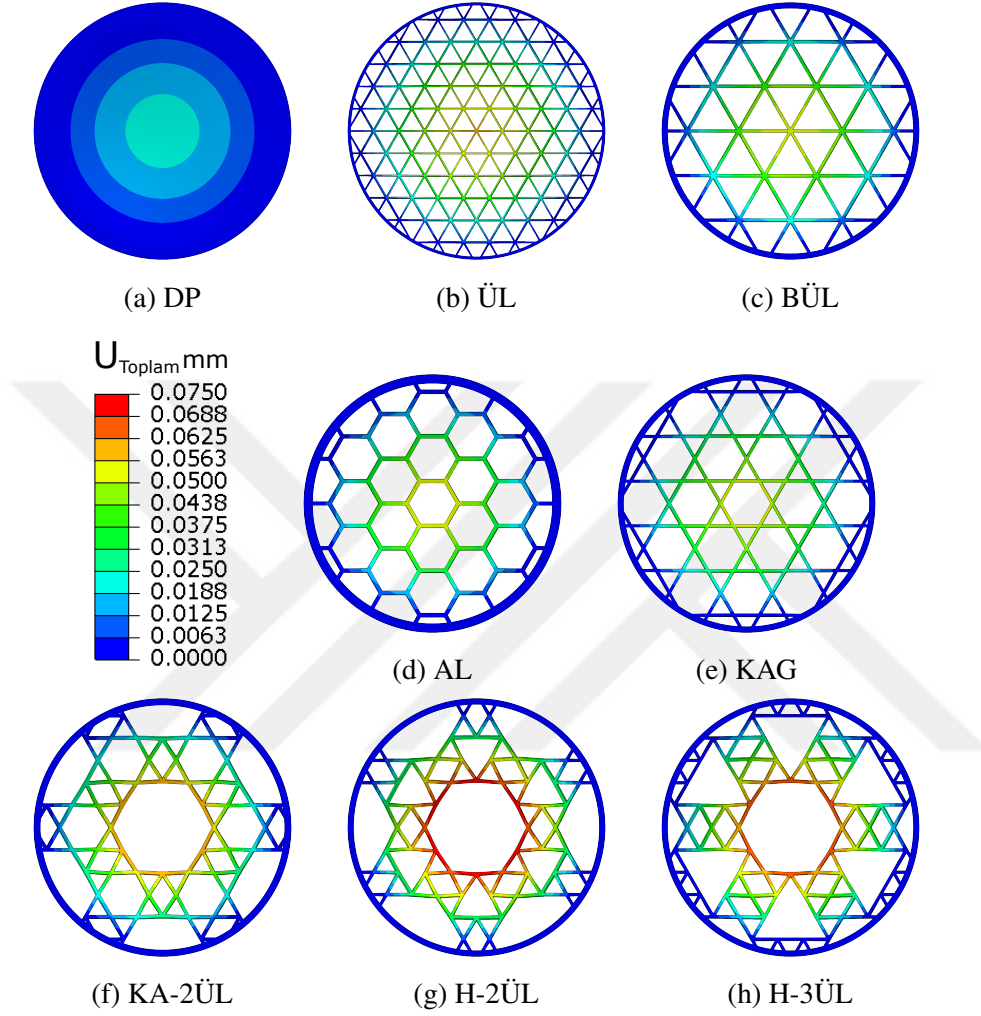
Ön çalışma kapsamında incelenen KMuÇ plakalarının ilk statik analizlerinde plaka yüzeylerine uygulanan basınç değerleri, toplam kuvvet tüm plakalar için 1 N değerinde olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.5, plakalardaki toplam yer değiştirme ($U_{\text{Toplam}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$) dağılımını deforme olmuş konfigürasyonda göstermektedir. En yüksek toplam yer değiştirme Hiyerarşik-2 Üçgen latis plakada oluşmakta, bu plakayı, sırasıyla, Hiyerarşik-3 Üçgen, Karma Altıgen-2 Üçgen ve Dolu Plaka takip etmektedir. Şekil 3.4, aynı yükleme ve sınır koşulları altında, KMuÇ plakalarında, Şekil 3.3'te gösterilen kırmızı noktalarda oluşan, uygulanan kuvvet doğrultusundaki tepe (*Ing. peak*) yer değiştirmesinin (U_{tepe}), uygulanan kuvvete göre değişimini göstermektedir. Şekil 3.5'te verilen toplam yer değiştirmeye (U_{Toplam}) benzer şekilde, U_{tepe} değeri de negatif Poisson oranına sahip latisler için daha yüksetir. En yüksek U_{tepe} değeri Hiyerarşik-2 Üçgen latis plakada görülmekte, bu plakayı, sırasıyla, Hiyerarşik-3 Üçgen, Karma Altıgen-2 Üçgen ve Dolu Plaka takip etmektedir. Sonuçlarda dikkat çeken bir diğer husus, tüm plakaların doğrusal davranışlarını kuvvet 1 N değerinden çok daha düşük seviyelerdeyken kaybetmeleridir.

KMuÇ sistemlerinin doğrusal deformasyon rejiminde çalışmaları hedeflendiği için, önce Dolu Plaka'nın doğrusal davrandığı kuvvet büyüklüğü (0.2 N) belirlenmiş, ardından latis plakalar için yapılan statik yükleme analizleri tekrar edilmiştir. Şekil 3.6, latis plakaların Dolu Plaka sonuçlarına göre normalize edilmiş tepe ve karekök ortalama (KO) yer değiştirmelerinin yüzeye uygulanan yüke göre değişimlerini göstermektedir. Latis plakalar, tepe ve karekök ortalama (KO) yer değiştirme değerlerinin sabit kaldığı kuvvet değerine kadar doğrusal olarak deforme olmakta, kuvvet değeri arttıkça toplam deformasyonda doğrusal olmayan kısmın payı

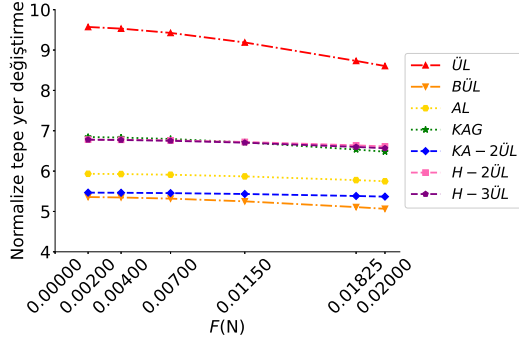
da artmaktadır. Yarıçap-hücre duvarı uzunluğu oranı $r/l = 5$ için Üçgen latis hariç tüm latisler neredeyse $F = 0.2$ N değerine kadar doğrusal bir davranım göstermektedir. r/l oranı artıkça normalize tepe ve KO yer değiştirme değerleri artsa da doğrusal olmayan deformasyon rejimi daha düşük kuvvet değerlerinde başlamaktadır. Farklı latis plakaların doğrusal deformasyon rejimleri kıyaslandığında, özellikle negatif Poisson oranına sahip Karma Altıgen-2 Üçgen, Hiyerarşik-2 Üçgen ve Hiyerarşik-3 üçgen yapıların daha büyük kuvvet değerlerine kadar doğrusal kaldıkları söylenebilir. Ayrıca, latis plakalardaki tepe ve KO yer değiştirme değerleri, Dolu Plaka'ya kıyasla 6 ila 10 kat arası daha yüksektir. Özet olarak, latis plakalar Dolu Plaka'ya oranla daha kolay deforme olsalar da, doğrusal deformasyon rejimleri daha kısadır. Bu sorunu çözebilmek için, latis plakaların elektrot bağlanan yüzeyleri, latisin üretildiği malzemeye aynı malzemeden yapılmış, ince, homojen, katı bir plakayla kaplandığı haldeki analizleri yapılacaktır.



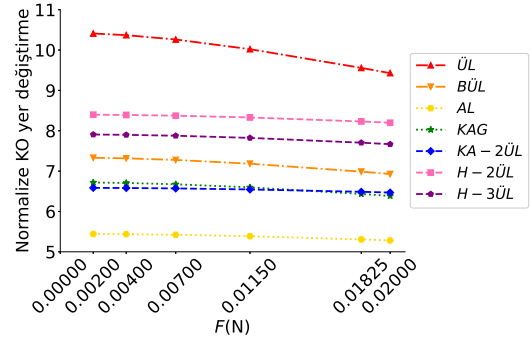
Şekil 3.4: 1 N'luk kuvvet uygulanan KMuÇ plakalarında, Şekil 3.3'te gösterilen kırmızı noktalardan elde edilen, uygulanan kuvvet doğrultusundaki tepe yer değiştirmesinin (U_{tepe} mm) uygulanan toplam kuvvete (F) göre değişimi.



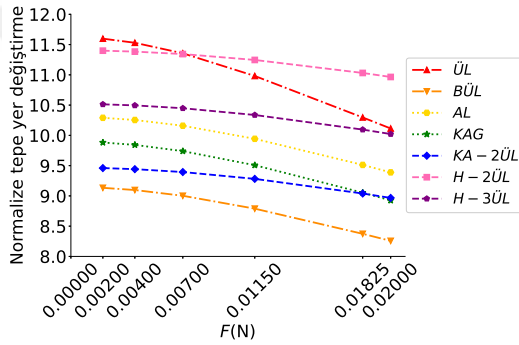
Şekil 3.5: Ön çalışma kapsamında incelenen KMuÇ plakaları için (bkz. Fig. 3.3), yüzeyden yayılı yük olarak uygulanan toplam 1 N'luk statik dik kuvvet altında, toplam yer değiştirme ($U_{\text{Toplam}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$) dağılımının, deforme olmuş konfigürasyonda gösterimi: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Büyük Üçgen Latis için $r/l = 2.5$, diğer bütün latisler için $r/l = 5$ 'tir; bkz. Şekil 3.2.



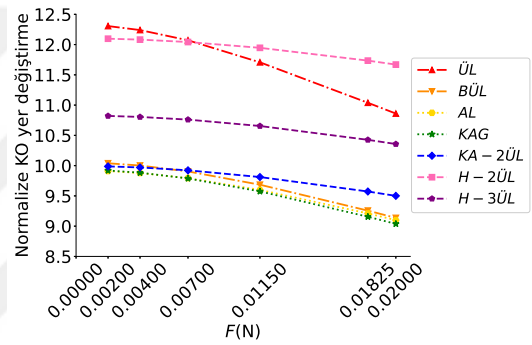
(a)



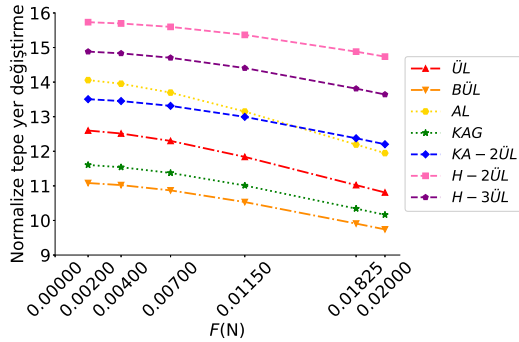
(b)



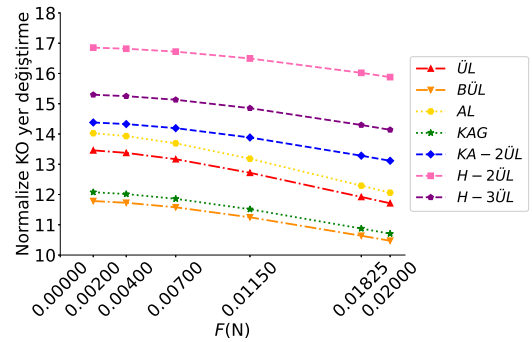
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.6: Latis plakaların Dolu Plaka sonuçlarına göre normalize edilmiş tepe yer değiştirme ve karekök ortalama yer değiştirmelerinin (bkz. Denklem(3.1)) yüzeye uygulanan yüke göre (F)değişimleri: (a, c, e) normalize tepe yer değiştirme; (b, d, f) karekök ortalama (KO) yer değiştirme. Latis plakaların yarıçap-hücre duvarı uzunluğu oranları (a, b) için $r/l = 5$, (c, d) için $r/l = 9$, (e, f) için $r/l = 15$ 'tir.

3.3.2 Dinamik sonlu elemanlar analizleri

KMUÇ plakalarının doğrusal davrandığı kuvvet rejimini belirlemek için yapılan statik analizlerin yanı sıra, bu plakaların doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek amacıyla dinamik (**modal**) analizler de yapılmıştır. Modal analizde, yapıların doğal frekansları ve mod şekillerini bulabilmek için kütle (**M**) ve direngenlik (**K**) matrisleri kullanılır. Yükleme olmayan, sönümsüz bir sistemin hareket denklemi:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0, \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir [107–109]. Denklem (3.2)'nin çözümü olan $\mathbf{x}$ vektörünün,

$$\mathbf{x}(t) = \phi e^{i\omega t}, \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanan harmonik bir vektör olduğu varsayıp, Denklem (3.2)'de $\mathbf{x}$ vektörü yerine konulursa, hareket denklemleri aşağıda verilen formu alır:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\phi e^{i\omega t} = 0. \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te eksponensiyel fonksiyon içeren terim sıfır olamaz; dolayısıyla, $(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\phi = 0$ sıfır olmalıdır. Bu eşitlik sadeleştirilirse:

$$\omega^2 \phi = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \phi, \quad (3.5)$$

eşitliği elde edilir. Böylelikle, Denklem (3.2)'de verilen hareket denklemi, Denklem (3.5)'te verilen özdeğer problemine dönüştürülmüş olur. Denklem (3.5)'te, ω^2 özdeğerleri, ϕ ise bu özdeğerlere karşılık gelen özvektörleri ifade etmektedir. Fiziksel anlamları itibarıyla, ω değerleri incelenen sistemin doğal frekanslarına, ϕ ise incelenen sistemin mod şekillerine karşılık gelmektedir [107–109].

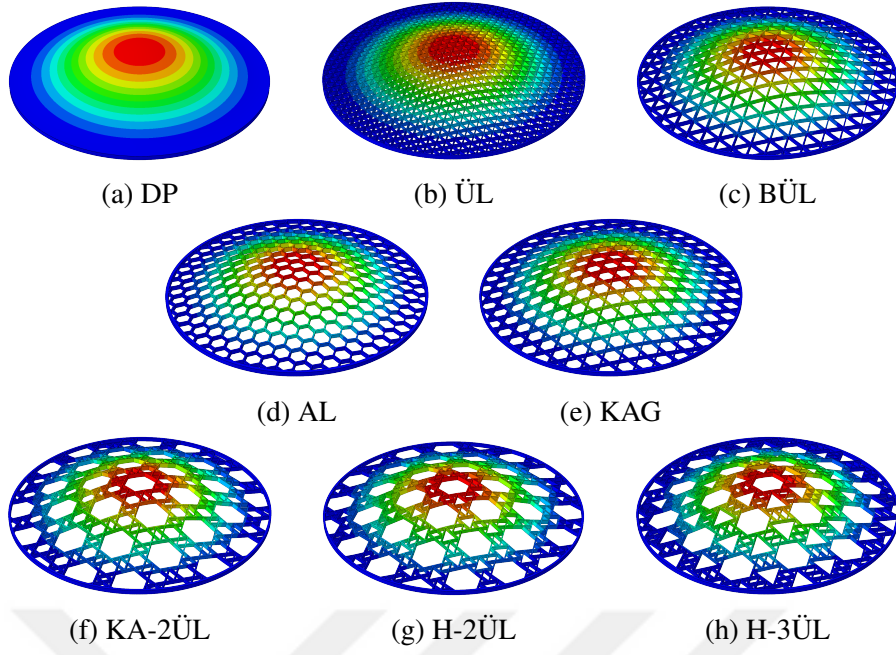
Ön çalışma kapsamında incelenen KMUC plakaları (bkz. Şekil 3.3) için elde edilen ilk dört moddaki doğal frekans değerleri (Hz birimi cinsinden) Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Modal analizlerde latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır. Latis plakaların analizine başlanmadan önce, Dolu Plaka için doğal frekans değerleri hem analitik yöntemle hem de sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Çizelge 3.3'te görüleceği üzere, analitik ve numerik sonuçlar tam bir uyum içerisindedir; yani, kullanılan sonlu

elemanlar yöntemi yakınsak sonuçlar üretmektedir.

