

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NEGATİF POİSSON ORANINA SAHİP BİR MİKRO-KAFES YAPININ
TASARIMI VE ANALİZİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aslı İŞILTAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NEGATİF POİSSON ORANINA SAHİP BİR MİKRO-KAFES YAPININ
TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Aslı İŞILTAN
503131514**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mesut KIRCA

HAZİRAN 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503131514 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Aslı IŞILTAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP BİR MİKRO-KAFES YAPININ TASARIMI VE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Mesut KIRCA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Atakan Altınkaynak**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Emrecañ Söylemez
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2017**
Savunma Tarihi : **08 Haziran 2017**





Canim anneme,



ÖNSÖZ

Her şeyden önce, hayatım boyunca yanımda olan ve her zaman yanımda olacaklarını hissettiren aileme minnetlerimi sunmak istiyorum. İyi ki varsınız.

Bununla birlikte, yüksek lisans eğitimim boyunca, zorlandığım anlarda desteğini esirgemeyen sevgili hocam Prof. Dr. Vedat Ziya Doğan' a da çok teşekkür ediyorum.

Mayıs 2017

Aslı Işıltan
Makine Mühendisi





İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1 . GİRİŞ.....	1
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
1.2 Gözenekli Katı Malzemeler	2
1.2.1 Bal peteği (honeycomb) yapılar	2
1.2.2 Köpük yapılı malzemeler	3
1.2.3 Mikro-kafes yapılar	3
1.3 Çalışma Planı.....	4
2 . MİKRO - KAFES YAPILAR VE ÖZELLİKLERİ.....	7
2.1 Mikro-Kafes Yapı Nedir?.....	7
2.2 Mikro-Kafes Yapıların Ortaya Çıkışı ve Ortaya Çıkış Amacı	8
2.3 Mikro-Kafes Yapıların Kullanım Alanları	10
2.3.1 Endüstriyel ürünler.....	10
2.3.2 Biyomalzemeler	11
2.3.3 Havacılık	12
2.4 Mikro-Kafes Yapıların Sınıflandırılması	13
2.4.1 Rastgele dağılım gösteren mikro-kafes yapılar.....	15
2.4.2 Sıralı dizilime sahip olan mikro-kafes yapılar	16
2.5 Mikro-Kafes Yapıların İmalat Yöntemleri.....	17
2.5.1 Döküm.....	17
2.5.2 Deformasyon yardımıyla şekillendirme.....	18
2.5.3 Metal tellerin birleşimi ile şekillendirme	19
2.5.4 Seçici lazer ergitme	19
2.5.5 Diğer imalat yöntemleri	21
2.6 Mikro-Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri.....	21
2.6.1 Bağlı yoğunluk	22
2.6.2 Gerilme şekil değiştirme ilişkisi	22
2.6.3 Negatif Poisson oranı	24
2.7 Mikro-Kafes Yapıların Gelecekteki Yeri	27
2.8 Literatürdeki Örnek Yapılara Genel Bakış.....	28
3. ÇALIŞMA KAPSAMINDA YAPILAN TASARIM VE ANALİZLER.....	33
3.1 Tasarımdan Beklenen Özellikler	33
3.2 Tasarımın Amacı	33
3.3 Mikro-Kafes Yapı Modellemesi.....	33

3.3.1 Plaka yapı modellemesi.....	33
3.3.2 Üç boyutlu modelleme	35
3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri	37
3.4.1 Statik analiz.....	37
3.4.1.1 Çekme analizi	37
3.4.1.2 Basma analizi	44
3.4.2 Dinamik analiz	48
3.4.2.1 Darbe analizi	48
3.4.3 Analizlerden elde edilen bulguların değerlendirilmesi	53
4 . SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	67



KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacture
EBM	: Electron Beam Melting
FEM	: Finite Element Method
gr	: Gram
kg	: Kilogram
mm, cm	: Milimetre, santimetre
MPa, GPa	: Megapascal, Gigapascal
N	: Newton
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
SLM	: Selective Laser Melting
s	: Saniye
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
V, kV	: Volt, Kilovolt
W	: Watt



SEMBOLLER

E, E_{st}	: Elastisite modülü, çeliğin elastisite modülü
F	: Kuvvet
G	: Kayma modülü
K	: Hacim modülü
k, k_{eş}	: Yay sabiti, eş değer yay sabiti
V_{int}	: İlk hız
Δx	: x yönündeki yer değişimi
ε	: Birim şekil değişimi
ε_x, ε_y, ε_z	: x, y ve z eksenlerindeki birim şekil değişimi
ν, ν_{st}	: Poisson oranı, çeliğin Poisson oranı
ρ_r	: Bağıl yoğunluk
ρ_{ml}	: Mikro-kafes yapı yoğunluğu
ρ_m	: Ana malzeme yoğunluğu
ρ_{st}	: Çeliğin yoğunluğu
μ_{st}	: Çeliğin sürtünme katsayısı
σ	: Gerilme
σ_x, σ_y, σ_{xy}	: x, y ve z eksenlerindeki gerilmeler



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Bal peteği (honeycomb) yapılar.	2
Şekil 1.2 : Polistren köpük malzeme (solda) ve metal köpük malzeme (sağda) yapıları.....	3
Şekil 1.3 : Mikro-kafes yapı örneği.	4
Şekil 2.1 : İki boyutlu mikro-kafes yapı örneği.	7
Şekil 2.2 : Tipik bir kafes yapı görünümü ve çeşitli birim hücre yapıları. (Cantwell ve diğ, 2011).	8
Şekil 2.3 : Üst femur kemiği kesiti (solda) ve tasarım gerekliliklerine göre optimize edilmiş kafes yapı (sağda) (Wang, 2005).	9
Şekil 2.4 : Otomobil tamponu için uygulama örneği (Wang, 2005).	10
Şekil 2.5 : Robot kol için uygulama örneği (Wang, 2005).	11
Şekil 2.6 : Mikro-kafes yapıya sahip implant (solda) ve çeneye monte edilmiş hali (sağda).	12
Şekil 2.7 : NASA' nın üzerinde çalıştığı uçak kanatı tasarımı (Weiss, 2003).	13
Şekil 2.8 : Gözenekli malzemelerde baskın olan iki topoloji (Ashby ve diğ, 2001).	14
Şekil 2.9 : Adaptif kafes yapı tasarımına bir örnek.	16
Şekil 2.10 : Sıralı dizilime sahip mikro-kafes yapı tasarım örnekleri.	16
Şekil 2.11 : Döküm yöntemiyle imal edilmiş mikro-kafes yapı örnekleri - (a) alüminyum alaşımından imal edilmiş yapı, (b) bakır alaşımından imal edilmiş yapı (Ashraf ve diğ, 2016).	17
Şekil 2.12 : Deformasyon yardımıyla şekillendirme prosesi (Kooistra ve Wadley, 2007).	18
Şekil 2.13 : Örülü olmayan katı metal tel şekillendirmesi (Queheillalt ve Wadley, 2005).	19
Şekil 2.14 : Şematik olarak SLM prosesi (Brooks ve diğ , 2010).	20
Şekil 2.15 : Eğilme baskın gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Gümrük, 2012).	23
Şekil 2.16 : Çekme-basma baskın gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Gümrük, 2012).	24
Şekil 2.17 : Pozitif Poisson oranına sahip bir malzemeye çekme kuvveti uygulanmasının şematik görünümü. İnce çizgiler orjinal malzemeye, kalın çizgiler deformasyon sonrasındaki malzemeye aittir (Jayanty, 2010).	25
Şekil 2.18 : Negatif Poisson oranına sahip bir malzemeye çekme kuvveti uygulanmasının şematik görünümü. İnce çizgiler orjinal malzemeye, kalın çizgiler deformasyon sonrasındaki malzemeye aittir (Jayanty, 2010).	26
Şekil 2.19 : İki boyutlu mikro-kafes yapıya örnek (Caiazzo ve diğ, 2014).	28
Şekil 2.20 : İki boyutlu mikro-kafes yapı tasarımları (Ashby ve diğ, 2010).	28
Şekil 2.21 : Literatürde kullanılan iki boyutlu mikro-kafes yapıya örnek.	29

Şekil 2.22 : Literatürde kullanılan iki boyutlu mikro-kafes yapının çekme kuvveti altında şekil değişimi.	29
Şekil 2.23 : Üç boyutlu kafes yapmayı oluşturan birim hücre ve hücre yayılımı.	30
Şekil 2.24 : İki boyutlu yapı rulo şeklinde sarılarak üç boyutlu hale getirilmiştir. ...	30
Şekil 2.25 : Rulo yapının çekme kuvveti altında şekil değişimi.	31
Şekil 3.1 : Tasarlanan iki boyutlu plaka yapısı.	34
Şekil 3.2 : İki boyutlu mikro-kafes yapının birim hücresi.	34
Şekil 3.3 : İki boyutlu birim hücre ölçüleri (mm).	35
Şekil 3.4 : Tasarlanan üç boyutlu mikro-kafes yapısı.	36
Şekil 3.5 : Üç boyutlu kafes yapıda birim hücrelerin birbirine geçişi.	36
Şekil 3.6 : Tasarlanan üç boyutlu mikro-kafes yapısı (izometrik görünüş).	37
Şekil 3.7 : Deforme olmamış iki boyutlu mikro-kafes yapısı.	39
Şekil 3.8 : Çekme analizi sonrası, deforme olmuş iki boyutlu mikro-kafes yapısı.	39
Şekil 3.9 : Deforme olmamış üç boyutlu mikro-kafes yapısı.	40
Şekil 3.10 : Çekme analizi sonrası, deforme olmuş üç boyutlu mikro-kafes yapısı. ...	40
Şekil 3.11 : Çekme etkisinde, Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.	41
Şekil 3.12 : Çekme analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.	42
Şekil 3.13 : Çekme analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.	42
Şekil 3.14 : Çekme analizi sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.	43
Şekil 3.15 : Çekme analizi sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.	43
Şekil 3.16 : Basma analizi sonrası, deforme olmuş iki boyutlu mikro-kafes yapısı. ...	44
Şekil 3.17 : Basma analizi sonrası, deforme olmuş üç boyutlu mikro-kafes yapısı.	45
Şekil 3.18 : Basma etkisinde, Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.	45
Şekil 3.19 : Basma analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.	46
Şekil 3.20 : Basma analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.	46
Şekil 3.21 : Basma analizi sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.	47
Şekil 3.22 : Basma analizi sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.	47
Şekil 3.23 : 5000 mm/s hızla çarpma öncesi, iki boyutlu mikro-kafes yapısı ve rijit plaka.	49
Şekil 3.24 : 5000 mm/s hızla çarpma sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapısı ve rijit plaka.	49
Şekil 3.25 : 5000 mm/s hızla çarpma öncesi, üç boyutlu mikro-kafes yapısı ve rijit plaka.	50
Şekil 3.26 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, mikro-kafes yapısı ve rijit plaka.	50
Şekil 3.27 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.	51
Şekil 3.28 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.	51
Şekil 3.29 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.	52

Şekil 3.30 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.	52
Şekil 3.31 : Farklı kesit değerleri için, çekme etkisinde Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.	54
Şekil 3.32 : Farklı kesit değerleri için, basma etkisinde Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.	54
Şekil 3.33 : Farklı kesit değerleri için, çekme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrisi.	55
Şekil 3.34 : Farklı kesit değerleri için, basma analizi kuvvet-yer değiştirme eğrisi..	56
Şekil 3.35 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.1 mm kesit çapı için).	57
Şekil 3.36 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.3 mm kesit çapı için).	57
Şekil 3.37 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.5 mm kesit çapı için).	58
Şekil 3.38 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.1 mm kesit çapı için).	59
Şekil 3.39 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.3 mm kesit çapı için).	59
Şekil 3.40 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.5 mm kesit çapı için).	60



NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP BİR MİKRO-KAFES YAPININ TASARIMI VE ANALİZİ

ÖZET

Günümüzde, hızla ilerleyen teknolojinin çağımızdaki gelişmelere katkısı muazzamdır. Hemen her bilim dalı bu teknolojik gelişmelerden etkilenir. Mühendislik bilimi de tabii ki bu değişimden hem faydalanır hem de etkilenir. Artık hız kazanan gelişmelerle mühendisliğin uygulama alanları kat be kat artmış, çok farklı bilim dallarıyla birarada çalışmalar yapan, multidisipliner bir yaklaşım benimsenmiştir.

Yüksek mukavemet, dokuya uyum, hafiflik, darbe sönümlenme gibi özelliklerde üstün olan malzeme gruplarından biri gözenekli malzemelerdir. Bunlar da kendi içlerinde gruplara ayrılırlar.

Gözenekli malzemeleri; bal peteği yapılar, köpük malzemeler ve mikro-kafes yapılar olarak genel anlamda üç gruba ayırabiliriz.

Gösterdikleri çeşitli özelliklere göre de gözenekli malzemeleri sınıflandırmak mümkündür. Bu özelliklerden bir tanesi negatif Poisson oranıdır. Doğal ya da yapay birçok malzeme pozitif Poisson oranına sahiptir ve tasarım yapılırken bu özellik dikkate alınmaktadır. Fakat doğada çok az sayıdaki malzeme negatif Poisson oranına sahiptir. Bunun anlamı çekme ve basma kuvveti altında, kuvvetin uygulandığı doğrultuya dik eksenlerde sırasıyla genişleme ve daralma gerçekleşmesidir.

Bu çalışma kapsamında incelenecek malzeme türü olarak mikro-kafes yapılar ele alınmıştır. Negatif Poisson oranına sahip yeni bir mikro-kafes yapı tasarımı ve bununla ilgili analizler gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatürde pratikte imal edilmiş ya da teoride tasarlanmış mikro-kafes yapılar hangileridir, ne amaçla imal edilmiş ya da tasarlanmışlardır, bu mikro-kafes yapılardan beklenen özellikler nelerdir gibi sorulara yanıt bulmaya çalışılmıştır.

Literatür taramasından sonra, mikro-kafes yapının temelini oluşturacak plakanın tasarımına geçilmiştir. Öncelikli hedef negatif Poisson oranına sahip bir yapı elde etmektir. Bunun için birim hücre tasarımı mantığından ilerlenmiş, daha sonra birim hücrenin çoğaltılması yöntemiyle plaka yapı elde edilmiştir. Mikro bir yapı üzerine çalışıldığı için ölçüler buna uygun olarak verilmiş ve çekme kuvveti altında, kuvvetin uygulandığı doğrultuya dik olan eksenlerde dışa doğru bir açılma yakalayacak bir yapı tasarımı üzerine gidilmiştir.

Plaka yapı tasarımından sonra sıra üç boyutlu mikro-kafes yapı tasarımına gelmiştir. Burda da tıpkı plaka yapı tasarımında olduğu gibi, çekme kuvveti altında, kuvvetin uygulandığı doğrultuya dik olan eksenlerde dışa doğru bir açılma yakalayacak bir yapı tasarımı üzerine gidilmiştir.

İstenen üç boyutlu mikro-kafes yapı tasarımı da tamamlandıktan sonra, yapının Poisson oranı hesaplanmıştır. Amaçlandığı gibi, kafes yapının negatif Poisson oranına sahip olduğu gösterilmiştir.

Tasarım aşaması tamamlandıktan sonra ise, analiz aşamasına geçilmiştir. Tasarlanan üç boyutlu mikro-kafes yapı üzerinde bazı analizler yapılarak, yapının kabiliyeti ölçülmek istenmiştir.

İlk yapılan analiz çekme analizidir. Bu analiz sayesinde üç boyutlu mikro-kafes yapının nasıl bir deformasyona uğradığı tespit edildi ve buna bağlı olarak yapının hangi kısımlarında ne kadarlık bir gerilmenin olduğu belirlendi.

Daha sonra yapılan analiz ise basma analizidir. Bu analiz kapsamında da yapının gerilme-şekil değiştirme diyagramı oluşturulmuş ve basma kuvvetine karşı nasıl bir davranış sergilediği ve nasıl deforme olduğu irdelenmiştir. Aynı zamanda çekme ve basma analizlerinden çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve çekme davranışı ile basma davranışı arasındaki farklar ortaya konulmuştur.

Diğer yapılan yapısal analiz ise darbe analizidir. Darbe analizi ile tasarlanan üç boyutlu mikro-kafes yapının darbe sönmeme özelliği ölçülmek ve gerekiyorsa daha da iyileştirilmek istenmiştir. Darbe analizi esnasında, darbe etkisini yaratacak malzeme rijit bir plaka olarak seçilmiştir. Bu plakanın mikro-kafes yapıya çarpması sonucu oluşan deformasyon veri olarak elde edilmiştir. Darbe analizi, farklı hızlarda tekrar edilmiş, yapının farklı hızlara verdiği davranışlar karşılaştırılmalı olarak yorumlanmıştır.

DESIGN AND ANALYSIS OF A MICRO-LATTICE STRUCTURE WITH NEGATIVE POISSON' S RATIO

SUMMARY

Nowadays, it is enormous that the contribution of the rapidly advancing technology to the developments in our age. Almost every science is affected by these technological developments, engineering, of course, both benefits from these developments and is affected also. Now, the application areas of engineering have been increased so much more and multidisciplinary approaches have been adopted, which work together with many different branches of science.

The developments in this area require that the material to be produced and used on living being should conformance as much as possible to the region to be applied or used. For this reason, both the type and characteristics of the material to be used are important. However, how the material designed is also significant. It should be suitable for the tissue to be used and it should continue to fit in the long term. Material life should be as long as possible.

Another example is the aviation and defense industry. It is very important to use light materials in aviation and defense industry. In addition to this, high-strength and long-lasting materials are necessary in these industries. But this is not just about choosing the right material, for example, composite materials are used predominantly in the aerospace and defense industry, but unfortunately it is not enough for today. At the same time, with design of the material should be improved and it should become lighter when it is stronger. The material and its design should make easy in using, in other words, the assembly and disassembly processes should be quick and easy.

Given examples can be increased. There are many examples in today's world.

One of the group of materials that have some properties such as high strength, tissue adaptation, lightness, high impact damping and high energy absorption is porous materials. These are also divided into groups in themselves. In general, they have pores in the micro level and their porosity is higher compared to the materials that called normal. Therefore, these materials are distinguished thanks to lightness. On the other hand, due to the high surface/volume ratio, the impact damping and energy absorption capabilities are very good. Since many of the structure in the nature are also porous, they have a compatible tissue to the nature. It gets the edge over about living body.

Porous materials can be divided into groups, in general; honeycomb structures, foam materials and micro-lattice structures.

It is possible to categorize porous materials in their various properties. One of these properties is the negative Poisson's ratio. Many natural or artificial materials have a positive Poisson's ratio and it is considered when the structure is designed. But in

nature very few materials have a negative Poisson's ratio. It's mean that under the force of tensile or compression, the expansion or the contraction takes place in axes that are perpendicular to the direction in which force is applied.

In this study, micro-lattice structures are discussed as material type to be investigated. A new micro-lattice structure has been designed with negative Poisson's ratio and related analyzes have been made.

Firstly, a comprehensive literature search has been done. In the literature, micro-lattice structures, which are fabricated or theoretically designed, have been investigated and tried to find answers to questions such as what purpose is designed or fabricated and what properties are expected from these micro-lattice structures.

After the literature review, the plate structure design that compose the micro-lattice structure has been started. The primary goal is to obtain a structure with a negative Poisson's ratio. For this reason, previously, the unit cell has been designed and then the plate structure has been obtained by multiplying the unit cell. As a microstructure has been studied, the dimensions have been given accordingly and the structure has been designed to obtain outward opening in the axis that is perpendicular to the direction in which the force is applied under a tensile force.

The plate structure design has been followed by micro-lattice design. As in the plate structure design, under a tensile force, a structure has been designed to obtain an outward opening in the axes that are perpendicular to the direction in which the force has been applied.

After the desired three-dimensional micro-lattice structure design has been completed, the Poisson's ratio of this structure is calculated. As intended, the lattice structure has been shown to have a negative Poisson's ratio.

Afterwards, the design phase has been completed, the analysis phase has been passed. It is desired to define the ability of the structure by making some analyzes on the designed three-dimensional micro-lattice structure. In this way, it can be determined which areas will be more suitable for using of the structure and what issues should be improved in future work.

The firstly analysis is the tensile analysis. Through this analysis, it has been determined how the three-dimensional micro-lattice structure has been deformed and it has been determined sections stresses of the structure.

Then, the press analysis has been done. Through this analysis, the stress strain diagram has been obtained and so it has been determined that the reaction of the micro-lattice structure to the press analysis. Also, tensile and press analyzes' results have been compared.

Another structural analysis is the impact analysis. It is desired to define and if necessary improve the impact damping property of the three-dimensional micro-lattice structure designed by impact analysis. During the impact analysis, the material to obtain the impact effect has been determined as a rigid plate. The deformation datas have been obtained from impact between micro-lattice and rigid plate. Impact analysis has been done with different initial velocities. Then, all results have been compared with each other.

Through this thesis, it is primary targeted that a micro-lattice structure with a negative Poisson's ratio is designed. The analyzes done and the results obtained

show that the generated three-dimensional micro-lattice structure has a negative Poisson's ratio. Therefore, the thesis has reached its primary goal.

In addition to the property of having a negative Poisson's ratio, it is desirable that the impact absorbing effect is higher and the micro-lattice structures have widely usage area and use potential.

The impact damping ability of the micro-lattice structure designed is determined by the analyzes done. In future study, the goal may be to make improvements in this ability.

Improving the negative Poisson's ratio value of the micro-lattice structure can also be considered in future studies.





1 . GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde her alanda inovasyonla beraber değişim/gelişim büyük önem kazanmış ve bu da beraberinde yeni ürünlerin, yeni sistemlerin, yeni malzemelerin vs. oluşmasına zemin hazırlamıştır. Yenilikler ivme kazanırken, altyapı olarak farklı alanlardan ve çoğu kez de bizzat doğanın kendisinden esinlenilmiş, bu zengin altyapı ile daha önce elde edilemeyen kimi üstün özellikler ortaya çıkarılmış ve bu durum insanlara çok farklı alanlarda kolaylık sağlamıştır.