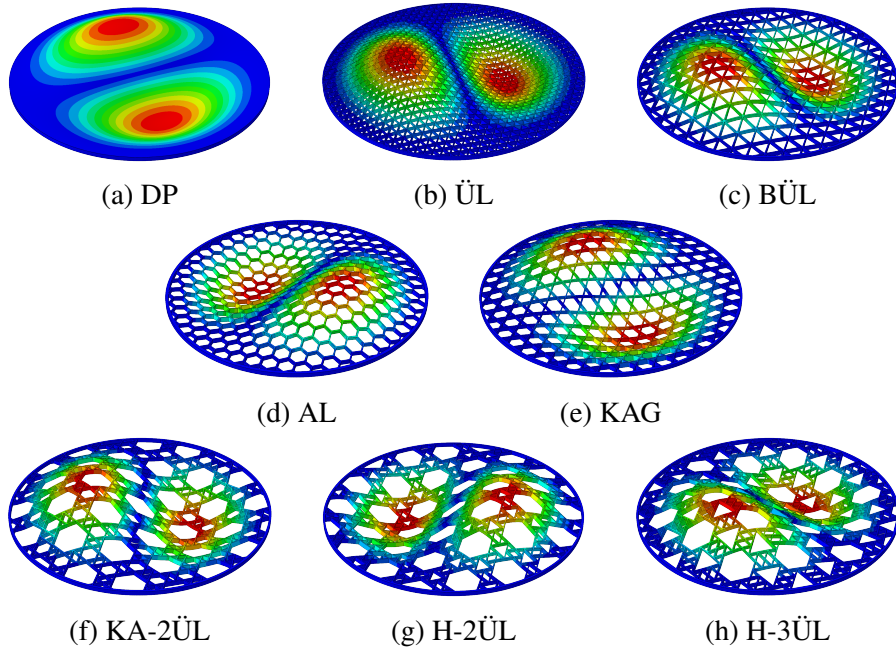
Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10, sırasıyla, incelenen KMuÇ plakalarının birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü titreşim mod şekillerini göstermektedir. Mod şekilleri incelendiğinde tüm plakaların benzer dinamik davranış sergilediği görülmektedir. Sistemin en basit hareketi, birinci mod şekli olan, kenarları sabitlenmiş plakanın orta bölümünden esnemesidir. Birinci mod en düşük doğal frekansa sahiptir ve tetiklenmesi en kolay olan moddur. İkinci mod şeklinde ise plaka ortadan ikiye ayrılmakta, plakanın bir kısmı aşağı hareket ederken bir kısmı yukarı hareket etmektedir. İkinci modda ve benzer şekilde hareket eden modlarda, orta bölümde hareket etmeyen çizgiye **düğüm çizgisi** adı verilir. İkinci mod şeklinin genellikle bir de simetrik ikizi bulunur. Dairesel bir plakada, simetrik ikiz mod için tanımlanan düğüm çizgisi, diğer simetrik moda göre 90° açıda durmaktadır. Dolu Plaka'nın kusursuz olması halinde (ki bu durum yalnızca ideal plakaların incelendiği numerik çalışmalarda söz konusu olup, pratikte mümkün değildir) bu ikiz modlar *tam olarak* aynı frekansta oluşmaktadır. Bu modlara ait düğüm çizgileri de plaka üzerinde oluşan yüklemeye göre konumlanmaktadır. Fakat gerçek plakalarda, kusurlardan dolayı bu modlara ait doğal frekanslar arası küçük farklılıklar olmakta ve düğüm noktaları simetriyi bozan etmenlere göre sabitlenmektedir [108]. Bu çalışmada incelenen latis yapılar her ne kadar 120° 'lik açılarla üç yönlü simetriye sahip olsalar da 90° açılı düzlemlerde tam simetriye sahip değildirler. Bu sebeple Dolu Plaka teorik olarak aynı frekanslı simetrik modlara sahip olsa da latis yapıların simetrik frekansları ideal koşulda dahi bir miktar farklıdır. İkinci mod için tanımlı bu fenomen, plakanın komşu bölümleri birbirlerine göre faz dışı hareket eden 4 eşit parçaya ayrıldığı üçüncü mod için de geçerlidir. Üçüncü moddaki tek fark simetrik modların düğüm çizgilerinin birbirlerine göre 90° değil 45° kaymış olmasıdır. Plakaların dördüncü modu, ikinci ve üçüncü modlardan farklı olarak, simetrik bir ikize sahip değildir. Dördüncü modda plakanın ortası yukarı hareket ederken plakanın kenar kısmında halka şekilli bir bölüm faz dışı olacak şekilde aşağı hareket etmektedir.

Çizelge 3.3: Ön çalışma kapsamında incelenen bütün KMuÇ plakaları (bkz. Şekil 3.3) için elde edilen doğal frekans değerleri (Hz cinsinden). Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır. "Mod S.", ilgili moda karşılık gelen simetrik modu ifade etmektedir.

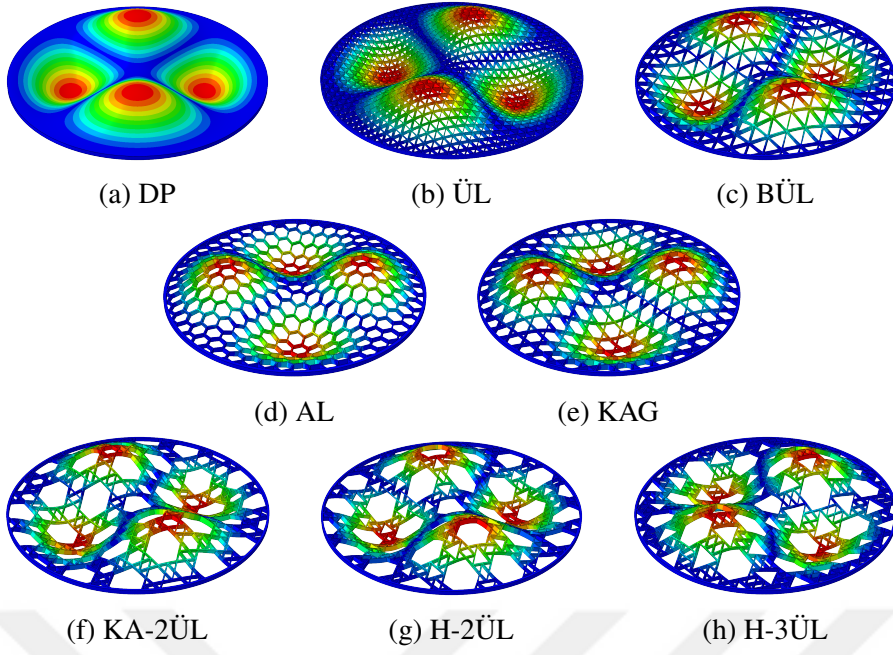
Plaka Tipi	r/l	1. Mod	2. Mod	2. Mod S.	3. Mod	3. Mod S.	4. Mod
Dolu Plaka (analitik çözüm)	-	163700	340600	340600	558800	558800	637100
Dolu Plaka (SE çözümü)	-	163674	339511	339511	553905	553905	632070
Üçgen Latis	15	102212	211781	211788	346291	346293	394247
Büyük Üçgen Latis	15	104269	215951	215974	352953	352973	401812
Altıgen Latis	15	96413	199340	199348	325308	325319	370342
Kagome Latis	15	104637	216704	216719	354189	354210	403251
Karma Altıgen-2 Üçgen Latis	15	95583	198475	198486	325007	325048	370032
Hiyerarşik-2 Üçgen Latis	15	90272	188090	188111	308450	308465	351315
Hiyerarşik-3 Üçgen Latis	15	88937	184974	184985	302458	302477	344849



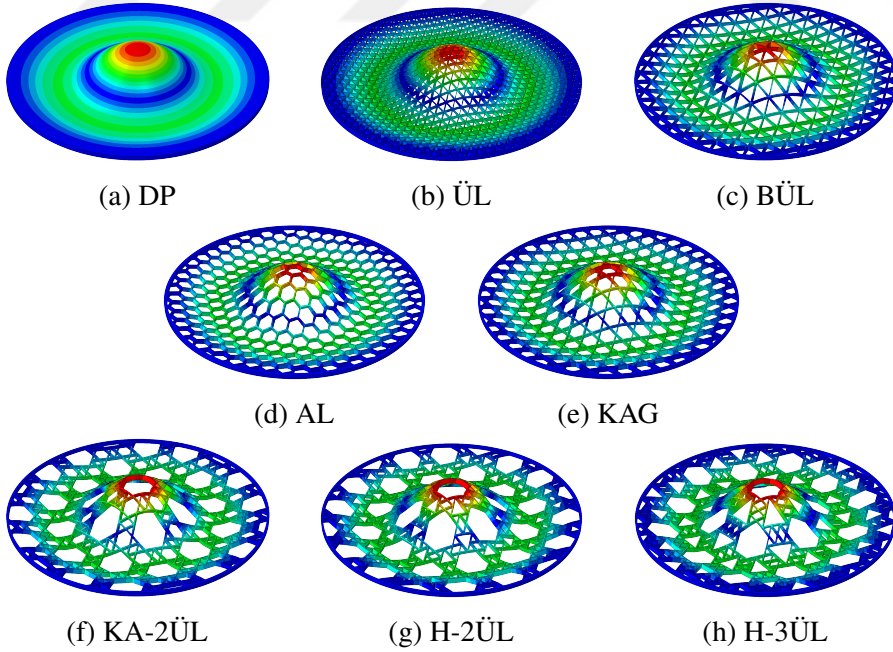
Şekil 3.7: Birinci titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır.



Şekil 3.8: İkinci titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır.



Şekil 3.9: Üçüncü titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır.



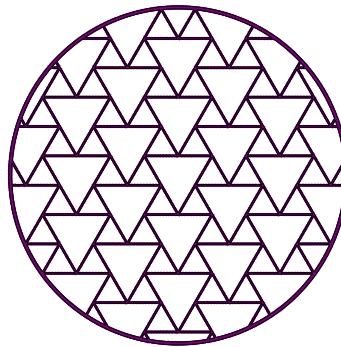
Şekil 3.10: Dördüncü titreşim mod şekilleri: (a) Dolu Plaka, (b) Üçgen Latis, (c) Büyük Üçgen Latis, (d) Altıgen Latis, (e) Kagome Latis, (f) Karma Altıgen-2 Üçgen Latis, (g) Hiyerarşik 2-Üçgen Latis ve (h) Hiyerarşik 3-Üçgen Latis. Latis plakalar için $r/l = 15$ alınmıştır.

Ön çalışma sonuçları, latis malzemelerden üretilen KMuÇ plakalarının doğal frekanslarının, aynı kalınlıktaki Dolu Plaka'nın doğal frekanslarına kıyasla %35 - %45 civarında daha düşük olduğunu göstermektedir (bkz. Çizelge 3.3). Bununla beraber, latis plakalardaki tepe yer değiştirmelerinin Dolu Plaka'dan çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Özetle, kalınlıkları istenilen doğal frekansı verecek şekilde ayarlandıklarında, en azından bazı latis plakaların KMuÇ sistemlerinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Ön çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar doğrultusunda, KMuÇ plakası olarak kullanılmalarının önemli bir avantaj sağlamayacağına karar verilen Kagome, Altıgen ve Büyük Üçgen latislere ilerleyen bölümlerde yer verilmemiş, bu latislerin yerine, Şekil 3.11'de gösterilen ve düşük bağıl yoğunluk değerlerinde Poisson oranı -1'e yaklaşan Üçgen-Üçgen latis (Ü-ÜL) incelenmeye karar verilmiştir [bkz. 56]. Ayrıca, önceki çalışmada plaka malzemesi alüminyum olarak modellenmiş olsa da ilerleyen bölümlerde, KMuÇ uygulamalarında daha yaygın kullanılan silikon olarak modellenmiştir (bkz. Çizelge 3.4). Üçgen-Üçgen (Ü-Ü) latis için literatürde verilen analitik olarak hesaplanmış mekanik özellikler düşük bağıl yoğunluk değerlerinde geçerlidir. Dolayısıyla ön çalışmada latisler için kullanılan bağıl yoğunluk değeri $\rho^* = 0.2$, ilerleyen bölümlerde $\rho^* = 0.1$ olarak değiştirilmiştir.

Çizelge 3.4: Silikon için kullanılan malzeme özellikleri.

Özellik	Değer
Elastisite Modülü	169 GPa
Yoğunluk	2.33×10^{-9} ton/mm ³
Poisson Oranı	0.29



Şekil 3.11: Üçgen-Üçgen latis plaka. Şekildeki çizimde plaka yarıçapının latis hücre duvarı uzunluğuna oranı $r/l = 5$ alınmıştır.

Bir sonraki bölümde, KMuÇ plakası olarak kullanılabilecek "ideal" ve "optimal" latisleri belirleyebilmek için yapılan analitik ve numerik hesaplamalar anlatılmıştır.

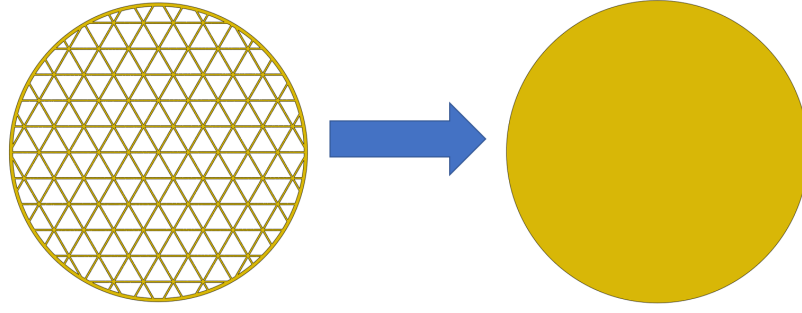
3.4 İdeal ve Optimal Latis KMuÇ Plakaları Belirlemek için Analitik Hesaplamalar

Bu çalışmada kullanılan **ideal latis KMuÇ plakası** terimi, dolu plaka ile ilk doğal frekans değerleri aynı olan, kenarları ankastre sınır koşulları ile sabitlenmiş, yüzeylerine homojen basınç uygulandığında kubbe şekline dönüşen dairesel latis plakalar arasında, belirli bir basınç altında doğrusal deformasyon rejiminde en yüksek tepe yer değiştirme değerine sahip olan latis plakayı ifade etmektedir. Tepe yer değiştirmesi, Şekil 3.3(a)'da gösterildiği üzere, plakanın merkez noktasının plaka yüzeyine dik doğrultudaki yer değiştirmesini ifade etmektedir. "İdeal" terimi, aynı zamanda, ideal latis plaka için belirlenecek malzeme özelliklerinin literatürde bilinen latislerden hiçbirisinin malzeme özelliklerine karşılık gelmek zorunda olmadığını vurgulamaktadır. **Optimal latis KMuÇ plakası** terimi ise, tepe yer değiştirme değeri ideal latis KMuÇ plakasına en yakın olan latis plakayı ifade etmektedir. KMuÇ uygulamalarına konu olan plakaların çap/kalınlık oranları 8 ila 100 arasında değiştikleri için bu plakaların yer değiştirme profilleri hesaplanırken **ince plaka teorisi** kullanılması uygundur [bkz. 110]. Ancak, latis plakaların boşluklu yapısını hesaba katmak, yer değiştirme profillerinin analitik olarak hesaplanmasını imkansız hale getirmektedir. Dolayısıyla aşağıda yapılan hesaplamalarda, ilgili latis plakayla aynı etkin mekanik özelliklere ve aynı ilk doğal frekansa sahip, boşluksuz, homojen bir plaka kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.12). Hesaplamalarda latis plakanın etkin mekanik özellikleri ve ilk doğal frekansının birim hücre sayısından bağımsız olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, latis plakanın yeterince fazla sayıda birim hücre içerdiği anlamına gelmektedir. Bu sayede homojen plakalarla yapılan hesaplamalar latis plakaların boşluklu yapısını dikkate almaksızın gerçekleştirilebilmiştir.