Malzeme yapısı anlamında sağlanan yeniliklerden biri de gözenekli yapıya sahip malzemelerin keşfi ve imalatıdır. Gözenekli malzeme, malzeme içerisinde gözeneklerin, farklı büyüklük ve boyutlarda, heterojen veya homojen olarak dağıldığı, doğal veya yapay katı malzemelerdir (Evans ve diğ, 1998). Önceleri polimer malzemelerde bu yapı kullanılmaya başlanmış ve daha sonraları metal malzemelerde bu tarz bir yapının nasıl sonuç vereceği merak edilmiştir. Böylece 1940' lı yıllarda başlayan araştırmalar metal malzemelere de sıçramıştır. Henüz gözenekli metallerin -ABD, Almanya, Japonya gibi gelişmiş ülkeler hariç- tam anlamıyla yaygınlaştığı söylenemez ve ticari ürün sınıfına da girmemişlerdir. Fakat gözenekli yapıya sahip metallerin mekanik, ısı, elektriksel ve akustik özelliklerindeki avantajlar, bu malzemelerin incelenmesini ve mümkün olduğu düzeyde üretime dahil edilmesini elzem kılmaktadır. Bu önemli avantajlarının yanı sıra, diğer malzemelere göre oldukça düşük yoğunluğa sahip olmaları belki de ilk söylenmesi gereken en önemli özelliğidir.

Kısacası gözenekli yapılar ve özeld gözenekli metaller, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım özelliği sayesinde birçok alana hizmet verebilecek malzemelerdir. Dünya ve ülke piyasasına baktığımızda; otomotiv, inşaat, havacılık, biyomalzeme gibi ekonomik ve hizmet yönünden belirleyici sektörlerde kullanımlarının artması büyük

avantajları da beraberinde getirecektir. Özellikle havacılık ve uzay alanında, düşük yoğunlukla beraber ağırlıktaki azalma sürekli ilgilenilen bir husustur (Ogan, 2008).

1.2 Gözenekli Katı Malzemeler

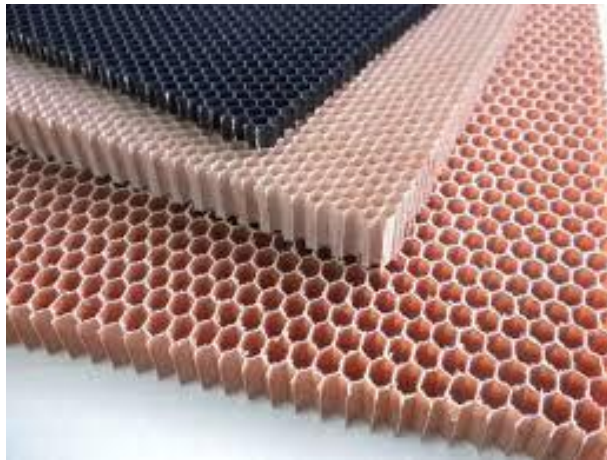
İçerisinde bulunan boşluklar sayesinde yoğunlukları ve dolayısıyla ağırlıkları düşük olmasına karşın yüksek mukavemet gösteren, yüksek düzeyde enerji emilim özelliği bulunan malzemeler gözenekli katı malzemeler olarak adlandırılabilir.

Polimer ve metalden üretilebilen gözenekli yapay malzemeler olduğu gibi doğada bu tip malzemelere örnek verilebilecek çok sayıda oluşum da vardır. İncelenecek olursak; ağaç (ahşap/tahta), yaprak, hayvan kemiği, bitki sapı gibi yapılar gözeneklidir (Nakajima, 2013).

Gözenekli katı malzemeleri pekçok unsura göre sınıflandırılabilir. Bu çalışma kapsamında gözenek tipine, diğer bir deyişle hücre tipine/biçimine göre sınıflandırma yapılmıştır.

1.2.1 Bal peteği (honeycomb) yapılar

İnsan yapımı olan ve en çok bilinen gözenekli malzemelerden birisi bal peteği yapılarıdır (honeycomb). Basit düzeyde hafif ağırlıklı yapısal elemanlar olarak kullanılan bal peteği tipinde malzemeler, birbirine paralel prizmatik hücrelerden yapılırlar (Kırca, 2006). Örnek bal peteği yapısı Şekil 1.1' de görülebilir. Bunlar düzenli yapıya sahiptirler ve simetrik bir dağılım gösterirler. Bu sebeple imal edilmeleri, simetrik olmayan yapıya sahip malzemelere nazaran daha kolaydır.

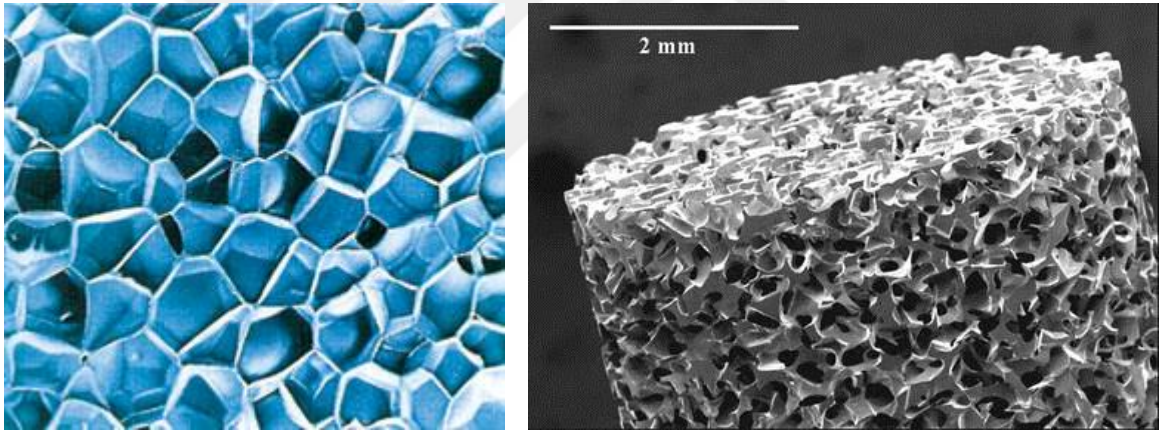


Şekil 1.1 : Bal peteği (honeycomb) yapılar.

1.2.2 Köpük yapılı malzemeler

Bilinen bir diğer gözenekli malzeme türü de köpük yapılı malzemelerdir. Bunlar rastgele dağılım gösterirler ve asimetrik yapılanmışlardır. Günümüzde köpük malzemenin iç yapısına bağlı olmak üzere çok çeşitli alanlarda kullanılabilirler. Özellikle enerji sönümlene yetenekleri bu malzeme türünü çekici hale getirmiştir. Örneğin; akustik etkisine baktığımızda, belirgin olarak düşük maliyetlere sahip çeşitli organik malzemelerle yarışacak durumdadır. Plastik tabanlı köpük yapıların otomobil üretiminde sayısız uygulamaları vardır (Ogan, 2008). Şekil 1.2' de plastik tabanlı ve metal köpük malzeme yapılarına yer verilmiştir. Düşük yoğunluk, düşük ergime sıcaklığı ve üstün mekanik özellikleri sebebi ile alüminyum günümüzde en çok kullanılan köpük metal yapı malzemesidir (Şimşek, 2008).

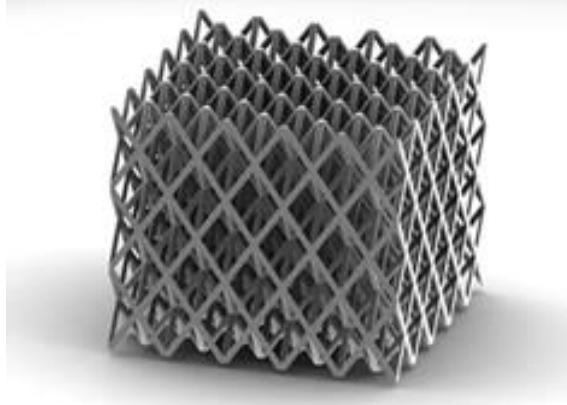
Bununla beraber üretim maliyeti henüz ticarileşme için uygun değildir. Gelecekte imalat teknolojilerindeki gelişmeyi takiben köpük yapılı malzemelerle daha fazla alanda karşılaşılacağı muhakkaktır.



Şekil 1.2 : Polistren köpük malzeme (solda) ve metal köpük malzeme (sağda) yapıları.

1.2.3 Mikro-kafes yapılar

Hafif ve dayanıklı malzemelere duyulan ihtiyaçla beraber ortaya çıkan yapılardan biri de mikro-kafes yapılardır. Bir kafes malzeme, onun mikroskobik parçacıklarından çok daha büyük makroskobik hacme sahip bir yapıdır (Gümrük, 2012). Bu yapılar, sıralı bir düzen içerebildiği gibi rastgele dağılım da gösterebilirler. Diğer bir deyişle hem simetrik hem de asimetrik olarak yapılandırılabilirler. Aynı yapı içerisinde simetrik ve asimetrik dağılım birarada da bulunabilir. Örnek bir mikro-kafes malzeme yapısı Şekil 1.3' te gösterildiği gibidir.



Şekil 1.3 : Mikro-kafes yapı örneği.

Kafes yapı hücrelerinin biçimi ve konumlanması, malzeme yapısının özelliklerini ciddi şekilde etkiler. Bu özelliklere göre de hangi kullanım alanına daha uygun olacağı belirlenir.

Bu çalışma kapsamında, gözenekli malzemeler grubundan mikro-kafes yapılar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmanın devamında mikro-kafes yapıların geçmişi, sınıflandırılması, kullanım alanları, imalat yöntemleri, özellikleri ve gelecekteki yeri ele alınmış; bu bilgiler ışığında yeni bir mikro-kafes yapı tasarımı üzerine çalışılmış, SEY analizleri ile belirli sonuçlar elde edilip yorumlanmıştır.

1.3 Çalışma Planı

Bu çalışma kapsamında gözenekli metallere, mikro-kafes yapıya sahip olanlar ele alınmıştır. Böylece çalışma kapsamı daraltılmış ve özelleştirilmiştir. Çalışmanın gidişatı şu şekildedir:

Öncelikle, çalışmanın yoğunlaştığı mikro-kafes yapılar detaylıca incelenmiştir. Mikro-kafes yapıların başlıca özelliklerinden, nasıl ve ne zaman ortaya çıktıklarına, kullanım alanlarından, hangi çeşit mikro-kafes yapıların varlığına kadar kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Kullanımlarının yaygınlaşması için önemli bir konu olan, mikro-kafes yapıların imalat yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bu imalat yöntemleriyle elde edilebilecek özellikler nelerdir, imalat yöntemlerinin bilhassa mekanik özelliklere katkısı nedir, bunlar sorgulanmış ve kaleme alınmıştır. Literatürde halihazırda olan örnekler incelenmiş ve mikro-kafes yapıların gelecekte insan hayatında nasıl bir rol oynayacağı, hangi alanlarda ne gibi kolaylıklar sağlayacağı üzerinde durulmuştur.

Son olarak, yeni bir mikro-kafes yapı tasarımı ve analizi üzerine yoğunlaşmıştır. Yeni yapılan tasarımdan beklenen özellikler ve bu tasarımın neden gerçekleştirilmek istendiği belirtilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler detaylıca anlatılıp sonuçları açıklanmıştır. Sonuçlar üzerinden yapılan değerlendirmeler paylaşılıp çalışma noktalanmıştır.