Yarıçapı r , kalınlığı h , kayma modülü G ve Poisson oranı ν olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel bir plakanın eğilme direngenliği D aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır [bkz. 110]:

$$D = \frac{Gh^3}{6(1 - \nu)}. \quad (3.6)$$

İzotropik malzemelerin elastik modül değerleri, $E = 2G(1 + 2\nu)$ ilişkisini sağladıkları için, Denklem (3.6), kayma modülü yerine Young modülü (E) kullanılarak da ifade edilebilir.



Şekil 3.12: Bir latis plakayla (solda) aynı etkin mekanik özelliklere ve aynı ilk doğal frekansa sahip, boşluksuz, homojen plaka (sağda).

Bir plaka yüzeyinin her noktasına P_D büyüklüğünde bir basınç uygulandığında, basın doğrultusundaki en yüksek yer değiştirme (u_{D-tepe}) plakanın merkezinde oluşur. Yer değiştirmenin basınçla doğrusal olarak değiştiği varsayılırsa, aşağıdaki basınç-yer değiştirme ilişkisi elde edilir:

$$P_D = \frac{64D}{r^4} u_{D-tepe}. \quad (3.7)$$

Plakanın yer değiştirmesinin yüzeye uygulanan basınçla doğrusal değiştiği varsayımı, tam doğru olmamakla beraber, plakadaki şekil değişikliğinin çok küçük olduğu durumlarda kabul edilebilir bir varsayımdır. Aslında, basınç uygulanmaya başlandığı andan itibaren doğrusal olmayan etkiler devreye girer, ama tepe yer değiştirme değerinin düşük olduğu durumlarda bu etkiler ihmal edilebilir düzeydedir. Doğrusal olmayan basınç-yer değiştirme ilişkisi aşağıda verilmiştir [bkz. 110]:

$$P_{DO} = \frac{64D}{r^4} u_{DO-tepe} + \frac{8}{3} \left(\frac{2G(1+\nu)h}{(1-\nu)r^4} \right) u_{DO-tepe}^3, \quad (3.8a)$$

$$P_{DO} = Au_{DO-tepe} + Bu_{DO-tepe}^3. \quad (3.8b)$$

Bu çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan denklemler kullanılarak hesaplanan parametreleri ayırt edebilmek için, doğrusal denklemler kullanılarak hesaplanan parametreler "D", doğrusal olmayan denklemler kullanılarak hesaplanan parametreler ise "DO" alt indisleriyle gösterilmiştir (örneğin, P_D ve P_{DO} gibi). Denklem (3.8) (b)'de; A plakanın eğilmesinden kaynaklı yer değiştirmenin, B ise plakanın uzamasından kaynaklı yer değiştirmenin katsayısı olarak düşünülebilir. Hem A hem de B parametreleri plakanın boyutlarına (yarıçap ve kalınlık) ve plaka malzemesinin kayma

modülü ve Poisson oranına bağlıdır:

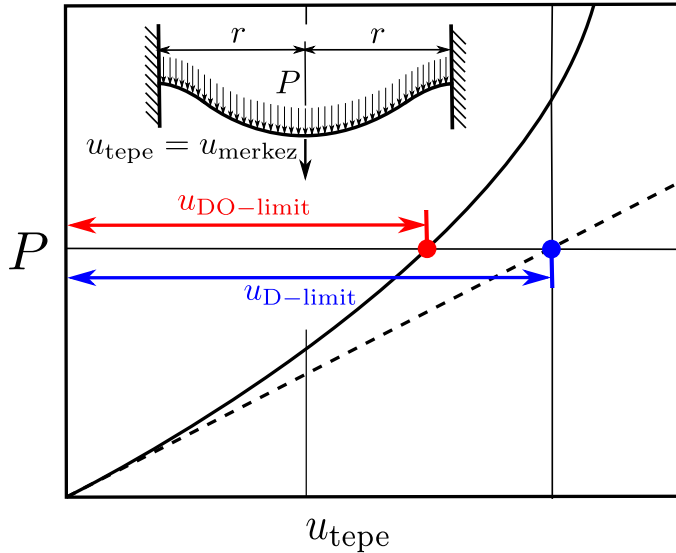
$$A = \frac{64D}{r^4}, \quad (3.9)$$

$$B = \frac{8}{3} \left(\frac{2G(1+\nu)h}{(1-\nu)r^4} \right). \quad (3.10)$$

Doğrusal Denklem (3.7) ve doğrusal olmayan Denklem (3.8) kullanılarak hesaplanan tepe yer değiştirme değerleri arasındaki farkı ölçebilmek için bir hata parametresi (e) tanımlanmış:

$$e = \frac{u_{D\text{-tepe}} - u_{DO\text{-tepe}}}{u_{DO\text{-tepe}}}, \quad (3.11)$$

ve doğrusallık limiti, mevcut literatürle uyumlu olarak, hatanın %2'ye ulaştığı ($e = e_{D\text{-limit}} = 0.02$) tepe yer değiştirme değeri olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.13, Denklem (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanan tepe yer değiştirme-basınç eğrilerini şematik olarak göstermektedir. Şekil 3.13'teki mavi ve kırmızı doğru parçaları, sırasıyla, doğrusal yer değiştirme limitinde ($e = e_{D\text{-limit}}$) Denklem (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanan tepe yer değiştirme değerlerine karşılık gelmektedir.



Şekil 3.13: Denklem (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanan tepe yer değiştirme-basınç eğrilerinin şematik gösterimi. Tepe yer değiştirme, plakanın merkez noktasında oluşmaktadır. Mavi ve kırmızı doğru parçaları, sırasıyla, doğrusal yer değiştirme limitinde ($e = e_{D\text{-limit}}$) Denklem (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanan tepe yer değiştirme değerlerine karşılık gelmektedir.

Denklem (3.11) kullanılarak, $e = e_{D-limit}$ değerine karşılık gelen doğrusal tepe yer değiştirme limiti ($u_{D-limit}$), doğrusal olmayan tepe yer değiştirme limiti ($u_{DO-limit}$) cinsinden ifade edilebilir:

$$u_{D-limit} = (1 + e_{D-limit}) u_{DO-limit}. \quad (3.12)$$

Doğrusal yer değiştirme limitinde ($e = e_{D-limit}$), doğrusal ve doğrusal olmayan yer değiştirmelere karşılık gelen basınç değerleri eşittir (bkz. Şekil 3.13):

$$P_{DO-limit} = P_{D-limit} = P, \quad (3.13a)$$

$$Au_{DO-limit} + Bu_{DO-limit}^3 = Au_{D-limit}. \quad (3.13b)$$

Denklem (3.12) kullanılarak Denklem (3.13) (b), $u_{DO-limit}$ cinsinden yazılabilir:

$$Au_{DO-limit} + Bu_{DO-limit}^3 = A(1 + e_{D-limit})u_{DO-limit}, \quad (3.14)$$

ve Denklem (3.14) sadeleştirilerek, doğrusallık varsayımının çöktüğü hata değerine ($e_{D-limit}$) karşılık gelen, doğrusal denklemlerle elde edilen yer değiştirme değeri ($u_{D-limit}$), A , B ve $e_{D-limit}$ parametreleri cinsinden yazılabilir:

$$u_{D-limit} = (1 + e_{D-limit}) \sqrt{\frac{A e_{D-limit}}{B}}. \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'te A ve B parametrelerini dairesel plakanın kayma modülü (G), Poisson oranı (ν), kalınlığı (h) ve yarıçapı (r) cinsinden yazarak (bkz. Denklem (3.6),(3.9),(3.10)), latis veya homojen katı bir plaka için $u_{D-limit}$ değerini hesaplamak mümkündür. Ancak, genel olarak, farklı yoğunluklardaki malzemelerden yapılmış ve yarıçapları aynı olan plakaların ilk doğal frekanslarının aynı olabilmesi için kalınlıklarının farklı olması gerekir. Farklı plakaları kıyaslayabilmek için Dolu Plaka referans olarak seçilmiş ve Dolu Plaka'nın boyutları $30 \text{ } h = r = 0.5 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Latis plakaların Dolu Plaka ile aynı ilk doğal frekansa sahip olmaları için gerekli kalınlık değerleri, aşağıda anlatıldığı şekilde hesaplanmıştır.

Ankastre sınır koşullarına tabi dairesel bir plakanın ilk doğal frekansı [bkz. 111, Çizelge 5.10]:

$$\omega_1 = \frac{10.2161 h}{r^2 \sqrt{6\rho}} \sqrt{\frac{G}{(1-\nu)}}, \quad (3.16)$$

denklemini kullanarak rad/s cinsinden hesaplanabilir. Bir latis plaka ile Dolu Plaka'nın (DP) ilk doğal frekanslarının aynı olması için:

$$\frac{10.2161 h_{\text{latis}}}{r^2 \sqrt{6\rho_{\text{latis}}}} \sqrt{\frac{G_{\text{latis}}}{(1-\nu_{\text{latis}})}} = \frac{10.2161 h_{\text{DP}}}{r^2 \sqrt{6\rho_{\text{DP}}}} \sqrt{\frac{G_{\text{DP}}}{(1-\nu_{\text{DP}})}}, \quad (3.17)$$

eşitliği sağlanmalıdır. Denklem (3.17) sadeleştirilerek, latis plakanın kalınlığı Dolu Plaka kalınlığı cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

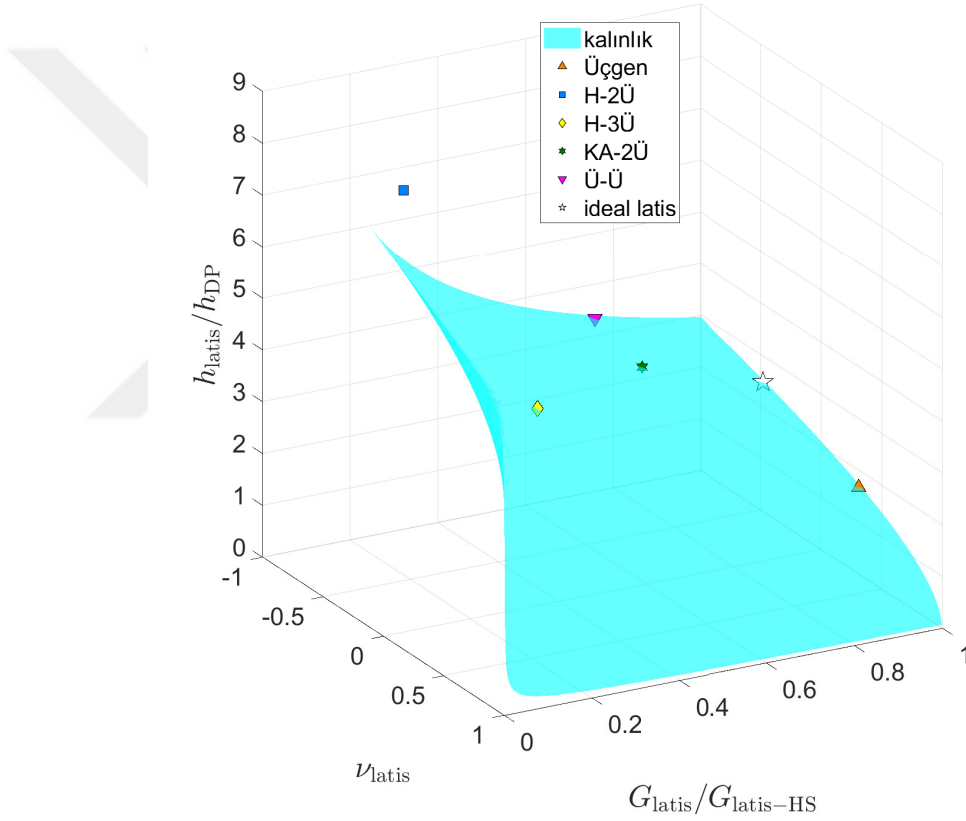
$$h_{\text{latis}} = \sqrt{\frac{G_{\text{DP}}(1-\nu_{\text{latis}})\rho^*}{G_{\text{latis}}(1-\nu_{\text{DP}})}} h_{\text{DP}}. \quad (3.18)$$

Denklem (3.18)'deki $\rho^* (= \rho_{\text{latis}}/\rho_{\text{DP}})$ parametresi latis malzemenin bağıl yoğunluğunu temsil etmektedir.

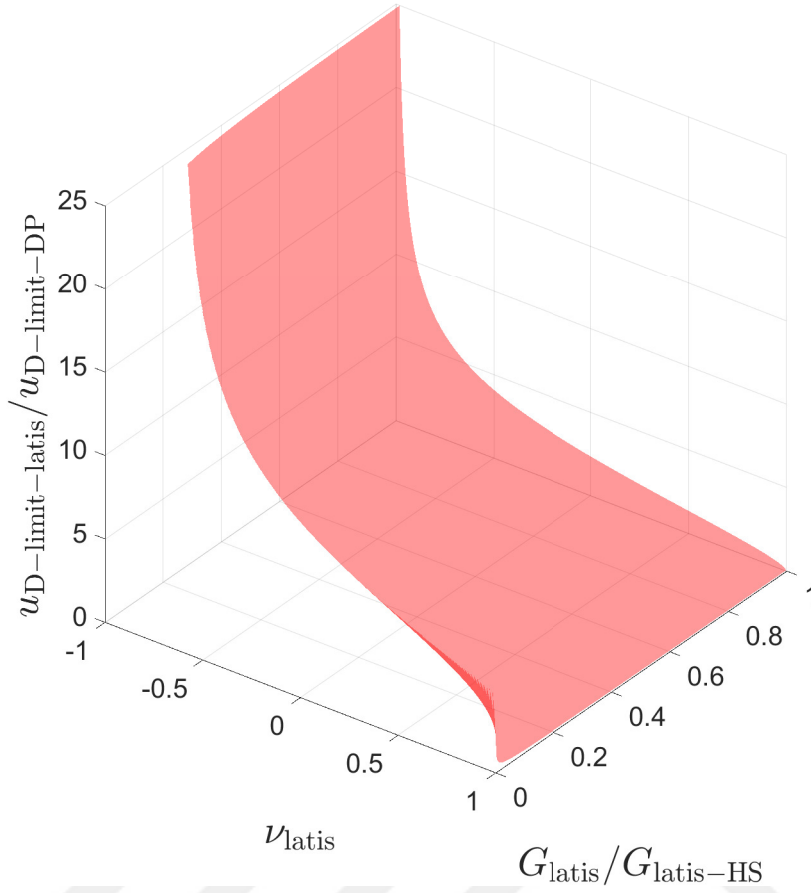
Şekil 3.14, yarıçapları ve ilk doğal frekansları Dolu Plaka ile aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel latis plakaların ($\rho^* = 0.1$), Dolu Plaka kalınlığına bölünerek elde edilmiş normalize kalınlıklarının ($h_{\text{latis}}/h_{\text{DP}}$), latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{\text{latis}}/G_{\text{latis-HS}}$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimini göstermektedir. Normalize plaka kalınlığının 6'dan büyük olduğu durumlarda latis plaka ince plaka olarak modellenemeyecektir ($h_{\text{latis}}/h_{\text{DP}} > 6 \implies h_{\text{latis}} > 2r/10$). Hiyerarşik-2 Üçgen Latisin dolu plaka ile aynı doğal frekansa sahip olması için sağlaması gereken kalınlık değeri, dolu plaka kalınlığının 6 katından büyüktür. Bu nedenle bu latisin kalınlık değeri, normalize plaka kalınlığı yüzeyi ($h_{\text{latis}}/h_{\text{DP}}$) üzerine denk gelmemekte, yüzeyden ayrı bulunmaktadır. $G_{\text{latis-HS}}$, Hashin-Shtrikman yüksek bandına göre hesaplanmış, bağıl yoğunluğu ρ^* ve üretildiği katı malzemenin elastik modülü $E_{\text{katı}}$ olan bir latisin sahip olabileceği en yüksek düzlem içi kayma modülü değeridir: $G_{\text{latis-HS}} = E_{\text{katı}}\rho^*/8$.