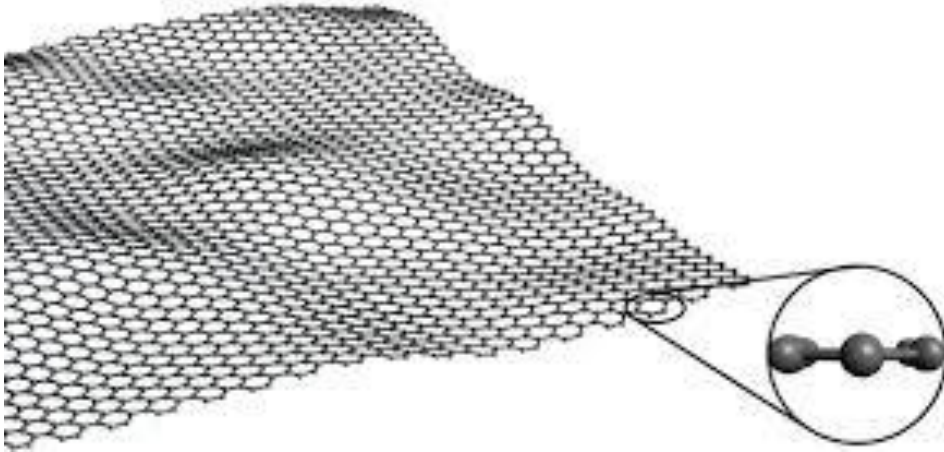


2 . MİKRO - KAFES YAPILAR VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Mikro-Kafes Yapı Nedir?

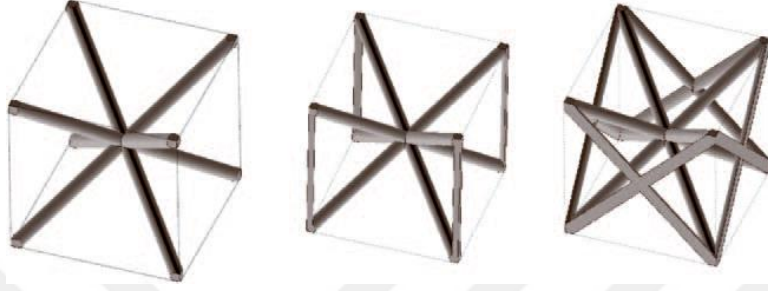
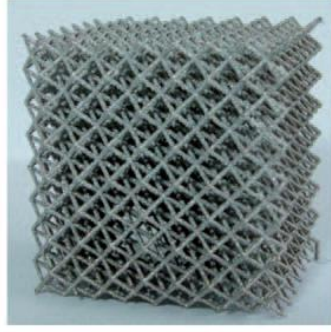
Kafes yapılar iç boşlukları toplam hacimlerine göre oldukça fazla alan kaplayan, bu özellikleriyle de ağırlık yönünden avantaj sağlayan mikro düzeydeki hücresel yapılardır. Diğer hücresel yapılardan farkı, boşluklar ve aralarındaki bağlantıların kafes biçimini andırarak şekilde yapılanmalarındadır.

Mikro-kafes yapılar iki boyutlu ve üç boyutlu olarak ele alınabilir. Başka bir deyişle düzlemsel ve uzaysal olarak konumlanan mikro-kafes yapılar vardır. Düzlemsel olarak konumlanan yapılarda, iki boyutlu birim hücreler aksenel yönde çoğalarak bu yapıyı oluştururlar. Şekil 2.1’ de iki boyutlu örnek bir mikro-kafes yapı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : İki boyutlu mikro-kafes yapı örneği.

Uzaysal olarak konumlanan yapılarda ise, üç boyutlu birim hücreler çoğalarak yapıyı oluşturur. Birim hücrenin varlığı ana unsurdur ve mikro-kafes yapının birçok özelliği bu ana unsura bağlıdır. Şekil 2.2’ de çeşitli birim hücre yapılarıyla beraber üç boyutlu bir mikro-kafes yapı görülmektedir. Üç boyutlu yapılar farklı üretim yöntemleriyle imal edilebilmektedirler. İki boyutlu yapılar ise pratikte bir boyutu diğer iki boyutuna göre ihmal edilebilecek düzeyde olan yapılardır ve bu şekilde kullanılırlar.



Şekil 2.2 : Tipik bir kafes yapı görünümü ve çeşitli birim hücre yapıları. (Cantwell ve diğ, 2011).

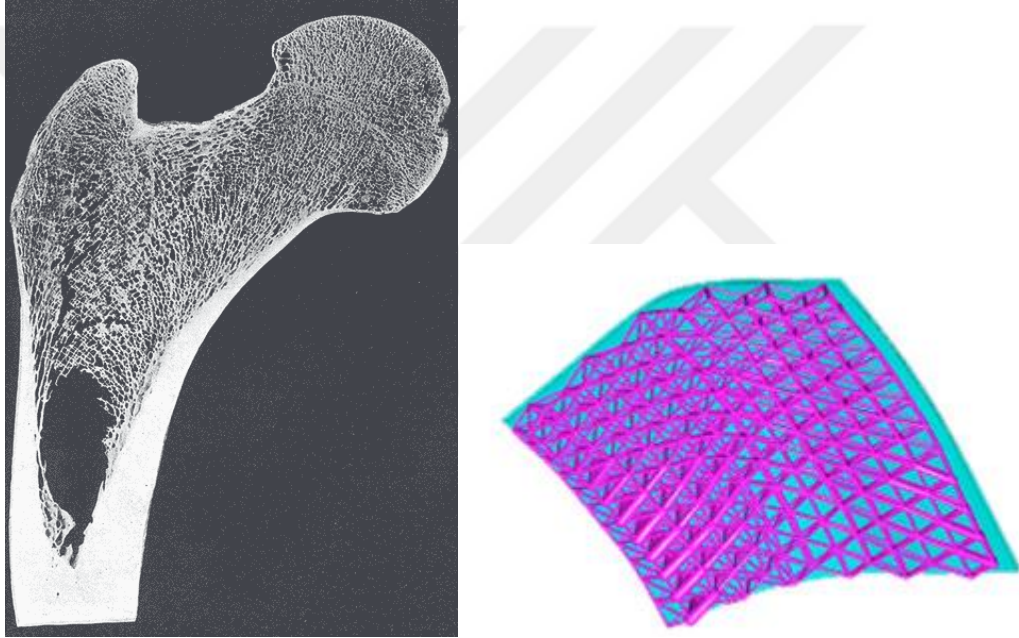
2.2 Mikro-Kafes Yapıların Ortaya Çıkışı ve Ortaya Çıkış Amacı

Tarih boyunca, ilerleme ve yeniliklerin keşfi her zaman insan ihtiyaçları doğrultusunda şekil bulmuş ve sonuca ulaşmıştır. Günümüzde teknolojinin bu kadar hızla ilerlemesi bahsedilen süreci daha da kolaylaştırmıştır. Geçmişe dönüp baktığımızda genelde gözenekli yapıya sahip malzemelerin özelde de mikro-kafes yapıların gelişim sürecini ihtiyaçlar doğrultusunda analiz edebiliriz.

Her şeyden önce bilim her zaman doğadan ilham almış, beslenmiştir. Doğada ise konu dahilindeki yapılara esin kaynağı olacak çok fazla oluşum vardır. Örnek verilecek olursa, kemiğin iç yapısı. Kemiğin mukavemeti yüksek olmak zorundadır, çünkü vücudu taşıyan başlıca yapıdır. Tam da aynı sebepten ötürü hafif olmak zorundadır ki vücuda fazladan ağırlık oluşturmaz. İncelendiğinde, kemiğin gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve gerekli özelliklerinin de bu yapıdan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Böylece mukavim ve hafif bir malzeme için, malzeme yapısının nasıl olması gerektiği konusunda aydınlatıcı bilgi elde edilmiştir.

Günümüzde ağırlıktan kazanç, bir malzeme için çok önemli bir konudur. Böylece enerjiden tasarruf edilir, malzeme ömrü uzar, imal yöntemleri görece kolaylaşır ve az malzeme kullanımı sebebiyle maddi kazanç elde edilir. Yüksek dayanım ise, özellikle bazı alanlardaki kullanımlar için olmazsa olmazdır. İnşaat, makine,

havacılık gibi sanayi kolları bu duruma koşulsuz örnek teşkil ederler. Yine son zamanlarda gelişim gösteren biyomalzemeler için de dayanım oldukça önemli bir husustur. Bunların dışında, ısı ve akustik yalıtım, modern zamanlar için her koşulda ve her alanda uygulanan öncelikli konulardır. Otomotiv, makine ve inşaat alanlarında çok sayıda kritik uygulamaları vardır ve gittikçe de önemi artmaktadır. Gözenekli yapı tasarımları bu ihtiyaçlara cevap verebilmek adına ortaya çıkmıştır. Optimize sonuçlar elde edebilmek için uygulanan tasarımlardan biri de mikro-kafes yapılarıdır. Kemik yapısı örneğine dönülürse, Şekil 2.3' teki örnekte olduğu gibi mikro-kafes yapı tasarımıyla gerçeğe en yakın ve en uygun özellikleri içeren yapay bir kemik tasarımı oluşturulabilir.



Şekil 2.3 : Üst femur kemiği kesiti (solda) ve tasarım gerekliliklerine göre optimize edilmiş kafes yapı (sağda) (Wang, 2005).

Kafes yapıların köpük malzemelere göre ana avantajı, üretim esnasında hücre topolojisinin kontrol edilebilmesi ve bunun sonucunda çalışma şartlarına daha uyumlu malzemelerin elde edilebilmesidir. Hücre topolojisinin kontrol edilebilmesi onları biyomedikal, uçak ve otomotiv sektörü gibi pek çok uygulama alanında en güçlü aday yapmaktadır (Ashby ve Gibson, 1997). Köpükler gibi stokastik malzemeler mükemmel termal ve akustik özelliklere sahipken, bal peteği ve kafes yapılar gibi periyodik hücreli malzemeler, enerji sönmeme, mukavemet ve rijitlik gibi süper mekanik özellikler sahiptir (Ashby ve Gibson, 1997). 1940' lı yıllarda

başlayan araştırmalar neticesinde günümüzde mikro-kafes yapıların uygulandığı veya uygulanma potansiyeli olan çok sayıda kullanım alanı vardır.

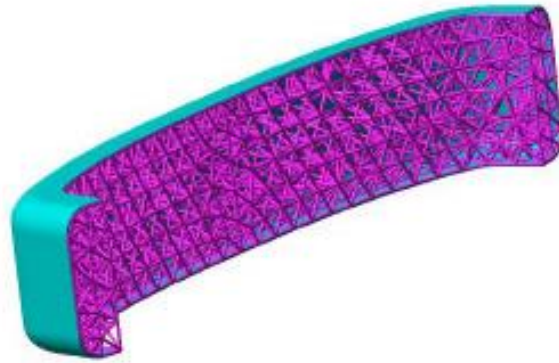
2.3 Mikro-Kafes Yapıların Kullanım Alanları

2.3.1 Endüstriyel ürünler

Ağırlıktan kazanç, hemen tüm endüstriyel üründe arzu edilen bir durumdur ve çoğu çalışma bu hedef doğrultusunda ilerler. İmalat sektörü için, özellikle de makine ve otomotiv imalatı açısından, ağırlıktan kazanılan her gram aynı zamanda maliyette düşüşü getirir. Dayanımları yüksek ürünler elde etmek ise asla taviz verilmeyecek, ürün kalitesini belirleyen başlıca unsurlardan bir tanesidir.

Bu iki kritik yönü ele aldığımızda, mikro-kafes yapıları, endüstriyel ürünlerin imalatında kullanmak ve ürün tasarımlarını buna uygun şekilde yapmak terazinin kalite kefesini yükseltirken, maliyet kefesini ise düşürecektir. Tabii bu hususta imal yöntemleri ve kullanılan malzemenin türü de çok önemlidir. Çünkü seri imalatta kullanılmayacak bir üretim yöntemi ya da yüksek birim fiyatlı bir malzemenin kullanımı söz konusu ise bahsi geçen kalite-maliyet hedefi gerçekleşmeyecektir.

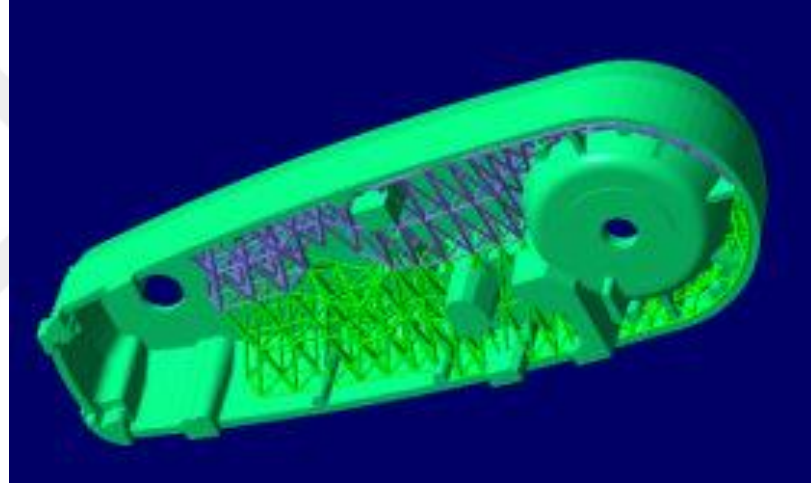
Örnek olarak otomotiv sanayini ele alalım. Otomotiv parçaları imalatında, parçalar ne kadar hafif olursa otomotiv de o kadar düşük ağırlığa sahip olur. Metal ya da polimerden üretilen uygun tasarıma sahip mikro-kafes yapılar hem yüksek performans sergiler hem de ağırlığın düşmesini sağlar. Bu da malzeme tasarrufu anlamına gelir. Şekil 2.4' te otomobil tamponu için olası bir mikro-kafes yapı tasarımı örneği verilmiştir.



Şekil 2.4 : Otomobil tamponu için uygulama örneği (Wang, 2005).

Henry Ford' un 1923 yılında söylediği Şu söz konunun önemini daha iyi anlatmaktadır: "Taşıtların ağırlıklarındaki bir miktar azalma, onların daha hızlı gitmesi ve daha az yakıt tüketmesi demektir. Ağırlık azalması malzeme azalmasıdır, bu da dolayısıyla maliyet azalması demektir." (Wang, 2005, s.21). Kullanılan enerjinin azalması, geniş kapsamlı bakıldığında karbon emisyonunun düşmesi ve dolayısıyla çevre kirliliğinin kontrol altına alınmasına katkı demektir.

Bir başka örnek olarak da modüler robot kol verilebilir. Robotik sistemler imalatta birçok farklı alanda kullanılmaktadırlar. Montaj, kaynak, boyama, malzeme aktarımı ve çeşitli işleme prosesleri bunlara örnek olarak verilebilir (Wang, 2005). Şekil 2.5' teki örnekte olduğu gibi, kafes yapı tasarımları ile oldukça hafif ama bir o kadar da dayanıklı robot kollar elde edilebilir.



Şekil 2.5 : Robot kol için uygulama örneği (Wang, 2005).

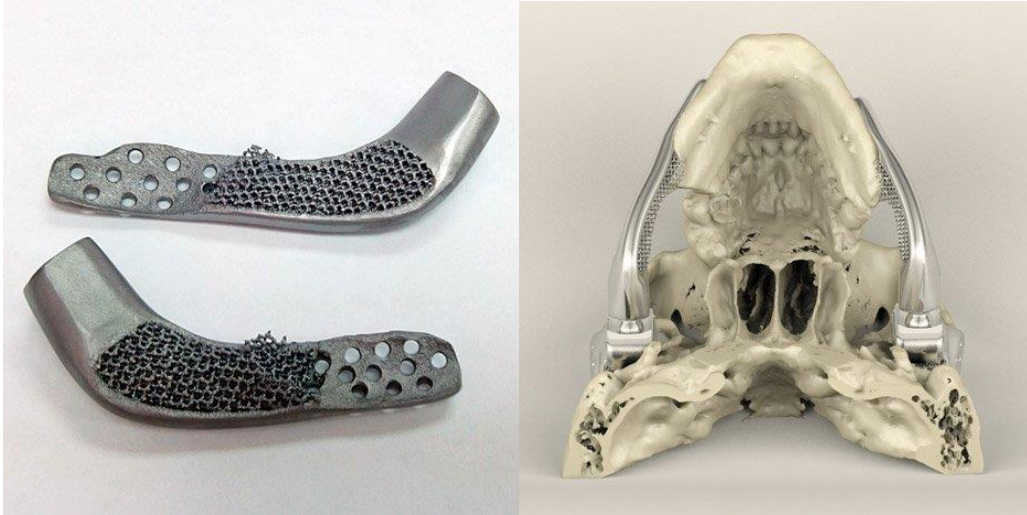
2.3.2 Biyomalzemeler

Son dönemde revaçta olan, gittikçe önemini arttıran ve daha da arttıracığa benzeyen bilim dallarından biri de biyomekaniktir. Teknolojinin ilerlemesi ile insanların sağlık alanındaki ihtiyaçlarının karşılanma Őansı artmış ve bu doğrultuda çalışmalara hız verilmiştir. İmplant ve protezler bahsi geçen çalışmaların başlıcalarıdır. Vücuda optimum düzeyde uyum sağlayacak, getirdiği faydanın yanında hiçbir zararı olmayacak, uzun ömürlü ve sağlığa zarar vermeyecek malzemelerin kullanıldığı implant ve protezlerin imalatı önem arz etmektedir.

Öncelikle, üzerinde durulması gereken konu, biyomalzemenin gerekli fonksiyonu yerine getirebilmesidir. Bununla beraber işlevselliğini uzun süre -mümkünse ömür boyu- koruması gerekmektedir. Dolayısıyla, kullanılan malzemenin sağlamlığı

önemlidir. Hafif olması ise kritiktir, çünkü vücuda olması gerekenden daha fazla bir ağırlık yüklemesi, sağlam olan yapıların ya da organların bozulmasına veya zarar görmesine sebep olabilir. Kimi durumlarda, biyomalzemelerin esnek yapıya sahip olması ve bulunduğu duruma adapte olabilmesi önem taşır. Örneğin; eklem protezlerinde kaskatı bir yapının kullanımı düşünülemez. Eklem hareketine adapte olacak ve ona uygun hareket edecek bir tasarımın varolması gerekir. Bir başka aranan özellik de geçirgenliktir. Kullanım bölgesine ve fonksiyonuna göre vücut sıvılarının ya da hücrelerin, biyomalzemenin arasından geçmesi gerekebilir. Bu gibi durumlarda gözenekli yapı avantaj sağlamaktadır. Doku mühendisliğinde, iskele yapı olarak birbirine bağlı gözenekli malzemeler kullanılır ve bunlar yüksek boşluk hacmi, yüzey-hacim oranı ve yeniden ayarlanabilir olmaları ile çift yönlü hücre geçişine izin verirler (Wang, 2005).

Tüm bu hususlar birleştiğinde mikro-kafes yapıların, biyomalzeme üretiminde kullanılması isabetlidir. Şekil 2.6' da implant üzerinden bir örnek verilmiştir. Aranan yüksek dayanım ve düşük ağırlık ile adaptasyon yeteneği kafes yapıların özelliklerine oldukça uygundur. Farklı malzeme kullanımının imalat açısından bir sorun teşkil etmemesi de kullanılan biyomalzeme çeşidinin yelpazesini genişletir ve bahsettiğimiz örnekler dışındaki kullanımlara da imkan sağlar.



Şekil 2.6 : Mikro-kafes yapıya sahip implant (solda) ve çene monte edilmiş hali (sağda).

2.3.3 Havacılık

Nüfus artışı, ticaretin gelişimi ve insanlar arasındaki iletişimin çoğalmasıyla ulaşım önceki yıllara kıyasla çok daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Bunu, sadece bir

yerden başka bir yere ulaşmak anlamında düşünmemek gerekir. Zaman faktörü bu konuda en belirleyici noktadır ve hızlı olan ulaşım önem kazanır. Bu açıdan havacılık sektörü hem insan hem eşya taşınması konusunda epey yol katetmiştir ve artan arz dikkate alınacak olursa, bir o kadar daha yol katetmesi gerekecektir.

Havacılıkta, verimi artırmak için çalışmalar yapılmaktadır. NASA' nın yaptığı çalışmalardan biri, örnek olarak Şekil 2.7' de verilmiştir. Günümüzde kullanılan uçak kanatları, uçağın inişini-kalkışını sağlayan, dönmesine ve yükselip alçalmasına olanak veren, hareket edebilir plakalardan oluşmuştur (Weiss, 2003). NASA' nın kuşların uçuş hareketinden ilham alarak yaptığı tasarım Şekil 2.7' deki gibidir.

Verim artışı öncelikli olarak yakıt masrafını azaltarak gerçekleştirilebilir. Çok yüksek olan taşıt ağırlığı düşürülebildiği takdirde, yakıt masrafı da doğru orantılı olarak azalacaktır. Bu sebeple kullanılan metal ya da metal dışı aksamaların hafif olması çok önemlidir. Dolayısıyla kafes yapı sistemleri kullanımının, bu aksamaların tasarlanmasına katkısı büyüktür. Diğer taraftan, kafes yapı tasarımlarının malzeme tasarrufu sağlamalarından dolayı, taşıt maliyetleri de düşecek ve bu da üretim aşamasında büyük katkı sağlayacaktır.

Son zamanlardaki çalışmalarla, var olan tasarımları iyileştirmeye yönelik denemeler devam etmektedir. Mukavemeti arttırıp ağırlığı azaltan ve bununla beraber istenen fonksiyonu çok daha iyi şartlarda yerine getirecek mikro-kafes yapı tasarımları bu çalışmaların başında gelmektedir.