Şekil 3.15; Denklem (3.18)'de hesaplanan kalınlık değerleri, Denklem (3.15)'te kullanılarak bağıl yoğunluğu $\rho^* = 0.1$ olan latis plakalar için, $e = 0.02$ değerine karşılık gelen normalize doğrusal yer değiştirme limitlerinin

$(u_{D-limit-latis}/u_{D-limit-DP})$, latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{latis}/G_{latis-HS}$, $G_{latis-HS} = E_{kat\beta}\rho^*/8$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimini göstermektedir. Şekil 3.15'teki $u_{D-limit-latis}/u_{D-limit-DP}$ değerleri hesaplanırken, plakalara uygulanan basınç değerlerine bir sınır getirilmemiş, her plakanın kendi doğrusallık limitine ulaşmasına sebebiyet verecek kadar yüksek bir basınca tabi olduğu varsayılmıştır. Ancak latis plakanın Dolu Plaka'ya göre avantaj sağlayabilmesi için, aynı basınç altında daha fazla doğrusal deformasyona uğraması beklenir. Latis plakaların Dolu Plaka'yla aynı basınca tabi tutulduklarında oluşacak tepe yer değiştirme değerleri, aşağıda anlatıldığı şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 3.14: Yarıçapları ve ilk doğal frekansları Dolu Plaka ile aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel latis plakaların, Dolu Plaka kalınlığına bölünerek elde edilmiş normalize kalınlıklarının (h_{latis}/h_{DP}), latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{latis}/G_{latis-HS}$, $G_{latis-HS} = E_{kat\beta}\rho^*/8$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimi. Latis plakaların bağıl yoğunluğu $\rho^* = \rho_{latis}/\rho_{DP} = 0.1$ olarak alınmıştır. Normalize plaka kalınlığının 6'dan büyük olduğu durumlarda latis plaka ince plaka olarak modellenemeyeceği için ($h_{latis}/h_{DP} > 6 \Rightarrow h_{latis} > 2r/10$), normalize plaka kalınlığı yüzeyi $h_{latis}/h_{DP} = 6$ değeriyle sınırlandırılmıştır.



Şekil 3.15: Yarıçapları ve ilk doğal frekansları Dolu Plaka ile aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel latis plakaların, normalize doğrusal yer değiştirme limitlerinin ($u_{D-limit-latis}/u_{D-limit-DP}$), latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{latis}/G_{latis-HS}$, $G_{latis-HS} = E_{kat\beta}\rho^*/8$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimi.

Dolu Plaka'nın doğrusal deformasyon limitine ulaştığı basınç değerinde ($P_{D-limit-DP}$) latis plakanın da doğrusal deforme olduğu varsayılp Denklem (3.7) kullanılarak, $P_{D-limit-DP}$ basıncı altında latis plakanın tepe yer değiştirme değerinin Dolu Plaka'nın (limit) tepe yer değiştirme değerine oranı, aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$\frac{u_{latis-@P_{D-limit-DP}}}{u_{D-limit-DP}} = \frac{\frac{3}{32}P_{D-limit-DP} \frac{r^4}{h_{latis}^3} \frac{(1-\nu_{latis})}{G_{latis}}}{\frac{3}{32}P_{D-limit-DP} \frac{r^4}{h_{DP}^3} \frac{(1-\nu_{DP})}{G_{DP}}} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19) sadeleştirilip:

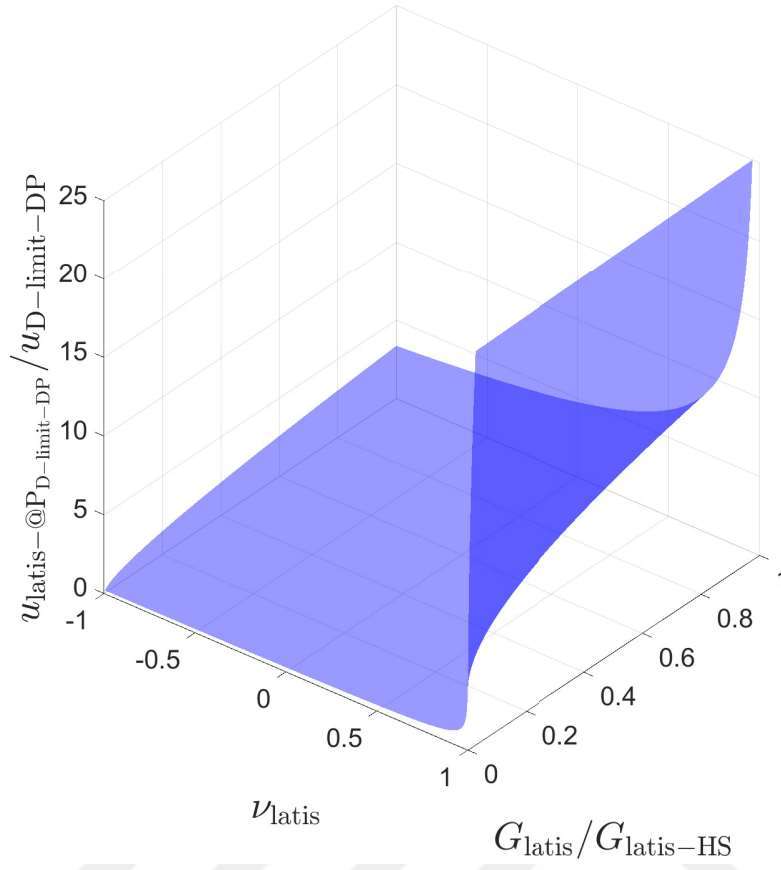
$$\frac{u_{\text{latis-@P}_{\text{D-limit-DP}}}}{u_{\text{D-limit-DP}}} = \frac{h_{\text{DP}}^3}{h_{\text{latis}}^3} \frac{G_{\text{DP}}(1 - v_{\text{latis}})}{G_{\text{latis}}(1 - v_{\text{DP}})}, \quad (3.20)$$

Denklem (3.18), Denklem (3.20)'de kullanılarak:

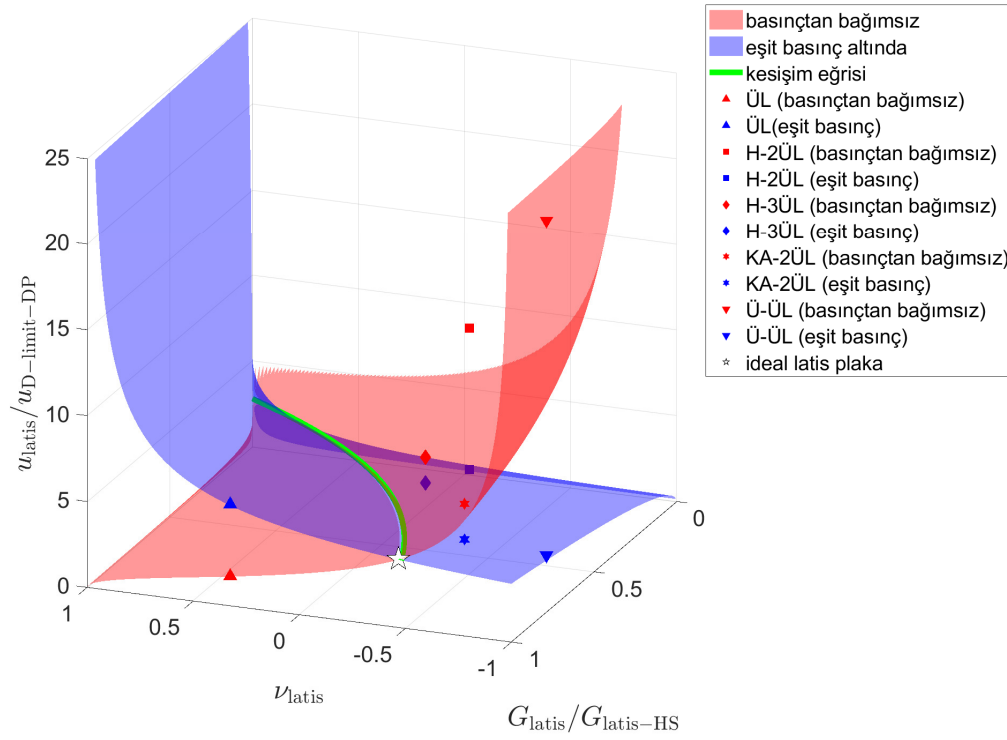
$$\frac{u_{\text{latis-@P}_{\text{D-limit-DP}}}}{u_{\text{D-limit-DP}}} = \sqrt{\frac{G_{\text{latis}}(1 - v_{\text{DP}})}{G_{\text{DP}}(1 - v_{\text{latis}})(\rho^*)^3}}, \quad (3.21)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (3.21)'de elde edilen yüzey, Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus, Denklem (3.21) türetilirken kullanılan $P_{\text{D-limit-DP}}$ basıncı altında latis plakanın doğrusal olarak deforme olacağı varsayımının, Şekil 3.16'da verilen yüzeyin Şekil 3.15'te verilen yüzeyi kestiği eğri boyunca ve bu eğrinin altında kaldığı bölgede geçerli olduğudur. Şekil 3.17; Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilen yüzeylerin kesişimini ve bu çalışma kapsamında incelenen farklı latislerin normalize yer değiştirme değerlerinin bu yüzeyler üzerindeki konumlarını göstermekte, Çizelge 3.5 ise Şekil 3.17'de gösterilen sonuçlara karşılık gelen sayısal değerleri sunmaktadır.

Şekil 3.17'de her bir latis için iki değer görülmektedir; kırmızı (basıncıdan bağımsız) yüzey üzerindeki değer $u_{\text{D-limit-latis}}/u_{\text{D-limit-DP}}$ 'ye, mavi (plakalara uygulanan basınçların eşit alındığı) yüzey üzerindeki değer ise $u_{\text{latis-@P}_{\text{D-limit-DP}}}/u_{\text{D-limit-DP}}$ 'ye karşılık gelmektedir. Başka bir deyişle, kırmızı yüzey latislerin doğrusal rejimde tepe yer değiştirme potansiyellerini, mavi yüzey ise Dolu Plaka'yla eşit basınca altında sahip olacakları tepe yer değiştirme değerlerini göstermektedir. Tepe değiştirme değerleri mavi yüzeyin kırmızı yüzeyden yukarıda olduğu bölgede bulunan latislerin doğrusal deformasyon rejimleri çok sınırlı olduğu için bu latisler Dolu Plaka'ya kıyasla kayda değer bir avantaj sağlamazlar. Bu çalışmada böylesi latislere tek örnek Üçgen latistir (ÜL). En büyük avantaj sağlayan latisler, tepe yer değiştirme değerleri iki yüzeyin kesiştiği eğriye (Şekil 3.17'de yeşil renkte gösterilmiştir) en yakın olan latislerdir. $u_{\text{D-limit-latis}}/u_{\text{D-limit-DP}} = u_{\text{latis-@P}_{\text{D-limit-DP}}}/u_{\text{D-limit-DP}}$ eşitliğini sağlayan ideal latis plaka, eşit basınç altında dolu plakaya nazaran 3.95 kat daha fazla bir tepe değiştirme değerine sahiptir ve doğrusal deformasyon potansiyelini tamamıyla gerçekleştirebilmektedir. Dolu plaka ile aynı doğal frekansa sahip olması için Hiyerarşik-2 Üçgen Latis (H-2ÜL) plaka kalınlığı, dolu plakanın 8.3 katı olmalıdır. Bu koşulda da H-2ÜL plaka, dolu plaka kalınlığının 6 katı olan ince plaka teoisi üst limitinin dışına çıkmaktadır. Şekil 3.17'de bu latise ait noktanın doğrusallık limiti yüzeyine isabet etmeme sebebi budur.



Şekil 3.16: Yarıçapları ve ilk doğal frekansları Dolu Plaka ile aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel latis plakaların, $P_{D-limit-DP}$ basıncı altında normalize yer değiştirmelerinin ($u_{latis-@P_{D-limit-DP}}/u_{D-limit-DP}$), latis malzemenin normalize kayma modülü ($G_{latis}/G_{latis-HS}$, $G_{latis-HS} = E_{katb}\rho^*/8$) ve Poisson oranına (ν_{latis}) göre değişimi. $u_{latis-@P_{D-limit-DP}}/u_{D-limit-DP}$ hesaplanırken $P_{D-limit-DP}$ basıncı altında latisin deformasyonunun doğrusal kalacağı varsayılmıştır.



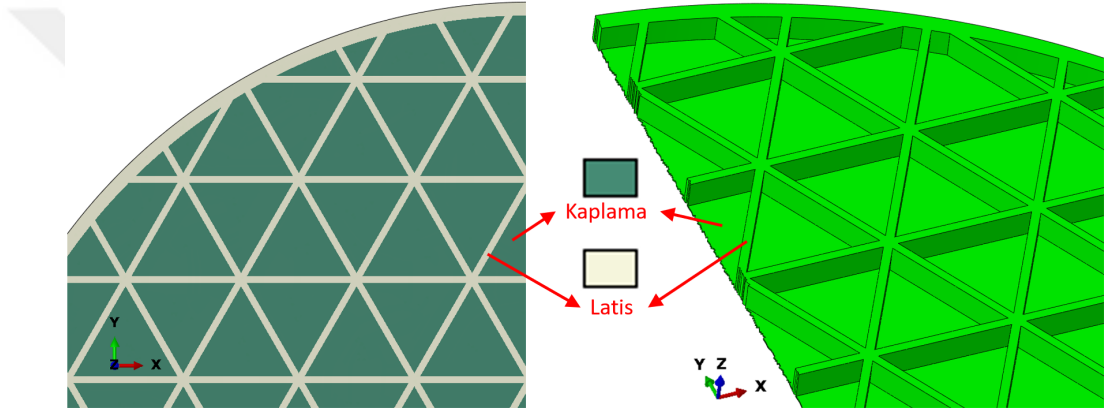
Şekil 3.17: Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da verilen yüzeylerin kesişimi ve bu çalışma kapsamında incelenen farklı latislerin normalize yer değiştirme değerlerinin bu yüzeyler üzerindeki konumları. İki yüzeyin kesiştiği eğri yeşil renkte gösterilmiştir.

Çizelge 3.5’teki kolonlar, soldan sağa doğru KMuÇ sistemi için en verimsizden en verimliye doğru sırlanmıştır: Dolu Plaka (DP), Üçgen Latis (ÜL), Hiyerarşik-2 Üçgen Latis (H-2ÜL), Hiyerarşik-3 Üçgen Latis (H-3ÜL), Üçgen-Üçgen Latis (Ü-ÜL), Karma Altıgen-2 Üçgen Latis (KA-2ÜL) ve İdeal Latis. Literatürde bilinen latisler arasında ideal latisin mekanik özelliklerine sahip bir latis yoktur. Bu çalışma sonucuna göre, seçilen plaka boyutları $30 h = r = 0.5$ mm ve latis bağıl yoğunluğu $\rho^* = 0.1$ değerleri için KMuÇ uygulamalarında en verimli olması beklenen latis, Karma Altıgen-2 Üçgen latis (KA-2ÜL).

Çizelge 3.5: Çalışma kaspamında incelenen plakaların malzeme özellikleri ve Şekil 3.17’de bu plakalar için gösterilen sonuçlara karşılık gelen sayısal değerler.

	Dolu Plaka	ÜL	H-2ÜL	H-3ÜL	Ü-ÜL	KA-2ÜL	İdeal Latis Plaka
G [GPa]	65.5	2.113	0.141	0.810	1.584	1.588	2.1
ν	0.2999	0.3333	-0.0767	-0.1163	-0.9708	-0.5859	-0.463
ρ [kg/m ³]	2333	233	233	233	233	233	233
h [mm]	0.0167	0.0284	0.1398	0.0594	0.0565	0.0506	0.0422
D [Nm]	71.2	12.1	59.7	25.4	24.1	21.6	18.0
f_1 [kHz]	278.3	278.3	278.3	278.3	278.3	278.3	278.3
$u_{(P_D-latis=P_D-DP)}$ [μ m]	2.93	17.2	2.19	8.23	8.66	9.67	11.59
$u_{D-limit}$ [μ m]	2.93	4.93	26.9	12.6	66.0	15.7	11.59

Bu aşamaya kadar elde edilen sonuçlar latis plakaların KMuÇ uygulamalarında kullanımına dair bir fikir verse de kesin bir kanaata varmak için yetersizdir. Zira, analitik hesaplamalarda kullanılan denklemler ve varsayımlar genel eğilimleri göstermek için uygun olsa bile elde edilen sayısal değerlerin kati değerler olmadığı unutulmamalıdır. Ayrıca, latis plakaların boşluklu yapısı, akustik ortama hareket vermeyi ve plakaya elektrot bağlamayı güçleştireceği için, latis plakaların KMuÇ uygulamalarında direkt kullanımları önünde engel oluşturmaktadır. Bu sorunları çözebilmek için latis plakaların elektrot bağlanan yüzeyleri, latisin üretildiği malzemeyle aynı malzemeden yapılmış, ince, homojen, katı bir plakayla kaplanmış, dinamik ve statik analizler sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18, örnek olarak **kaplamalı üçgen latis plakayı** göstermektedir.