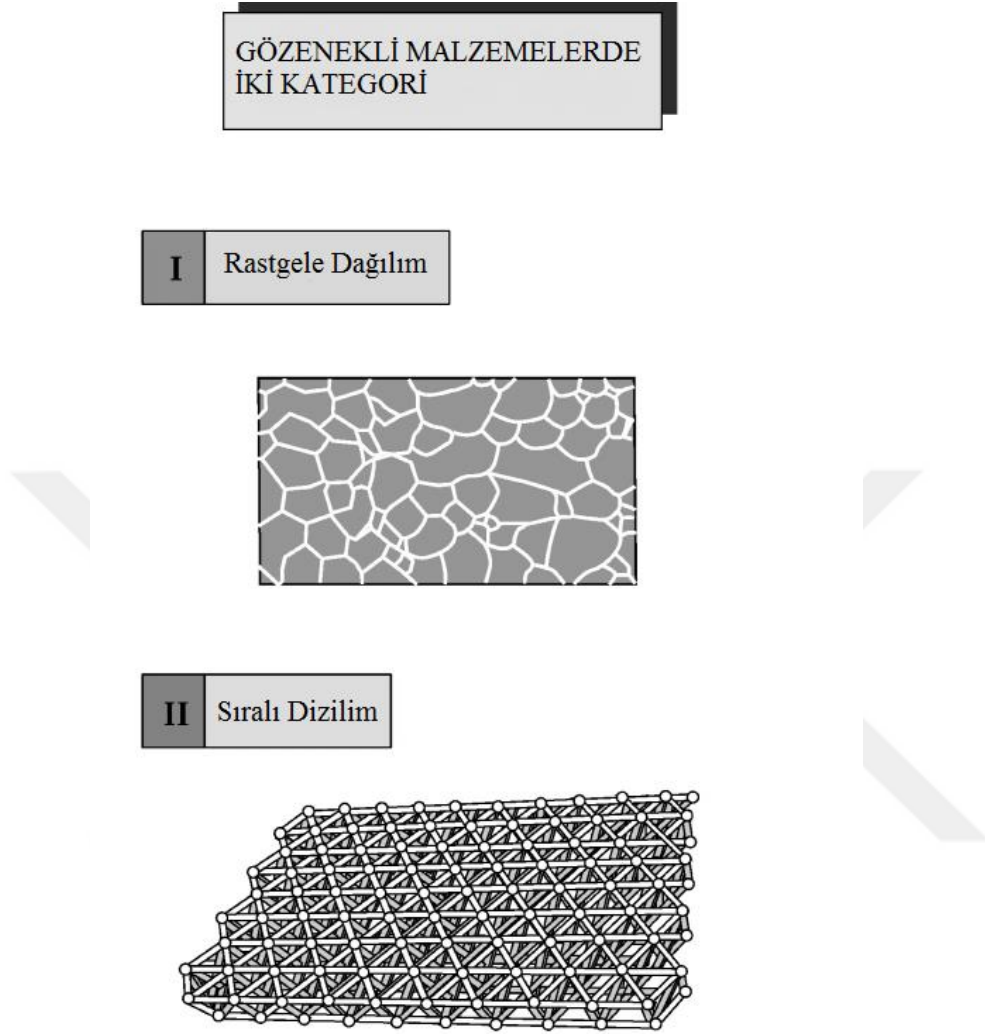


Şekil 2.7 : NASA' nın üzerinde çalıştığı uçak kanatı tasarımı (Weiss, 2003).

2.4 Mikro-Kafes Yapıların Sınıflandırılması

Mikro-kafes yapıları tek bir açıdan sınıflandırmak olası değildir. Birçok yönden ele alınıp irdelenebilirler. Bu çalışmada geometrik açıdan sınıflandırma yapılmıştır.

Şekil 2.8' de görüldüğü gibi geometrik sınıflandırma baskın olarak iki gruba ayrılabilir.



Şekil 2.8 : Gözenekli malzemelerde baskın olan iki topoloji (Ashby ve diğ, 2001).

Bununla birlikte, gerek fonksiyonellik açısından, gerek imal usulü açısından, gerek kullanım alanları açısından, gerekse doğal ya da yapay malzeme olup olmama açısından sınıflandırma yapmak da mümkündür. Örnek olarak; yapı tasarımında mı yoksa termal iletim/yalıtım konusunda mı fonksiyonellik barındırdığına dair bir sınıflandırma yapmak mümkündür. Başka bir örnek olarak da; havacılıkta mı yoksa otomotiv sanayisinde mi kullanılabileceği üzerinden bir sınıflandırma yapılabilir. Fonksiyonellik, imal usulü veya kullanım alanı açısından değerlendirilecek olursa, mikro-kafes yapılar dışındaki gözenekli malzemeleri de ele almak suretiyle sınıflandırma yapmak daha doğru olur. Bu şekilde birbirleri arasında kıyas yaparak daha geniş bir bakış açısına sahip olunabilir.

Bir sınıflandırma türünü başka bir sınıflandırma türü ile ele almak da mümkündür. Örnek verilecek olursa; geometrik sınıfla malzeme kaynağı birarada değerlendirilebilir: Doğal gözenekli malzemeler, tasarlanmış gözenekli malzemelere göre geometrik olarak daha çok değişkenlik gösterirler (Wang, 2005).

Mikro-kafes yapılarda genel olarak, tasarımın öncelikli ilgisi yapısal topoloji üzerinedir, çünkü topoloji yapının mekanik özelliklerini kontrol altına almada belirgin bir rol oynar (Fang ve diğ, 2009). Topoloji ise, arzu edilen gözenekliliğin boyutu ve ölçeği, biçimi ve miktarı, malzemenin gerek duyulan toplam iç yüzey alanı ile ilişkilidir (Ashraf ve diğ, 2016). Bu çalışmada da üzerinde durulan ve ayrıntılı incelenmek istenen malzeme, mikro-kafes yapılar olduğu için geometrik sınıflandırma baz alınmıştır.

Mikro-kafes yapılar, geometrik olarak temelde iki sınıfa ayrılır: Rastgele dağılım gösterenler ve sıralı dizilime sahip olanlar. Bu ikisinin karışımı da teoride mümkün olmakla beraber pratikte pek kullanılmadığı için bu çalışma kapsamındaki sınıflandırmaya dahil edilmemiştir.

2.4.1 Rastgele dağılım gösteren mikro-kafes yapılar

Rastgele dağılım gösteren mikro-kafes yapılarda, hücre yapıyı oluşturan ve hücreler arası bağlantı kuran elemanların dağılımı homojen değildir. Yani belli bir sıra ve düzen takibi yoktur. Belli bir periyoda sahip olmadıkları için tasarımı görece daha zordur. Gözeneklilikteki öngörülemez hali hesaplamalarda sapmalara sebep olabilir ve bu da istenen sonuca ulaşamamaya neden olur. Ancak belli bir hassasiyet içerisinde kalınarak yapılan tasarımlarda gerçeğe yakın sonuç verirler. Bu sebeple, mikro-kafes yapı tasarımlarında, periyodik sıralanmış olan tasarımlara nazaran daha az kullanılırlar.

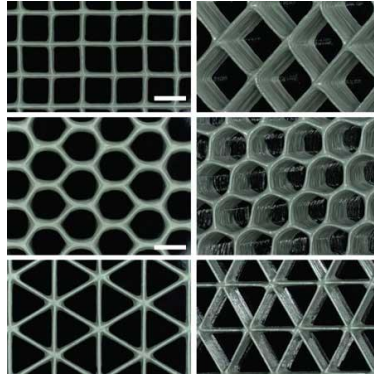
Bununla beraber, adaptif kafes malzemelerde, rastgele dağılım gösteren yapı bulunur ve kimi özel tasarımlarda bu yapı kullanılır. Adaptif kafes malzemeler, parça geometrisinin biçimini alan ve bağlantı elemanları tasarım gerekliliklerine adapte olabilen yapılardır (Wang, 2005). Fakat bu daha çok makro parça tasarımlarında kullanılmaktadır. Şekil 2.9' da buna bir örnek gösterilmiştir. Adaptif kafes malzemeler özellikle biyomekanik alanında oldukça geniş kullanım alanı potansiyeline sahiptirler. Bu yapılar üzerine çalışmalar arttıkça ve çalışmalara katkı veren yazılımlar geliştikçe bu potansiyel hayata geçirilecektir.



Şekil 2.9 : Adaptif kafes yapı tasarımına bir örnek.

2.4.2 Sıralı dizilime sahip olan mikro-kafes yapılar

Mikro-kafes tasarımlarının büyük çoğunluğu sıralı dizilime sahip, diğer bir deyişle periyodik olan yapılardır. Belli bir düzene sahiptirler ve tekrar edilebilirler. Bu özellik sayesinde hem tasarım aşaması kolaylaşır hem de analiz ya da hesaplama safhasında gerçeğe daha yakın sonuç elde edilir. Dolayısıyla, öngörülemezlik düzeyleri, rastgele dağılım gösterenlere göre oldukça düşüktür. Hesaplarda daha güvenilir sonuç vermeleri neticesinde, mekanik özellikleri daha iyi tanımlanır ve zorlu tasarımlarda yüksek mekanik özellikleri sayesinde daha çok tercih edilirler. Şekil 2.10' da buna bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Sıralı dizilime sahip mikro-kafes yapı tasarım örnekleri.

Birçok tasarımda sıralı dizilime sahip mikro-kafes yapılar, bahsi geçen özelliklerinden dolayı tercih edilirler. Çünkü periyodik gözenekli malzemeler, kafes yapılar gibi, tasarımcılara malzemenin dağılımı için daha iyi bir imkan verirler (Wang, 2005).

Bu çalışma kapsamında, hedeflenen tasarım da sıralı dizilime sahip yani periyodik mikro-kafes yapısıdır.

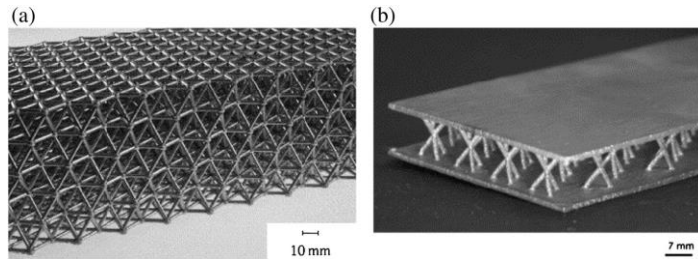
2.5 Mikro-Kafes Yapıların İmalat Yöntemleri

2.5.1 Döküm

Makro boyuttaki malzemelerde olduğu gibi mikro boyutlu kafes yapı sistemlerinde de, döküm kullanılan yöntemlerden biridir. Metallerde hassas dökümü ele alacak olursak, polimerden üretilmiş bir kalıp, özel bir sıvı ile kaplanır ve yine özel parametrelili fırınlarda çamurumsu sıvının kalıbın üzerinde kuruması sağlanır. Kalıbı oluşturan polimer ise eritme ya da buharlaştırma yöntemi ile parçadan uzaklaştırılır. Daha sonra kalıbın içi ergimiş metal ile doldurulur.

Uygulama olarak görece basit bir yöntemdir. Hızlı prototipleme yöntemindeki gelişmelerle birlikte polimer kalıp imalat prosesi de otomatize hale gelmiştir (Smith, 2012). Böylece uygulama daha da basitleşmiştir, fakat yine de zaman alıcıdır ve maliyeti de diğer yöntemlere nazaran düşük değildir. Öte yandan, mikro-kafes yapının tasarımında bir değişiklik olduğunda, yeni kalıp imalatı ek maliyet demektir (Dharmasena ve diğ, 2003).

Çok sayıda düğüm noktasına sahip, düzlemsel olmayan karmaşık biçimli kafes yapıların, bu yöntem ile üretimi mümkündür (Ashraf ve diğ, 2016). Şekil 2.11' de döküm yöntemiyle imal edilmiş iki mikro-kafes yapı örneği görülmektedir. Bununla birlikte, tüm hassas parça uygulamaları için en iyi çözüm değildir. Örneğin; mikro-kafes yapı tasarımları hem mikro boyutta oldukları için hassastırlar hem de kullanım alanları dolayısıyla düşük toleranslara sahiptirler. Kafes yapı elemanlarının en-boy oranı 5' in altında ise bu üretim yöntemi uygundur (Ashby ve diğ, 2001). Ayrıca, mikro-kafes yapıların kalıpları karmaşık oldukları için, alaşımların ihtiyaç duydukları akışkanlık sınırlanmaktadır (Smith, 2012). Dolayısıyla, mikro-kafes yapı tasarımlarında, gerekli hassasiyeti döküm yöntemi ile elde etmek güçtür.



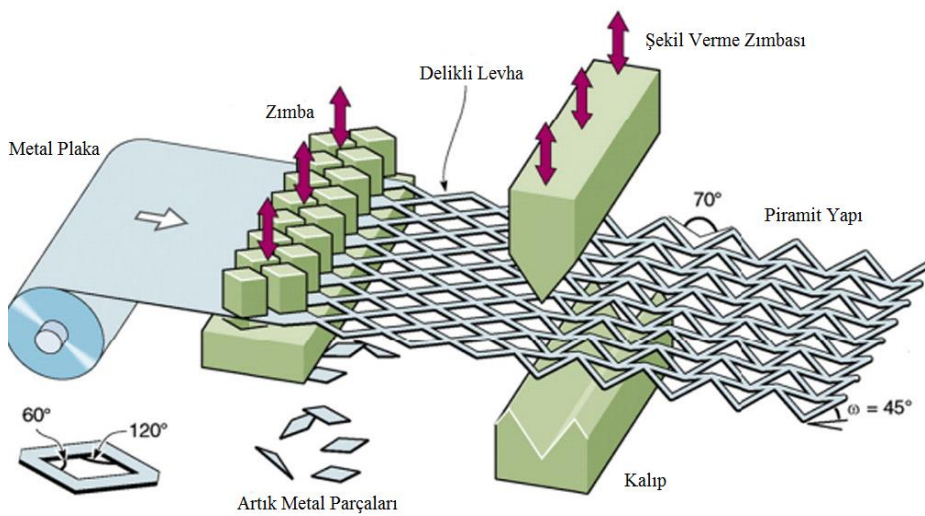
Şekil 2.11 : Döküm yöntemiyle imal edilmiş mikro-kafes yapı örnekleri - (a) alüminyum alaşımından imal edilmiş yapı, (b) bakır alaşımından imal edilmiş yapı (Ashraf ve diğ, 2016).

2.5.2 Deformasyon yardımıyla şekillendirme

Mikro-kafes yapıların imalatında kullanılan bir diğer yöntem de deformasyon yardımıyla şekillendirme. Bu yöntemi de geleneksel imal usullerinden biri olarak sınıflandırabiliriz. Uygulama iki türlü gerçekleştirilir. İlkinde, metal plakalar istenilen biçimlerde delinir ve sonrasında delinmiş plakalara şekil verilir. Bu yöntem tıpkı makro düzeydeki malzemelere presle şekil vermeye benzer. Şekil 2.12' de uygulama şematik olarak gösterilmiştir. İkincisinde ise, metal plakalar istenen biçimleri elde etmek için kesilir ve kesilen plaka enlemesine açılır. Sonrasında elde edilen biçimli ve delikli plakaya son şekil verilir.

Uygulama son derece basit ve düşük maliyetlidir. Döküm yöntemiyle kıyaslandığında, deformasyon yardımıyla şekillendirme yöntemiyle üretilen kafes yapılarda malzeme tokluğu daha yüksektir (Evans ve diğ, 2003). Bununla beraber, tüm pres şekillendirmelerinde olduğu gibi, kesim yöntemi geniş bir tolerans aralığında çalışır. Sonrasında yapılan biçimlendirmeye de hassas şekillendirme yapmak mümkün değildir.

Şekil alabilirliği yüksek olan alaşımlar kullanılarak, oluklu yapılar ve yumurta kutusu biçimli yapılar, basit pres şekillendirmeleri ve delik delme yöntemi ile imal edilebilir (Ashraf ve diğ, 2016). Döküm yönteminde bahsedildiği üzere, deformasyon yardımıyla şekil verme tekniğiyle mikro-kafes yapılarda beklenen hassasiyeti karşılamak güçtür.

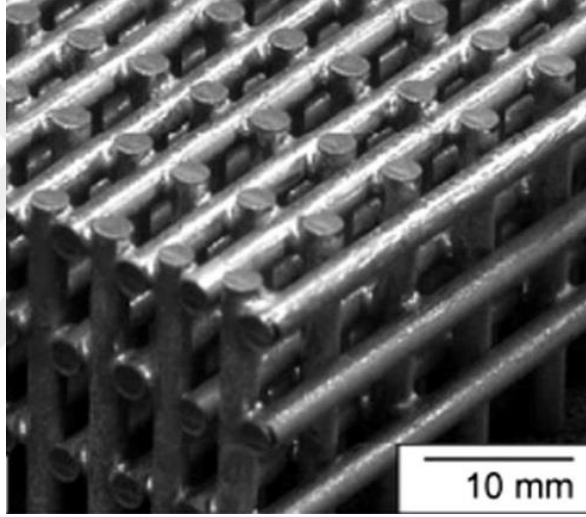


Şekil 2.12 : Deformasyon yardımıyla şekillendirme prosesi (Kooistra ve Wadley, 2007).

2.5.3 Metal tellerin birleşimi ile şekillendirme

Bu yöntem, başlıktan da anlaşılacağı üzere, sadece metal malzemeler için geçerli bir üretim yöntemidir. Temel olarak ikiye ayrılır: Örülü metal tel şekillendirmesi ve örülü olmayan metal tel şekillendirmesi.

Örülü metal tel şekillendirmesinde, metal teller örgüye benzer şekilde birbirleri arasından geçirilmek suretiyle bir kafes yapı elde edilir. Metal tellerin doğrultusu herhangi bir açıda uygulanabilir (Ashraf ve diğ., 2016). Örülü olmayan metal tel şekillendirmesinde ise, teller lehimlenmek suretiyle birbirlerine bağlanır. Birbirine bağlanan katmanlara presler yardımıyla şekil verilerek kafes yapı oluşturulur. Şekil 2.13 örülü olmayan metal tel şekillendirmesine bir örnektir.



Şekil 2.13 : Örülü olmayan katı metal tel şekillendirmesi (Queheillalt ve Wadley, 2005).

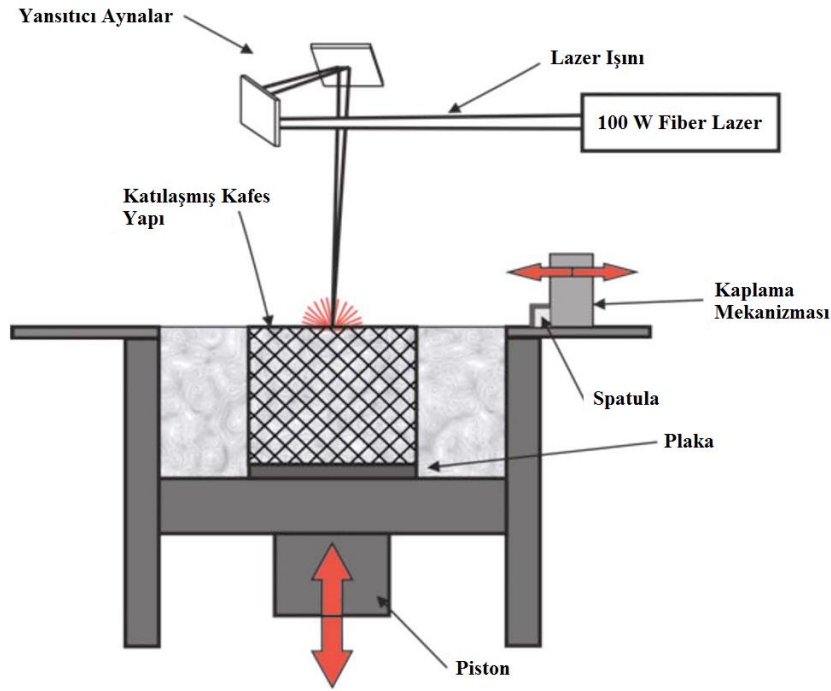
Uygulama son derece basit olmakla birlikte, dayanıklı bir mikro-kafes yapı elde edilemez. Çünkü metal teller birbirlerine ya tam olarak bağlanmamış ya da yalnızca lehimleme yoluyla bağlanmışlardır. Bu da mukavemeti azaltıcı bir unsurdur.

Bağıl yoğunluğu %3 ile %23 arasında olan kare ve elmas tipi hücre yapılı malzemeler, örülü olmayan metal tel şekillendirmesiyle üretilebilirler. Öte yandan, pratikte mikro-kafes yapı imalatında, bu yöntem hemen hiç kullanılmaz.

2.5.4 Seçici lazer ergitme

Günümüzde mikro-kafes yapı imalatı için en uygun bulunan yöntem seçici lazer ergitme tekniğidir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında SLM (Selective Laser Melting) olarak ifade edilecektir. Eklemeli imal usullerinden biri olan SLM' de,

katman ve katman üretilen bir teknik söz konusudur. Genel prensibi, metal tozlarını lazer ışını sayesinde ergiterek tozların biraraya gelmesini sağlamaktır. SLM fiber lazerin kullanıldığı bir imalat prosesidir, böylece metal tozlarının tamamen erimesine olanak sağlanır (Shen, 2009). Her bir katmanda aynı prensip uygulanır. Proses sona erdiğinde, fazlalık olan metal tozları uzaklaştırılır ve ortaya katmanların birleşmesiyle oluşan parça çıkar. Şekil 2.14' te şematik olarak SLM prosesi gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : Şematik olarak SLM prosesi (Brooks ve diğ , 2010).

Proses tarifinden de anlaşılacağı üzere, SLM metal tozlarının eritme yöntemini içerir. Uygulama karmaşık bir düzenek gerektirir. Hem düzeneğin kurulma maliyeti yüksektir hem de gereken metalin toz halinde elde edilmesi maliyetlidir. Bu sebeple henüz ticarileşebilen bir üretim yöntemi olamamıştır. Seri halde üretimlerde kullanılmamaktadır. Bununla birlikte, hassasiyeti çok yüksektir ve kesinlik konusunda diğer yöntemlere nazaran tartışmasız daha üstündür. Bu imalat teknolojisinin en büyük avantajı CAD-CAM entegrasyonunun sağlanması, görsel olarak karmaşık parçaların üretilmesi ve pazarın ihtiyaçlarına hızlı cevap verilebilmesidir (Rehme, tarih yok). Bu methodla artık malzeme oluşmaz, bu da eklemeli imal usullerinin birincil avantajlarından biridir (Ashraf ve diğ, 2016). Fazla gelen metal tozları toplanıp yeniden kullanılabilir, dolayısıyla bu malzeme maliyetini bir miktar düşürür (Brooks ve diğ, 2010).