Şekil 3.18: Kaplamalı üçgen latis plaka üzerinde "kaplama" ve "latis" bölümleri. Kaplama bölümü latisle aynı malzemeden yapılmış homojen, ince düz bir katman olup latis yapının üzerini kapatmaktadır. Böylelikle hem devamlı bir elektrot yüzeyi hem de plaka hareketini akustik ortama iletcek sürekli bir basınç aktarma yüzeyi elde edilmektedir. Latis yapı ise ince kaplama tabakasına güçlendirme unsuru olarak kullanılmaktadır.

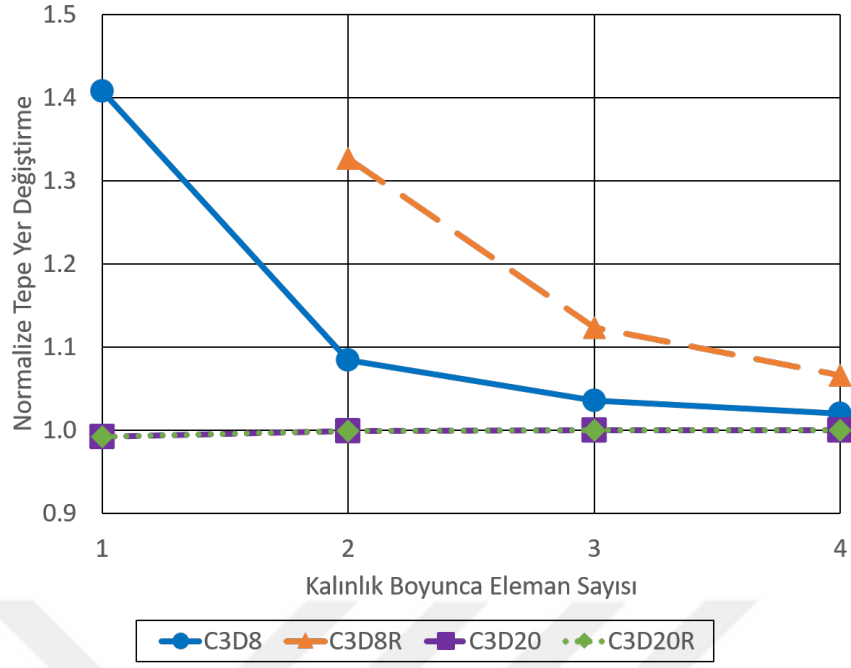
3.5 Kaplamalı Latis KMuÇ Plakalarının Sonlu Elemanlar Analizleri

3.5.1 Ağ yakınsaması çalışmaları

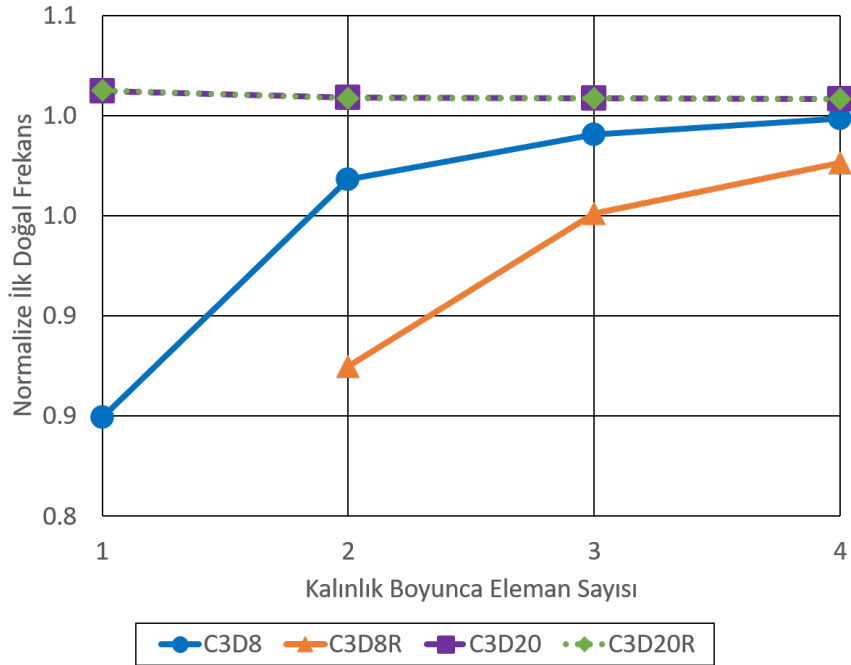
KMuÇ uygulamasında latis plakalara kaplama eklendiği durumda, analitik hesaplama yöntemi ile yüksek doğruluk (*İng.* accuracy) düzeyine sahip sonuçlar alınamamakta, sonlu elemanlar yöntemine başvurulması gerekmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanımında, kurulacak modelin çözüm ağının mümkün olan en az hesaplama yükünü yaratıp en doğru çözümü vermesi istenmektedir. Birbiri ile çelişen bu iki isterin her

ikisini de makul ölçüde karşılayabilmek adına gerçek probleme başlamadan önce çözüm ağı için eleman tipi ve eleman boyutlarına karar verileceği ağ yakınsaması çalışmaları yapılmıştır. Farklı eleman tipleri ve boyutları ile referans olarak kabul edilen bir modele göre hesaplama süresi ve hesaplama doğruluğu karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Ağ yakınsaması çalışmasında öncelikle analitik çözümleri elde olduğu için dolu plaka modeli üzerinden eleman boyutu belirlenmiştir. Buna göre dolu plakanın yük altında deformasyonu ve ilk doğal frekansı için analitik hesaplama sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan statik analiz ve modal analiz sonuçlarını normalize etmek için referans değerler olarak kullanılmıştır. Plaka benzeri bir ölçüsü diğerlerine göre bir mertebe daha düşük olup düzlem dışı bükülme hareketi yapan yapılar için, katı (*Ing.solid*) eleman tercih edilmesi durumunda, plaka kalınlığı boyunca kaç sıra eleman yerleştirileceği eleman boyutu belirleme bakımından en önemli parametredir. Elemanların düzlem içi ölçüleri ise, çözüm ağına mümkün mertebe küp şeklinde elemanlar elde edilecek şekilde sonlu elemanlar analiz algoritması tarafından belirlenmektedir. Ayrıca plaka tipi yapılar için önerilen kabuk (*Ing. shell*) elemanlar da çalışmaya dahil edilmiştir.

Ağ yakınsaması çalışmalarında, Abaqus yazılım kütüphanesindeki katı elemanlardan C3D8, C3D8R, C3D20 ve C3D20R, kabuk elemanlardan S4, S4R ve S8R kullanılmıştır. C3D8, S4 ve S4R elemanlar doğrusal, C3D20 ve S8R elemanlar ise kuadratik şekil fonksiyonlarına sahip olup, eleman isimlerindeki "R" harfi azaltılmış integrasyon noktası sayısını (*Ing. reduced integration point number*) ifade etmektedir. Katı eleman tipleriyle yapılan hesaplamalarda çözüm ağları dolu plaka için eleman boyutu kalınlık boyunca 1, 2, 3 ve 4 sıra eleman yerleştirilecek şekilde oluşturulmuştur. Kabuk eleman tipleri içinse elemanların düzlem içi boyutu, kalınlık boyunca 2 sıra eleman yerleştirilen katı elemanların boyutu ile aynı alınmıştır. Buna göre eleman boyutu yakınsama çalışmasında analitik sonuçlara göre normalize edilmiş statik analiz ile elde edilen tepe deformasyon sonuçları Şekil 3.19'da, modal analiz sonucu elde edilen normalize birinci doğal frekans sonuçları Şekil 3.20'de sunulmuştur. Her iki analiz tipinde de C3D8R eleman tipi ile kalınlık boyunca bir sıra eleman yerleştirildiğinde yüksek hatalı değerler alındığı için bu analiz sonucu daha sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek adına grafiklerden çıkarılmıştır. Tüm kabuk tipi elemanlar ile elde edilen sonuçlar hem statik analizde hem de modal analizde %0.5 hata limitinin altında çıktığı için grafiklere eklenmemiştir.



Şekil 3.19: Dolu plaka için farklı tipte katı elemanlar ile kalınlık boyunca artan adetlerde eleman kullanılarak elde edilen normalize tepe ve karekök ortalama (KO) yer değiştirme sonuçları. Değerler analitik hesaplama sonucuna göre normalize edilmiştir.

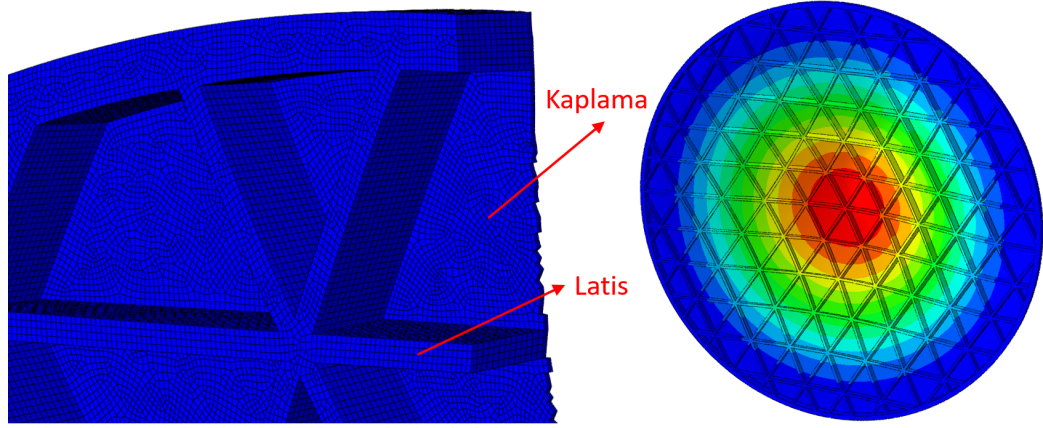


Şekil 3.20: Dolu için farklı tipte katı elemanlar ile kalınlık boyunca artan adetlerde eleman kullanılarak elde edilen normalize ilk doğal frekans sonuçları. Değerler analitik hesaplama sonucuna göre normalize edilmiştir.

C3D8 ve C3D8R doğrusal katı elemanlarda kalınlık boyunca artan eleman sayısı ile analitik çözüme yakınsama gözlemlenmektedir. C3D20 ve C3D20R kuadratik katı elemanlarda da benzer bir davranış görülmekte birlikte bu eleman tiplerinden kalınlık boyunca bir sıra kullanıldığında bile doğrusal elemanlardan dört sıra kullanıldığı duruma göre daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Doğrusal katı elemanlarda makul doğruluğa erişebilmek için kalınlık boyunca 4 sıra eleman kullanımı gerekmekte, dakikalar mertebesinde çözüm sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kuadratik katı elemanlarda ise kalınlık boyunca bir sıra elemanla dahi saniyeler mertebesinde çözüm süreleri içinde makul sonuçlar alınabilmektedir. Ele alınan plaka bükülme probleminde, kullanımı tavsiye edilen kabuk elemanlarla da kuadratik kabuk elemanlardan daha kısa çözüm sürelerinde daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca kabuk eleman kullanımında yapı üzerinde modellenmesi gereken detayların arttığı durumlar için eleman boyutunun küçültülmesi gerektiğinde, düşen eleman boyutuna nazaran çözüm süresindeki artış doğrusal katı elemanlar için bu artış üsteldir. Bu bağlamda kaplamalı latis gibi detaylı modellerde plaka bükülme problemi için kabuk tipi eleman kullanımı doğru bir analiz yaklaşımı olacaktır.

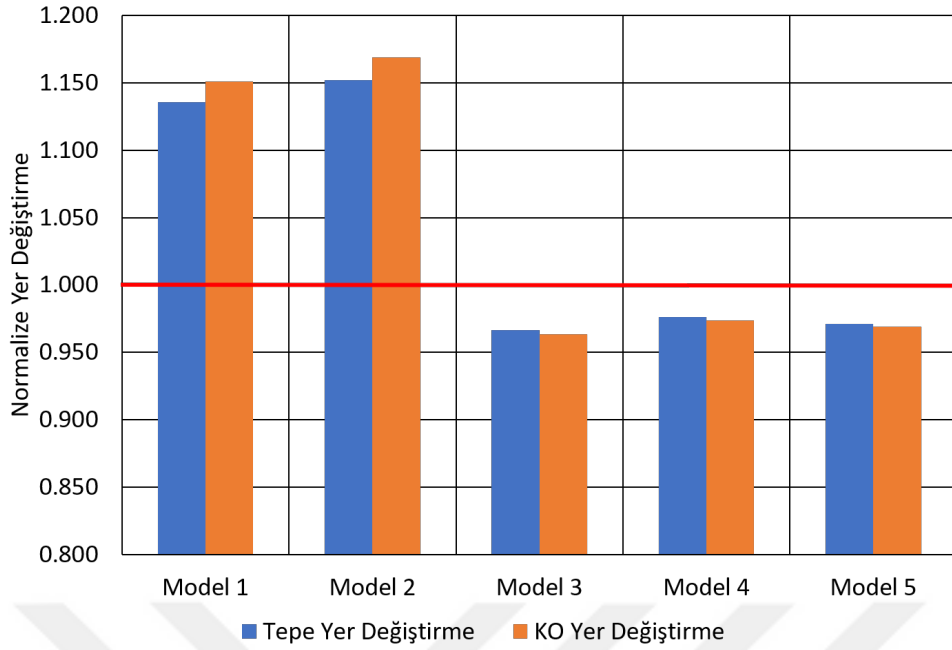
Kaplamalı latis plakaların katı elemanlarla modellenmesi hesaplama zamanını oldukça artırmakta, bazı latislerin analiz süreleri bir haftaya kadar ulaşmaktadır. Doğruluk düzeyinden en az ölçüde feragat ederek hesaplama zamanını mümkün olan en az seviyeye indirebilmek için kabuk ve katı elemanların veya yalnızca kabuk elemanların kullanıldığı alternatif ağlar oluşturulmuş, çalışmanın geri kalan kısmında en uygun olduğuna karar verilen ağ yapısı kullanılmıştır. Alternatif ağları kıyaslamak için kaplamalı üçgen latis yapılarından en uygun eleman tipi seçilmiştir.

En uygun ağ yapısını belirlemek için; plakanın hem kaplamasının hem latisinin katı elemanlarla modellendiği; kaplamanın katı, latisin kabuk elemanlarla modellendiği; hem kaplamanın hem latisin kabuk elemanlarla modellendiği ağlar, tepe ve karekök ortalama (KO) yer değiştirme değerleri ve ilk doğal frekanslar esas alınarak kıyaslanmıştır. Kullanılan model tiplerinin özeti Çizelge 3.6'da verilmiştir. Kaplamalı üçgen latis model için elde analitik çözüm olmadığından, kıyaslamaya referans olarak, üçgen latis için Abaqus sonlu elemanlar yazılımı eleman kütüphanesinin C3D20 katı elemanlarıyla oluşturulan son derece ince ağ yapısına (eleman sayısı = 2166429) sahip model kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.21). Bu model için hesaplama süresi yüksek kapasiteli sunucu iş istasyonu analiz bilgisayarları (*Ing.* analysis server workstation) için bile hafta mertebesinde. En uygun ağ belirleme çalışmalarında plakanın yarıçapı $r = 0.5$ mm, latisin hücre duvarı kenar uzunluğu $l = r/5$ mm, latisin kalınlığı $h_{\text{latis}} = r/30$ mm, kaplamanın kalınlığı ise $h_{\text{kaplama}} = r/500$ mm olarak alınmıştır ($h_{\text{latis}}/h_{\text{kaplama}} \approx 16.67$).

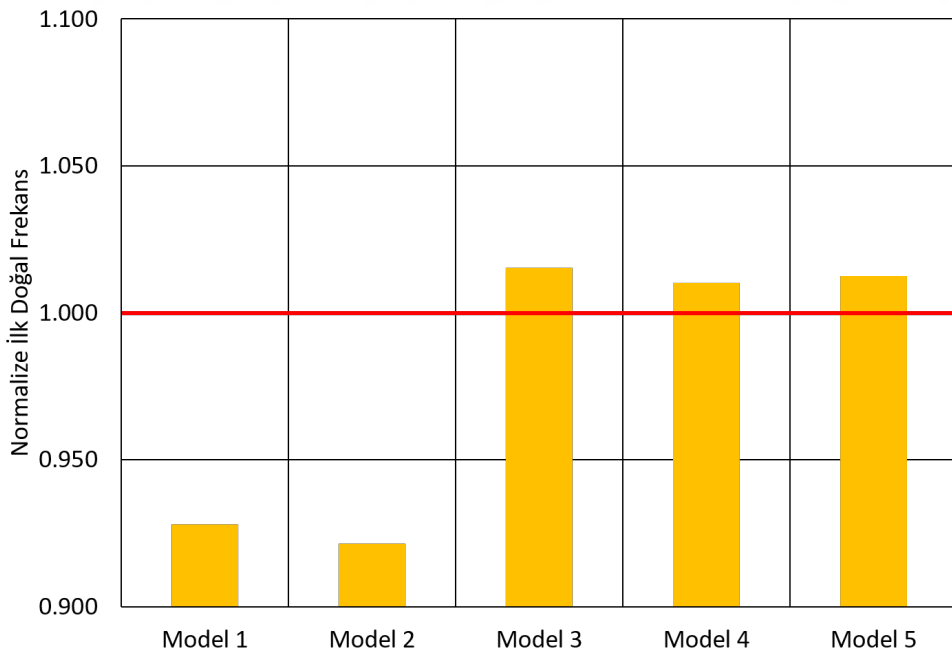


Şekil 3.21: Abaqus sonlu elemanlar yazılımı eleman kütüphanesinin C3D20 kuadratik katı elemanları kullanılarak kaplamalı üçgen latis plaka için oluşturulan sonlu elemanlar ağı (solda) ve plakanın statik yükleme altında deforme olmuş hali (sağda). Latisin yarıçap-hücre duvarı kenar uzunluğu oranı, $r/l = 5$ 'tir. Sonlu elemanlar ağında, latisin hücre duvarı kalınlığı boyunca en az dört eleman, kaplama kalınlığı boyunca en az iki eleman bulunmakta olup ağıdaki toplam eleman sayısı 2166429'dur.

Şekil 3.22, farklı tipte elemanlar kullanılarak modellenen Üçgen Latis plaka için elde edilen tepe ve karekök ortalama yer değiştirme sonuçlarının, Şekil 3.21'de gösterilen referans model için elde edilen sonuçlarla normalize edilmiş değerlerini göstermektedir. Eleman boyutu olarak tüm modellerde, latis yapının düzlem içi kalınlığı boyunca iki eleman yerleştirilecek şekilde çözüm ağları türetilmiştir. Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'teki kırmızı çizgiler referans model için elde edilen sonuçlara karşılık gelmektedir. Model 1'de latis için C3D8 katı elemanlar kaplama için S4R kabuk elemanlar, Model 2'de latis için C3D20 katı elemanlar kaplama için S8R kabuk elemanlar, Model 3'te hem latis hem katı için S4 kabuk elemanlar, Model 4'te hem latis hem katı için S4R kabuk elemanlar, Model 5'te ise hem latis hem katı için S8R kabuk elemanlar kullanılmıştır. Şekil 3.23, Model 1-5 için normalize ilk doğal frekans değerlerini göstermektedir. Hesaplama zamanı en düşük olan model Model 4, doğruluk düzeyi açısından da kabul edilebilir sonuçlar verdiği için çalışmanın geri kalan kısmında Model 4'ün kullanılmasına karar verilmiştir. S4R kabuk elemanlarla oluşturulan model, hem statik hem de dinamik analizlerde, referans modele göre %5 hata bandında sonuçları dizüstü analiz bilgisayarlarında dakikalar içerisinde vermektedir.



Şekil 3.22: Üçgen latis için farklı tipte elemanlardan oluşturulan sonlu elemanlar modelleri kullanılarak elde edilen normalize tepe ve karekök ortalama (KO) yer değiştirme sonuçları. Kırmızı çizgi Şekil 3.21’de gösterilen referans model için elde edilen sonuçlara karşılık gelmektedir.



Şekil 3.23: Üçgen latis için farklı tipte elemanlardan oluşturulan sonlu elemanlar modelleri kullanılarak elde edilen normalize ilk doğal frekans sonuçları. Kırmızı çizgi Şekil 3.21’de gösterilen referans model için elde edilen sonuçlara karşılık gelmektedir.

Çizelge 3.6: Kaplamalı latisler için eleman tipi belirlemede kullanılan modeller.

Model	Latis Eleman	Kaplama Eleman
1	C3D8 doğrusal katı	S4R doğrusal kabuk
2	C3D20 kuadratik katı	S8R kuadratik kabuk
3	S4 doğrusal kabuk	S4 doğrusal kabuk
4	S4R doğrusal kabuk	S4R doğrusal kabuk
5	S8R kuadratik kabuk	S8R kuadratik kabuk

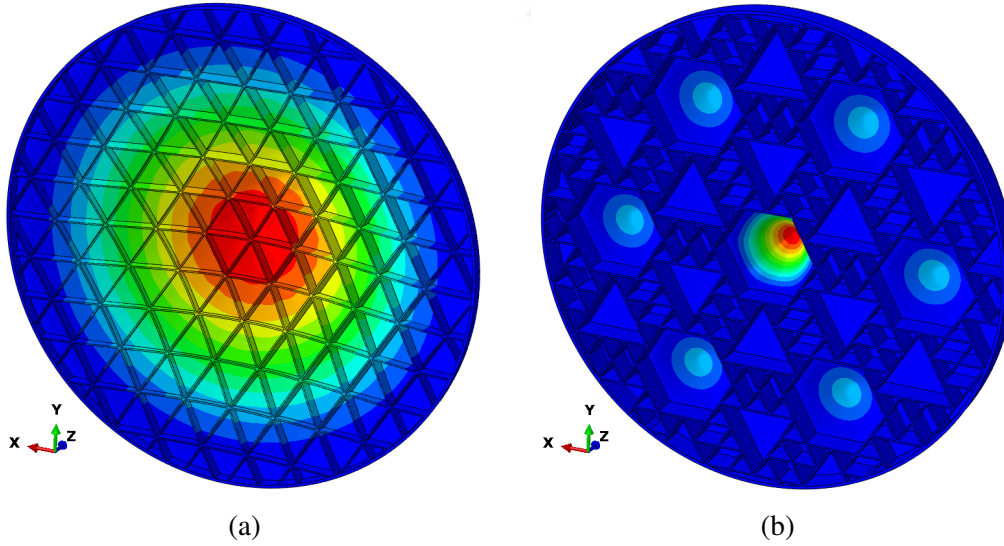
3.5.2 Dinamik ve statik analiz sonuçları

Bu kısımda gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinin amacı; aynı malzemeden (silikon) üretilmiş, yarıçapları ve ilk doğal frekansları aynı olan, ankastre sınır koşullarına tabi dairesel plakalar (latis veya Dolu Plaka) arasında, doğrusal deformasyon rejiminde tepe yer değiştirme değeri en yüksek olan plakayı belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda, Dolu Plaka referans plaka olarak seçilmiş, öncelikle dinamik analizler yapılarak, latis plakaların Dolu Plaka ile aynı ilk doğal frekansa sahip olabilmeleri için gerekli kalınlıklar iteratif bir yöntem kullanılarak hesaplanmıştır (latis plaka kalınlıklarına kaplama kalınlığı dahildir). Dinamik analizlerde ilk hesaplamada latis plakaların kalınlıkları Denklem (3.18) kullanılarak belirlenmiştir. Denklem (3.18) kaplamasız latis plakalar için türetildiğinden kaplamalı latis plakalar için doğru sonuçlar vermese de iterasyon başlangıcı için uygun değerler sağlamaktadır. Takip eden dinamik analizlerde latis plakaların toplam kalınlıkları, latis ve Dolu Plaka'ların ilk doğal frekansları arasındaki fark %3'ün altına düşünceye kadar değiştirilmiştir. Latis plakaların toplam kalınlıkları değiştirilirken kaplama kalınlığı sabit tutulmuştur. Latis plakaların kalınlıkları hesaplanırken homojen deformasyona izin veren r/l oranları da belirlenmiştir. Şekil 3.24 (a) ve (b), sırasıyla, Üçgen ve Hiyerarşik-3 Üçgen latislerin birinci mod şekillerini göstermektedir. Üçgen latis $r/l = 5$ için oldukça homojen şekilde deforme olurken, Hiyerarşik-3 Üçgen latis $r/l = 9$ için bile homojen bir deformasyon gösterememekte, plaka üzerinde lokal şişkinlikler göze çarpmaktadır. Yapılan analizler doğrultusunda Üçgen latis için $r/l = 15$, diğer latisler için ise $r/l = 30$ değerlerinin uygun olduğuna karar verilmiştir.

Plaka kalınlıklarının ve r/l oranlarının dinamik analizlerle belirlenmesinin ardından, plaka yüzeylerinin homojen yayılı yüke tabi olduğu statik analizlere geçilmiştir. Her plaka kendi doğrusal yer değiştirme limitine kadar yüklenmiş olup, plakalara uygulanan toplam kuvvetler (F) farklıdır. Statik analizler $h_{\text{kaplama}} = \{1, 5\} \mu\text{m}$

olmak üzere iki farklı kaplama kalınlığı için yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 3.7’de sunulmuştur. Bir önceki bölümde elde edilen analitik sonuçlara benzer şekilde, pozitif Poisson oranına sahip tek latis olan Üçgen latis (ÜL) için tepe yer değiştirme değerleri, her iki kaplama kalınlığında da Dolu Plaka için elde edilen değerlere yakın bulunmuştur. Kaplama kalınlığının negatif Poisson oranına sahip latislerin davranışına etkisi çok daha belirgindir. Üçgen-Üçgen latisin (Ü-ÜL) tepe yer değiştirme, $h_{\text{kaplama}} = 1 \mu\text{m}$ iken Dolu Plaka’nın $\approx \%89$ ’una eşitken $h_{\text{kaplama}} = 5 \mu\text{m}$ iken yaklaşık 2.5 katına çıkmaktadır. Bunun aksine, kaplama kalınlığının $1 \mu\text{m}$ ’den $5 \mu\text{m}$ ’ye artırılması Karma Altıgen-2 Üçgen (KA-2ÜL), Hiyerarşik-2 Üçgen (H-2ÜL) ve Hiyerarşik-3 Üçgen (H-3ÜL) latislerin tepe yer değiştirme değerlerinin azalmasına sebebiyet vermiştir. İncelenen latisler arasında **KMUÇ plakası olarak kullanılmaya en uygun latisin**, $h_{\text{kaplama}} = 1 \mu\text{m}$ için tepe yer değiştirme değeri Dolu Plaka’ninkinden yaklaşık üç kat fazla olan **Hiyerarşik-2 Üçgen latis (H-2ÜL) olduğu** tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, literatürde daha önceden hiç denenmemiş olan "latis KMUÇ plakası" konseptinin geçerli olduğunu ve bu plakalarda negatif Poisson oranına sahip latislerin kullanılması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3.24: Latis plakaların birinci titreşim mod şekilleri: (a) Üçgen Latis ($r/l = 5$), (b) Hiyerarşik-3 Üçgen Latis ($r/l = 9$).

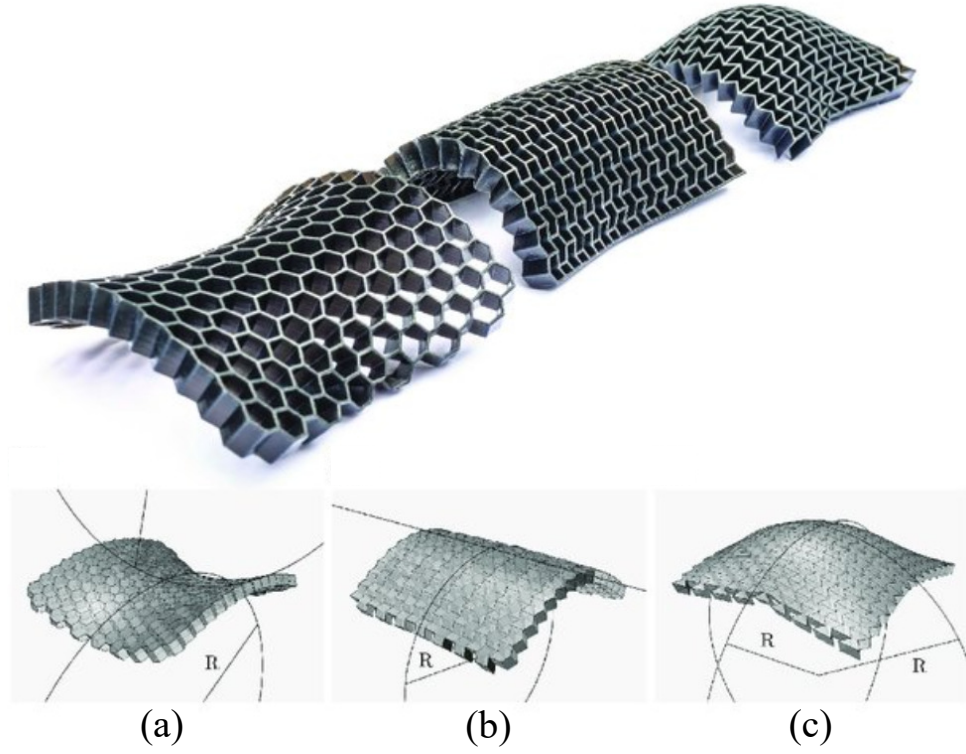
Çizelge 3.7: Kaplamalı latis KMuÇ plakalarının statik analiz sonuçları.

	Dolu Paka	ÜL	Ü-ÜL	KA-2ÜL	H-2ÜL	H-3ÜL
Elastisite Modülü [GPa]	169.0	5.63	0.093	1.32	0.26	1.43
Poisson Oranı	0.29	0.3333	-0.9708	-0.5859	-0.0767	-0.1163
1 μm kaplama için h [μm]	16.67	20.83	32.16	24.83	36.27	31.33
1 μm kaplama için $u_{\text{D-limit}}$ [μm]	3.36	3.88	2.98	7.75	9.89	9.29
1 μm kaplama için $u_{\text{D-limit}}$ için F [N]	0.19	0.04	0.035	0.095	0.165	0.135
1 μm kaplama için kütle [μgr]	30.5	5.6	7.7	6.4	8.3	7.6
5 μm kaplama için h [μm]	16.67	27.00	39.45	31.00	38.70	37.00
5 μm kaplama için $u_{\text{DO-limit}}$ [μm]	3.36	3.23	8.50	4.60	5.64	5.33
5 μm kaplama için $u_{\text{DO-limit}}$ için F [N]	0.19	0.08	0.25	0.12	0.16	0.15
5 μm kaplama için kütle [μgr]	30.5	13.4	15.6	14.1	15.4	15.3

3.6 KMuÇ Plakalarında Latis Uygulaması için Sonuçların Tartışılması

Şekil 3.25, düzlem içi ölçüleri $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, düzlem dışı kalınlıkları ise 1 cm olan, (a) Altıgen latis, (b) Değiştirilmiş Girintili (*İng*: Modified Re-entrant) latisin ve (c) Girintili latisin eğilme yükü altında aldıkları şekilleri göstermektedir [bkz. 112, Şekil 4]. Yük uygulanmadan önce düz olan bu üç latisten pozitif Poisson oranına sahip olan Altıgen latis, eğilme momenti uygulanınca eyer şeklini, Poisson oranı sıfır olan Değiştirilmiş Girintili latis silindirik bir yüzey şeklini, Poisson oranı negatif olan Değiştirilmiş Girintili latis ise küresel bir yüzey şeklini almaktadır. Eğilme yükü altındaki oluşan bu farklı deformasyon yüzeyleri sadece bu üç latise has olmayıp, Poisson oranı pozitif olan latislerde antiklastik (*textiting*: anticlastic), sıfır olan latislerde monoklastik, negatif olan latislerde ise senklastik (*İng*: synclastic) Gauss eğrilikleri görülmektedir.

Temel olarak, kenarlarına ankastre sınır koşulları uygulanmış bir plakanın yüzeyine uygulanan yük dolayısıyla eğilmesi/titreşmesi sayesinde elektrik/mekanik enerji dönüşümü sağlayan KMuÇ cihazları için plakanın kubbe şeklini almaya teşne olması bir avantajdır. Zira aynı miktarda enerji uygulandığında kolaylıkla kubbe şeklini alabilen bir plakadaki tepe ve ortalama yer değiştirme değerleri daha yüksek olacak, bu da KMuÇ cihazlarının enerji dönüşümü verimliliğini artıracaktır. Tez kapsamında yapılan teorik ve nümerik çalışmalar, bu önermeleri destekleyecek şekilde, aynı düzlem içi boyutlara ve aynı ilk doğal frekansa sahip plakalar arasında negatif Poisson oranına sahip olanlarda tepe ve ortalama yer değiştirme değerlerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, tepe ve ortalama yer değiştirme değerleri plaka malzemesinin yalnızca Poisson oranına değil aynı zamanda bağlı yoğunluğuna ve elastik modül değerlerine de bağlıdır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar, "kavram ispatı" (*İng*. proof of concept) niteliğindedir. Mevcut literatürde benzeri bulunmayan bu uygulama için "optimal KMuÇ plakası tasarımı" gelecek çalışma olarak değerlendirilebilir.



Şekil 3.25: (a) Altıgen latis, (b) Değiştirilmiş Girintili (*İng.* Modified Re-entrant) latisin ve (c) Girintili latisin eğilme yükü altında aldıkları şekiller: (a) antiklastik (*textiting*: anticlastic), (b) monoklastik ve (c) senklastik (*İng.* synclastic) Gauss eğrilikleri (*İng.* Gaussian curvatures).

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

4.1 Latis Malzeme Eyleyici Uygulamaları Sonuç

Beş farklı kusur tipinin – kırık hücre duvarı, eksik hücre, dalgalı hücre duvarı, sapmış hücre duvarı ve değişken kalınlıklı hücre duvarı — makroskopik Young modülü ve eyleyici performansı üzerindeki etkileri Kagome, Çift Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome yapılar için numerik olarak incelenmiştir. Latis bloğu, merkezinde bulunan tek bir lineer eyleyici tarafından uyarılır. Kusurların etkilerinin incelendiği bu çalışmada ya tek bir kusur eyleyici koridoruna yerleştirilir ya da kusurlar, eyleyici koridorunun dışındaki kusur bölgesinde rastgele dağıtılır. Bu çalışmanın temel bulguları aşağıda listelenmiştir.

- Latisin eyleyici enerjisi ve sönümleme mesafesi esas olarak eyleyici koridoru boyunca sertliğe bağlıdır: koridor ne kadar az sert olursa, eyleyici enerjisi o kadar düşük ve sönümleme mesafesi o kadar yüksek olur.
- Eyleyici koridoru üzerinde kırık veya dalgalı bir hücre duvarı veya eksik bir hücrenin, eyleyiciden mükemmel latisteki sönümleme mesafesinden daha yakın bir mesafede olduğunu varsayalım. Bu durumda eyleyici tarafından uygulanan deformasyon tam olarak kusur üzerinde sönümlenir. Öte yandan, kusur mükemmel latisin sönümleme mesafesinin biraz ötesinde yer alıyorsa, kusurlu latis içindeki sönümleme mesafesini artırır: kasıtlı olarak bir tasarım özelliği olarak “doğru” bir konuma yerleştirilen bir kusur, şekil değiştirme uygulamaları için faydalı olabilir.
- Eyleyici koridorunda değişken kalınlıklı bir hücre duvarı, eyleyici performansını etkilemez. Ancak, yer değiştiren eklemün yeni konumuna bağlı olarak, eyleyici koridorundaki sapmış hücre duvarları, eyleyici enerjisini artırabilir veya azaltabilir ve sönümleme mesafesini azaltabilir. Eyleyici koridorunda, eyleyiciden yeterince uzakta tek başına konumlandırılmış beş kusur tipinden hiçbirisi eyleyici performansını etkilemez.
- Eyleyici koridorunun dışındaki kusur bölgesinde rastgele dağılmış kusurların varlığı, latisin makroskopik Young modülünü bozar. Makroskopik Young modülündeki yıkım ile bağlantılı eyleyici performansındaki azalma, kusurun tipine bağlıdır. Örneğin yanlış hizalanmış bir bağlantının etkisi yalnızca yakın çevresine yayılır ve bu nedenle kusurlu bölgedeki sapmış hücre duvarı

kusurlarının %10'u bile latisin eyleyici performansını etkilemez. Bununla birlikte, rastgele dağıtılmış kusurlar, latisi arızaya daha yatkın hale getirir ve şekil değiştirme uygulamaları için daha az kullanışlı hale getirir.

- Çift Kagome ve Eşmerkez Üçgenli Kagome latislerinin hem eyleyici performansı hem de kusur toleransı, Kagome latisininkilerle karşılaştırılabilir. Bu nedenle, bu iki latis, şekil değiştirme uygulamalarında Kagome latisi için iyi alternatifler olarak değerlendirilebilir.

4.2 Latis Malzemelerin KMuÇ Uygulamaları Sonuç ve Değerlendirme

KMuÇ cihazları elektrik enerjisini kapasitans yaratarak plakasında oluşturduğu mekanik hareket aracılığıyla akustik enerjiye çeviren dinamik dönüştürücülerdir. Bir boşluk üzerine kapatılan elektrot plakası ile yaratılan vakum ortamında elektrotları arası uygulanan gerilim ile ankastre plakada ilk doğal frekansta hareket elde edilir ve bu yolla içinde bulunduğu ortamda akustik dalgalar üretilir. Akustik ortamda üretilen bu dalgalar ortamdaki nesnelere çarpıp geri dönerek yine KMuÇ cihazları tarafından algılanır ve böylece ortamdaki nesneler tespit edilir. Doğrusal operasyonun çok önemli olduğu KMuÇ cihazlarında hareketli plaka üzerine latis malzeme uygulamasının büyük bir potansiyeli vardır. Bu potansiyeli keşfetmek adına yapılan bu çalışmada elde edilen bulgular şöyledir:

- Elektriksel, mekanik ve akustik unsurlardan oluşan, doğrusal bir enerji çevirgeci olarak çalışması istenen KMuÇ cihazlarındaki doğrusal olmayan davranışın kaynağı, ankastre plakanın mekanik hareketidir ve hareketin en başından beri bu davranış çok az da olsa mevcuttur. Artan yükleme ile bu davranış artmaktadır.
- Ankastre boşluksuz plakaya güçlendirme katmanı olarak eklenen latis yapı ile plakanın deliksiz kaplama bölümü inceltilecek ve latis malzeme ide daha yüksek doğrusal deplasmanlar elde edilecektir. Çalışmada latis malzeme olarak Üçgen latis ve negatif Poisson oranlı latisler Üçgen-Üçgen, Karma Altıgen 2-Üçgen, Hiyerarşik 2-Üçgen ve Hiyerarşik 3-Üçgen latisler güçlendirme yapısı olarak incelenmiştir.
- Birden fazla değişkenin olduğu bu karşılaştırma problemini KMuÇ uygulaması bakımından değerlendirmesini sağlayabilmek adına farklı latis güçlendirme katmanlarını içeren tüm plaka yapılarının katı plaka ile aynı 1. doğal frekansa sahip olacak şekilde farklı kalınlıklara sahip olmalarına karar verilmiştir.

- Homojenizasyon yöntemi ile latis malzemenin eşdeğer mekanik özellikleri bulunmuş ve bu özelliklere göre analitik plaka modelleri oluşturulmuştur. oluşturulan bu modellerle farklı latis malzemelerin KMuÇ uygulaması için doğrusallık ve deformasyon bakımından başarısı incelenmiş ve negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin başarısı açıklanmıştır. Bu malzemeler ankastre plaka formunda kolayca kubbe şeklini alabilmektedir.
- Elde edilen farklı latislerin KMuÇ uygulamasında kullanılabilmesi için üzerinin bir elektrot tabakası ile kaplanması gerektiği belirlenmiştir. Bu yapıdaki plakaların incelenmesi için sonlu elemanlar yöntemine başvurulacaktır. Sonlu elemanlar analiz modellerinin doğrulanması için kaplamasız latis modellerinin yüksek r/l oranları için elde edilen doğal frekans sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.
- Kaplamalı latis plaka için yapılacak sonlu elemanlar hesaplamaların ve modellerin doğruluğunu arttırmak ve çözüm sürelerini kısaltmak için gerçekleştirilen eleman tipi belirleme çalışmasına göre tek sıra kaplamaya sahip latis KMuÇ plakaları için kabuk eleman kullanılmasına karar verilmiştir.
- Kaplamalı latislerin homojenizasyon mantığına göre analitik formülden gelen kalınlık değerleri ile yapılan analizlerine göre yapılar analitik hesaba göre fazla rijit çıkmıştır. Bunun üzerine her bir latisin kalınlığı katı plaka ile aynı 1. doğal frekansa sahip olacak şekilde analiz iterasyonlarıyla belirlenmiştir.
- $1\mu\text{m}$ kaplama eklenmiş durumda negatif Poisson oranına sahip latislerden Karma Altıgen 2 Üçgen, Hiyerarşik 2 Üçgen ve Hiyerarşik 3 Üçgen yapılar katı plakaya göre 2-3 kat daha yüksek doğrusal deformasyon sağlamaktadır. Üçgen latis doğrusal hareket limitini katı plakaya göre fazla arttıramazken tüm latislere göre en düşük Poisson oranına sahip Üçgen-Üçgen latis beklenmedik şekilde doğrusallık limitini katı plakadan da erken bir değerde yitirmektedir. Bu durumun sebebi Üçgen-Üçgen latiste ince kaplamada yaşanan kabartı sorunudur.
- Kabartı sorununu incelemek adına bir de $5\mu\text{m}$ kaplama için önceki hesaplamalar tekrarlanmıştır. Eklenen kalın kaplama tüm latislerde deformasyon seviyesini azaltırken bu karşılaştırmada Üçgen-Üçgen latis beklendiği gibi diğerlerine üstünlük sağlayarak $5\mu\text{m}$ kaplama için en yüksek doğrusal deformasyon limitini sunmaktadır. Ancak yine de bu değer H-2Ü ve H-3Ü latislerin $1\mu\text{m}$ kaplamada verdiği değerlerden bir miktar düşüktür.

Bu çalışmada negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin, ankastre plaka içeren KMuÇ cihazlarının doğrusal çalışma limitini artırmada büyük bir potansiyel

sundukları ortaya çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen analitik formülasyonlar ile ankastre bir plaka için en yüksek doğrusal deformasyonu elde edebilmek için mümkün olduğunca düşük Poisson oranına sahip malzemelere ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir. Çalışmada yer alan Karma Altıgen 2 Üçgen, Hiyerarşik 2 Üçgen ve Hiyerarşik 3 Üçgen latisler ile KМУÇ plakalarına pratik olarak uygulanabilmek için gerekli kaplama katmanlı hali ile aynı dinamik özelliklere sahip katı plakaya göre 3 kata kadar daha yüksek doğrusal çalışma deformasyon aralığı elde edilmiştir. Analitik hesaplamalara göre en yüksek doğrusal çalışma aralığı sunma potansiyeli olan Üçgen-Üçgen latis yapısı, ince kaplama katmanında yaşanan kabartı sorunu nedeniyle istenilen performansa çıkamamıştır. Ancak daha kalın kaplama katmanı uygulandığı durum için yapılan karşılaştırmada diğer latislere olan farkını ortaya koymuştur. Bu çalışma ile özellikle negatif Poisson oranına sahip latis malzemelerin ankastre plaka uygulamalarındaki potansiyelleri gösterilmiştir. Gelecekte de farklı latis yapıları içeren KМУÇ plaka tasarımları için parametre optimizasyon çalışmaları, üretim denemeleri ve deneysel çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ashby, M., Gibson, L., Wegst, U. G., ve 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. ve Ashby, M. F.** (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge Solid State Science Series. Cambridge University Press, 2 edition.
- [3] **Evans, A., Hutchinson, J., ve Ashby, M.** (1998). Multifunctionality of cellular metal systems. *Progress in Materials Science*, 43(3):171–221.
- [4] **Wadley, H. N.** (2006). Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838):31–68.
- [5] **Cabras, L. ve Brun, M.** (2016). A class of auxetic three-dimensional lattices. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 91:56–72.
- [6] **Ashby, M., Evans, A., Fleck, N., Gibson, L., Hutchinson, J., ve Wadley, H.** (2000). *Metal foams: a design guide*. Qxford: Butterworth-Heinemann, Burlington.
- [7] **Lefebvre, L.-P., Banhart, J., ve Dunand, D.** (2008). Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments. *Advanced Engineering Materials*, 10:775–787.
- [8] **Khanoki, S. A. ve Pasini, D.** (2012). Multiscale design and multiobjective optimization of orthopedic hip implants with functionally graded cellular material. *Journal of biomechanical engineering*, 134:031004.
- [9] **Arabnejad, S., Burnett Johnston, R., Pura, J. A., Singh, B., Tanzer, M., ve Pasini, D.** (2016). High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints. *Acta Biomaterialia*, 30:345–356.
- [10] **Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., ve Zadpoor, A.** (2016). Mechanics of additively manufactured porous biomaterials based on the rhombicuboctahedron unit cell. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 53:272–294.

- [11] **Fleck, N., Deshpande, V., ve Ashby, M.** (2010). Micro-architected materials: past, present and future. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466:2495 – 2516.
- [12] **Ashby, M., Gibson, L. J., Wegst, U., ve Olive, R.** (2021). Material property charts. CES EduPack 2019, ANSYS Granta © 2020 Granta Design.
- [13] **Almgren, R.** (1985). An isotropic three-dimensional structure with poisson's ratio = -1. *Journal of Elasticity*, 15:427–430.
- [14] **Lakes, R.** (1987). Foam structures with a negative poisson's ratio. *Science*, 235(4792):1038–1040.
- [15] **Wojciechowski, K.** (1989). Two-dimensional isotropic system with a negative poisson ratio. *Physics Letters A*, 137(1):60–64.
- [16] **Lakes, R.** (1991). Deformation mechanisms in negative poisson's ratio materials: structural aspects. *Journal of Materials Science*, 26(9):2287–2292.
- [17] **Chen, Z., Wang, Z., Zhou, S., Shao, J., ve Wu, X.** (2018). Novel negative poisson's ratio lattice structures with enhanced stiffness and energy absorption capacity. *Materials*, 11:1095.
- [18] **Liu, Q.** (2006). Literature review: Materials with negative poisson's ratios and potential applications to aerospace and defence. *Australian Government Department of Defence*.
- [19] **Liu, Y. ve Hu, H.** (2010). A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific research and essays*, 5:1052–1063.
- [20] **Lakes, R. S.** (2017). Negative poisson's ratio materials: Auxetic solids. *Annual Review of Materials Research*, 47(1):63–81.
- [21] **Aksu, U. ve Tatlier, M. S.** (2018). An investigation on auxetic feature and its applications. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(2):167–176.
- [22] **Gao, Y., Wu, Q., Wei, X., Zhou, Z., ve Xiong, J.** (2020). Composite tree-like re-entrant structure with high stiffness and controllable elastic anisotropy. *International Journal of Solids and Structures*, 206:170–182.
- [23] **Wilt, J., Yang, C., ve Gu, G.** (2020). Accelerating auxetic metamaterial design with deep learning. *Advanced Engineering Materials*, 22:2070018.
- [24] **Christensen, J., Kadic, M., Kraft, O., ve Wegener, M.** (2015). Vibrant times for mechanical metamaterials. *MRS Communications*, 5(3):453–462.
- [25] **Zied, K., Osman, M., ve Elmahdy, T.** (2015). Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores. *physica status solidi (b)*, 252(12):2685–2692.

- [26] **McKown, S., Shen, Y., Brookes, W., Sutcliffe, C., Cantwell, W., Langdon, G., Nurick, G., ve Theobald, M.** (2008). The quasi-static and blast loading response of lattice structures. *International Journal of Impact Engineering*, 35(8):795–810.
- [27] **Evans, A., He, M., Deshpande, V., Hutchinson, J., Jacobsen, A., ve Carter, W.** (2010). Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices. *International Journal of Impact Engineering*, 37(9):947–959.
- [28] **Schaedler, T. A., Jacobsen, A. J., Torrents, A., Sorensen, A. E., Lian, J., Greer, J. R., Valdevit, L., ve Carter, W. B.** (2011). Ultralight Metallic Microlattices. *Science*, 334(6058):962–965.
- [29] **Tancogne-Dejean, T., Spierings, A. B., ve Mohr, D.** (2016). Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia*, 116(C):14–28.
- [30] **Nolde, E., Craster, R., ve Kaplunov, J.** (2011). High frequency homogenization for structural mechanics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(3):651–671.
- [31] **Wu, Z.-J., Li, F.-M., ve Zhang, C.** (2015). Vibration band-gap properties of three-dimensional Kagome lattices using the spectral element method. *Journal of Sound and Vibration*, 341:162–173.
- [32] **Delpero, T., Schoenwald, S., Zemp, A., ve Bergamini, A.** (2016). Structural engineering of three-dimensional phononic crystals. *Journal of Sound and Vibration*, 363:156–165.
- [33] **Steeves, C. A., Dos Santos E Lucato, S. L., He, M., Antinucci, E., Hutchinson, J. W., ve 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(9):1803–1822.
- [34] **Wei, K., Chen, H., Pei, Y., ve 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.
- [35] **Xu, H. ve Pasini, D.** (2016). Structurally Efficient Three-dimensional Metamaterials with Controllable Thermal Expansion. *Scientific Reports*, 6(1):34924.
- [36] **Maloney, K. J., Fink, K. D., Schaedler, T. A., Kolodziejska, J. A., Jacobsen, A. J., ve Roper, C. S.** (2012). Multifunctional heat exchangers derived from three-dimensional micro-lattice structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(9-10):2486–2493.
- [37] **Wallach, J. ve Gibson, L.** (2001). Mechanical behavior of a three-dimensional truss material. *International Journal of Solids and Structures*, 38(40-41):7181–7196.

- [38] **Wang, J., Evans, A., Dharmasena, K., ve Wadley, H.** (2003). On the performance of truss panels with Kagomé cores. *International Journal of Solids and Structures*, 40(25):6981–6988.
- [39] **Queheillalt, D. T., Murty, Y., ve Wadley, H. N.** (2008). Mechanical properties of an extruded pyramidal lattice truss sandwich structure. *Scripta Materialia*, 58(1):76–79.
- [40] **Arabnejad Khanoki, S. ve Pasini, D.** (2012). Multiscale Design and Multiobjective Optimization of Orthopedic Hip Implants with Functionally Graded Cellular Material. *Journal of Biomechanical Engineering*, 134(3):031004.
- [41] **Vigliotti, A. ve Pasini, D.** (2015). Analysis and design of lattice materials for large cord and curvature variations in skin panels of morphing wings. *Smart Materials and Structures*, 24(3):037006.
- [42] **Pronk, T., Ayas, C., ve Tekoğlu, C.** (2017). A quest for 2d lattice materials for actuation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 105:199–216.
- [43] **Nelissen, W., Ayas, C., ve Tekoğlu, C.** (2019). 2d lattice material architectures for actuation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 124:83–101.
- [44] **Brittain, S., Sugimura, Y., Schueller, O., Evans, A., ve Whitesides, G.** (2001). Fabrication and mechanical performance of a mesoscale space-filling truss system. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10(1):113–120.
- [45] **Sypeck, D. J. ve Wadley, H. N. G.** (2001). Multifunctional microtruss laminates: Textile synthesis and properties. *Journal of Materials Research*, 16(3):890–897.
- [46] **Wadley, H.** (2003). Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 63(16):2331–2343.
- [47] **Dos Santos E Lucato, S., Wang, J., Maxwell, P., McMeeking, R., ve Evans, A.** (2004). Design and demonstration of a high authority shape morphing structure. *International Journal of Solids and Structures*, 41(13):3521–3543.
- [48] **Ayas, C. ve Tekoğlu, C.** (2018). On the Sufficient Symmetry Conditions for Isotropy of Elastic Moduli. *Journal of Applied Mechanics*, 85(7):074502.
- [49] **Hashin, Z. ve Shtrikman, S.** (1962). On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 10(4):335–342.

- [50] **Hyun, S. ve Torquato, S.** (2002). Optimal and Manufacturable Two-dimensional, Kagomé-like Cellular Solids. *Journal of Materials Research*, 17(1):137–144.
- [51] **Wicks, N. ve Guest, S.** (2004). Single member actuation in large repetitive truss structures. *International Journal of Solids and Structures*, 41(3):965–978.
- [52] **Hutchinson, R., Wicks, N., Evans, A., Fleck, N., ve Hutchinson, J.** (2003). Kagome plate structures for actuation. *International Journal of Solids and Structures*, 40(25):6969–6980.
- [53] **Wicks, N. ve Hutchinson, J. W.** (2004). Sandwich Plates Actuated by a Kagome Planar Truss. *Journal of Applied Mechanics*, 71(5):652–662.
- [54] **Symons, D., Hutchinson, R., ve Fleck, N.** (2005). Actuation of the Kagome Double-Layer Grid. Part 1: Prediction of performance of the perfect structure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53(8):1855–1874.
- [55] **Symons, D., Shieh, J., ve Fleck, N.** (2005). Actuation of the Kagome Double-Layer Grid. Part 2: Effect of imperfections on the measured and predicted actuation stiffness. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53(8):1875–1891.
- [56] **Hutchinson, R. ve Fleck, N.** (2006). The structural performance of the periodic truss. *Journal of The Mechanics and Physics of Solids*, 54:756–782.
- [57] **Wang, J., Nausieda, A., Dos Santos E Lucato, S., ve Evans, A.** (2007). Twisting of a high authority morphing structure. *International Journal of Solids and Structures*, 44(9):3076–3099.
- [58] **Maxwell, J. C.** (1864). L. *On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames.* *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 27(182):294–299.
- [59] **Laman, G.** (1970). On graphs and rigidity of plane skeletal structures. *Journal of Engineering Mathematics*, 4(4):331–340.
- [60] **Calladine, C.** (1978). Buckminster Fuller’s “Tensegrity” structures and Clerk Maxwell’s rules for the construction of stiff frames. *International Journal of Solids and Structures*, 14(2):161–172.
- [61] **Pellegrino, S. ve Calladine, C.** (1986). Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks. *International Journal of Solids and Structures*, 22(4):409–428.
- [62] **Pellegrino, S.** (1993). Structural computations with the singular value decomposition of the equilibrium matrix. *International Journal of Solids and Structures*, 30(21):3025–3035.
- [63] **Deshpande, V., Ashby, M., ve Fleck, N.** (2001). Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49(6):1035–1040.

- [64] **Guest, S.** (2003). On the determinacy of repetitive structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(3):383–391.
- [65] **Donev, A. ve Torquato, S.** (2003). Energy-efficient actuation in infinite lattice structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(8):1459–1475.
- [66] **Chen, C., Lu, T., ve Fleck, N.** (1999). Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47(11):2235–2272.
- [67] **Chu, C., Graf, G., ve Rosen, D. W.** (2008). Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 5(5):686–696.
- [68] **Vayre, B., Vignat, F., ve Villeneuve, F.** (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13(2):89–96.
- [69] **Mercelis, P. ve Kruth, J.** (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5):254–265.
- [70] **Zaeh, M. F. ve Branner, G.** (2010). Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting. *Production Engineering*, 4(1):35–45.
- [71] **Bagheri, Z. S., Melancon, D., Liu, L., Johnston, R. B., ve Pasini, D.** (2017). Compensation strategy to reduce geometry and mechanics mismatches in porous biomaterials built with Selective Laser Melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70:17–27.
- [72] **Ushijima, K., Cantwell, W., Mines, R., Tsopanos, S., ve Smith, M.** (2011). An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 13(3):303–329.
- [73] **Cheng, X., Li, S., Murr, L., Zhang, Z., Hao, Y., Yang, R., Medina, F., ve Wicker, R.** (2012). Compression deformation behavior of Ti–6Al–4V alloy with cellular structures fabricated by electron beam melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 16:153–162.
- [74] **Gümrük, R. ve Mines, R.** (2013). Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 68:125–139.
- [75] **Gümrük, R., Mines, R., ve Karadeniz, S.** (2013). Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 586:392–406.
- [76] **Xiao, L., Song, W., Wang, C., Liu, H., Tang, H., ve Wang, J.** (2015). Mechanical behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti–6Al–4V lattice structure. *Materials Science and Engineering: A*, 640:375–384.

- [77] **Onck, P. R., Van Merkerk, R., Raaijmakers, A., ve De Hosson, J. T. M.** (2005). Fracture of open- and closed-cell metal foams. *Journal of Materials Science*, 40(22):5821–5828.
- [78] **Santorinaios, M., Brooks, W., Sutcliffe, C. J., ve Mines, R. A. W.** (2006). Crush behaviour of open cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. In *High Performance Structures and Materials III*, volume 1, pages 481–490, Ostend, Belgium. WIT Press.
- [79] **Campoli, G., Borleffs, M., Amin Yavari, S., Wauthle, R., Weinans, H., ve Zadpoor, A.** (2013). Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing. *Materials & Design*, 49:957–965.
- [80] **Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A., Anaraki, A., Ahmadi, S., Zadpoor, A., ve Schmauder, S.** (2015). Failure mechanisms of additively manufactured porous biomaterials: Effects of porosity and type of unit cell. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 50:180–191.
- [81] **Görgülüarslan, R. M., Choi, S.-K., ve Saldana, C. J.** (2017). Uncertainty quantification and validation of 3D lattice scaffolds for computer-aided biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 71:428–440.
- [82] **Grenestedt, J. L.** (1998). Influence of wavy imperfections in cell walls on elastic stiffness of cellular solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(1):29–50.
- [83] **Symons, D. D. ve Fleck, N. A.** (2008). The Imperfection Sensitivity of Isotropic Two-Dimensional Elastic Lattices. *Journal of Applied Mechanics*, 75(5):051011.
- [84] **Queheillalt, D., Deshpande, V., ve Wadley, H.** (2007). Truss waviness effects in cellular lattice structures. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(9):1657–1675.
- [85] **Gençoğlu, C., Tekoğlu, C., ve Ayas, C.** (2022). Effect of imperfections on the actuation performance of lattice materials. *International Journal of Solids and Structures*, 252:111779.
- [86] **ABAQUS** (2020). *Abaqus documentation collection, Version 2020*, Providence. Dassault Systèmes.
- [87] **Arretche, I. ve Matlack, K. H.** (2018). On the interrelationship between static and vibration mitigation properties of architected metastructures. *Frontiers in Materials*, 5:68.
- [88] **Elmadih, W.** (2019). *Additively manufactured lattice structures for vibration attenuation*. PhD thesis, University of Nottingham.

- [89] **McShane, G., Radford, D., Deshpande, V., ve Fleck, N.** (2006). The response of clamped sandwich plates with lattice cores subjected to shock loading. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 25(2):215–229.
- [90] **Monkova, K., Vasina, M., Zaludek, M., Monka, P. P., ve Tkac, J.** (2021). Mechanical vibration damping and compression properties of a lattice structure. *Materials*, 14(6).
- [91] **Syam, W. P., Jianwei, W., Zhao, B., Maskery, I., Elmadih, W., ve Leach, R.** (2018). Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation. *Precision Engineering*, 52:494–506.
- [92] **Şimşek, U., Gayir, C., Kavas, B., ve Sendur, P.** (2021). Parametric studies on vibration characteristics of triply periodic minimum surface sandwich lattice structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115:675–690.
- [93] **Wang, R., Shang, J., Li, X., Luo, Z., ve wu, W.** (2019). Vibration and damping characteristics of 3d printed kagome lattice with viscoelastic material filling. *Scientific Reports*, 8:9604.
- [94] **Chan, J., Zheng, Z., Bell, K., Le, M., Reza, P. H., ve Yeow, J. T.** (2019). Photoacoustic imaging with capacitive micromachined ultrasound transducers: Principles and developments. *Sensors*, 19(16).
- [95] **Hongbin, Y., Liang, L. Y., ve Yuandong, A. G.** (2016). Capacitive micromachined ultrasonic transducer (cmut) based micro viscosity sensor. *Sensors and Actuators B-chemical*, 227:346–351.
- [96] **Bozkurt, A.** (2000). *Modeling and characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers*. PhD thesis, Bilkent University.
- [97] **Brenner, K., Ergun, A. S., Firouzi, K., Rasmussen, M. F., Stedman, Q., ve Khuri-Yakub, B. P.** (2019). Advances in capacitive micromachined ultrasonic transducers. *Micromachines*, 10(2).
- [98] **Holbek, S., Christiansen, T. L., Engholm, M., Lei, A., Stuart, M. B., Beers, C., Moesner, L. N., Bagge, J. P., Thomsen, E. V., ve Jensen, J. A.** (2016). 3d vector flow using a row-column addressed cmut array. In *Medical Imaging 2016: Ultrasonic Imaging and Tomography*, volume 9790, pages 40 – 47. International Society for Optics and Photonics, SPIE.
- [99] **Yaralioglu, G. G., Bayram, B., Nikoozadeh, A., ve Khuri-Yakub, B. T. P.** (2005). Finite element modeling of capacitive micromachined ultrasonic transducers. In *Medical Imaging 2005: Ultrasonic Imaging and Signal Processing*, volume 5750, pages 77 – 86. International Society for Optics and Photonics, SPIE.
- [100] **Priya, P. ve Pant, B.** (2015). Capacitive micro-machined ultrasonic transducer (cmut) based volumetric blood flow-meter. In *Proceedings of the 2015 COMSOL Conference*, Pune.

- [101] **Yaralioglu, G., Ergun, S., ve Khuri-Yakub, B.** (2005). Finite-element analysis of capacitive micromachined ultrasonic transducers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 52(12):2185–2198.
- [102] **Aydogdu, E., Ozgurluk, A., Atalar, A., ve Köymen, H.** (2014). Parametric nonlinear lumped element model for circular cmuts in collapsed mode. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 61(1):173–181.
- [103] **Oralkan, O., Bayram, B., Yaralioglu, G., Ergun, A., Kupnik, M., Yeh, D., Wygant, I., ve Khuri-Yakub, B.** (2006). Experimental characterization of collapse-mode cmut operation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 53(8):1513–1523.
- [104] **Yilmaz, A.** (2014). *Airborne CMUT Cell Design*. PhD thesis, Bilkent University.
- [105] **Kim, D., Chung, S.-W., Jeong, B. G., Hong, S.-W., ve Shin, H.** (2013). An indirectly clamped capacitive micromachined ultrasonic transducer with a high electromechanical coupling factor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 203:82–91.
- [106] **Şenlik, M., Olcum, S., ve Atalar, A.** (2005). Improved performance of cmut with nonuniform membranes. In *IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.*, volume 1, pages 597 – 600.
- [107] **Inman, D. J.** (2013). *Engineering Vibrations*. Pearson, 4 edition.
- [108] **Ewins, D. J.** (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Research Studies Press, 2 edition.
- [109] **Maia, N. ve Silva, J.** (1997). *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press.
- [110] **Ugural, A.** (2009). *Stresses in Beams, Plates, and Shells, Third Edition*. CRC Press.
- [111] **Wang, C. Y. ve Wang, C. M.** (2013). *Structural Vibration*. CRC Press.
- [112] **La Magna, R. ve Knippers, J.** (2018). *Tailoring the Bending Behaviour of Material Patterns for the Induction of Double Curvature*, pages 441–452. Springer Singapore, Singapore.