Özellikle elektronik yapılar gibi küçük ölçekli cihazların üretiminde kullanılırlar. Bu sebepten ötürü mikro ölçekli kafes yapı imalatına da son derece uygundurlar. Teknolojinin ilerlemesi ve imkanların artması neticesinde ilerleyen zamanlarda seri imalatta da kullanılacağına kesin gözüyle bakılabilir.

2.5.5 Diğer imalat yöntemleri

İmal usulü olarak bahsedebileceğimiz iki yöntem daha vardır. Bunlardan ilki; elektron ışınması yardımıyla ergitme yöntemidir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında EBM (Electron Beam Melting) olarak ifade edilecektir. Bu yöntem prensip olarak SLM ile büyük benzerlik gösterir. Farklı yönü ise fiber lazer kullanımı yerine elektron ışını kullanılmasıdır. EBM prosesinde, elektron ışını bir tungsten telin ısıtılması ile elde edilir ve platform üzerinde, elektronlar metal tozlarına doğru 60kV'lık bir voltajla yönlendirilir (Hasan, 2013). SLM ile karşılaştırıldığında daha ucuz ve hızlı olduğu söylenebilir, fakat ergitme teknikleri arasındaki farktan ötürü ara kesit yüzey kaliteleri farklılık gösterir. SLM yöntemi ile EBM' e göre daha sağlam bir ara kesit yüzeyi elde edilir. Bu da SLM' in EBM' ye göre daha çok tercih edilmesinin sebebidir.

Bahsedilecek ikinci imal yöntemi de kendiliğinden yayılan fotopolimer dalga tekniğidir. Bu yöntem, prensipte ultraviyole ışınlarıyla polimer bir kalıp oluşturmaya ve sonrasında bu kalıbın metal ile kaplanarak istenen parçayı oluşturmaya dayanır.

İstenen parça oluştuktan sonra, dağlama ile polimer kalıp parçadan uzaklaştırılır. İmal yöntemi olarak fazla tercih edilen bir teknik değildir.

2.6 Mikro-Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri

Mikro-kafes yapıların özelliklerini irdelenecek olursak, bunları genel özellikler ve özel özellikler olarak ikiye ayrabiliriz. Genel özellikler, tüm mikro-kafes yapılarda bulunan ortak özelliklerdir. Bunlar; düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik, yüksek yüzey/hacim oranı olarak ele alınabilir. Özel özellikler ise, mikro-kafes yapının kullanım alanına göre ihtiyaç duyulan ve bu ihtiyaç doğrultusunda ortaya çıkan özelliklerdir. Spesifik olan özelliklere en belirgin örnek olarak negatif Poisson oranına sahip mikro-kafes yapılar verilebilir. Öte yandan bahsi geçen özelliklerden etkilenen mekanik davranışlar da irdelenecek konular arasındadır.

Bu çalışma kapsamında negatif Poisson oranına sahip mikro-kafes yapı tasarımı üzerinde durulmuş ve analizler bu tasarım üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında Poisson oranı, ν olarak ifade edilecektir.

2.6.1 Bağlı yoğunluk

Mikro-kafes yapıların en temel özelliklerinden bir tanesi düşük bağlı yoğunluk oranına sahip olmalarıdır. Bağlı yoğunluk, mikro-kafes yapı yoğunluğunun ana malzeme yoğunluğuna oranı şeklinde tanımlanabilir:

$$\rho_r = \frac{\rho_{ml}}{\rho_m} \quad (0.1)$$

Ana malzemenin yoğunluk değeri ρ_m , malzeme özelliğidir ve kullanılan ana materyal değiştirilmediği sürece değeri sabit kalır. Dolayısıyla bağlı yoğunluk, ρ_r değerini hesaplarken belirleyici unsur mikro-kafes yapının yoğunluk değeri ρ_{ml} ' dir. İlgili ρ_{ml} değeri ise tasarlanan mikro-kafes yapının kütle/hacim oranından tespit edilir. Kütle olarak doğrudan kafes yapının kütlesi alınırken, hacim hesabında kafes yapı dolu bir cisim gibi kabul edilir. Burdan yola çıkılarak denilebilir ki, mikro-kafes yapının tasarımı ve bu tasarımdan ortaya çıkan boşluklu yapı, ρ_{ml} üzerinde doğrudan etkilidir. Bu da diğer katı cisimlerden farklı olarak, mikro-kafes yapının mekanik özellikleriyle bağlantılıdır. Ana malzemenin yanında, hücre büyüklüğü, biçimi, düzeni, hücreler arası boşluklar, gözeneklilik tipi ve bağlı yoğunluk, hücresel malzemelerin özelliklerini etkiler (Rehme, tarih yok).

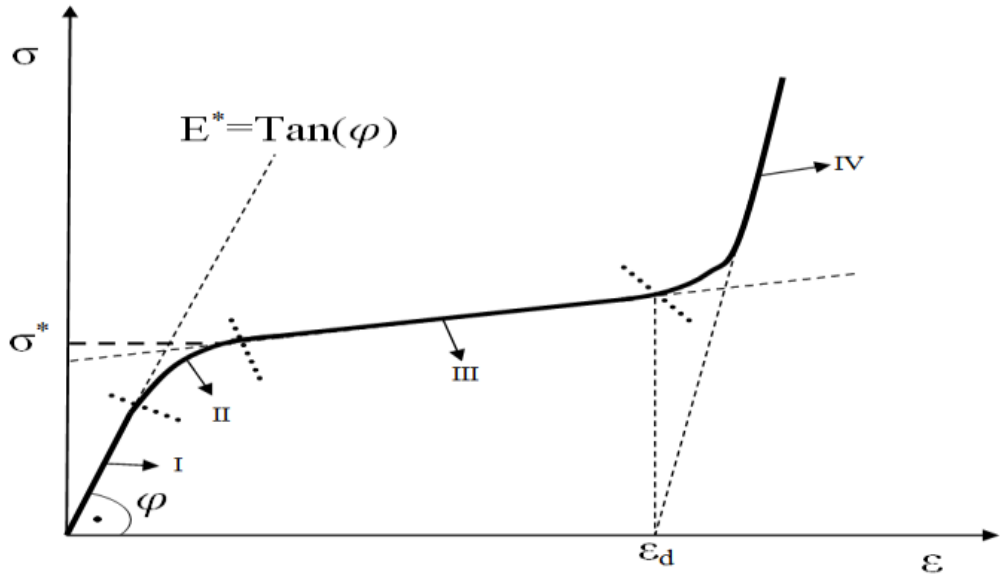
2.6.2 Gerilme şekil değiştirme ilişkisi

Genel olarak gözenekli malzemelerde, özel olarak ise mikro-kafes yapılarda, yapının ya da tasarımın karakteristiğini belirlemek için gerilme ve şekil değiştirme ile bu iki parametre arasındaki ilişki önemlidir. Diğer malzemelerden farklı olarak, ana materyal olarak hangi malzemenin kullanıldığı önemli olmakla beraber, mikro-kafes yapı tasarımı da bu konuda belirleyici hususlardan biridir. Mikro-kafes yapıyı imal ederken kullanılan metot da malzemenin karakteristik özellikleri üzerinde etkilidir. Bu başlık altında, gerilme şekil değiştirme ilişkisi bağlamında genel eğilimler temel alınacaktır.

Öncelikle, mikro-kafes yapılarda, gerilme şekil değiştirme ilişkisinde iki eğilimden söz etmek mümkündür: Eğilme baskın gerilme şekil değiştirme ilişkisi ve çekme-

basma baskın gerilme şekil değiştirme ilişkisi. Bu iki farklı eğilim arasındaki temel ayırım, mikro-kafes yapı topolojisinin uygulanan gerilmeye karşı verdiği reaksiyon ile ilintilidir.

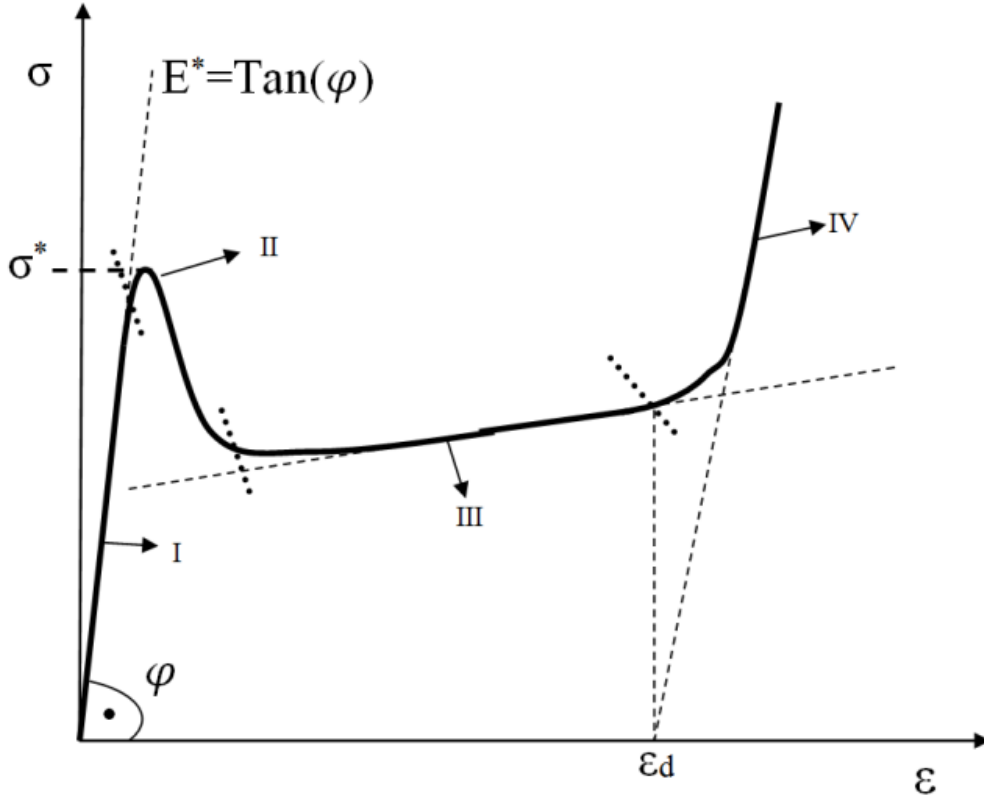
Eğilme baskın gerilme şekil değiştirme ilişkisinde, mikro-kafes yapı topolojisi, uygulanan gerilmeye karşılık eğilme davranışı göstermektedir. Diğer bir deyişle, mikro-kafes yapıyı oluşturan birim hücre bağlantıları, uygulanan gerilme neticesinde eğilirler. Tipik bir eğilme baskın gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 2.15' te görülmektedir.



Şekil 2.15 : Eğilme baskın gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Gümrük, 2012).

Yüklemenin başında kısa bir elastik davranıştan (I) sonra elastik plastik yükleme bölgesi (II) başlamaktadır. Elastik plastik çökme bölgesinden (III) sonra hücresel malzeme, hücrelerin ardı ardına çökmesi ile sıkışmaya başlar. Son bölümde tüm hücre duvarlarının birbirine temasının tamamlanmasıyla yoğunlaşma (densification) başlar ve gerilme hızla artış gösterir (IV) (Gümrük, 2012).

Çekme-basma baskın gerilme şekil değiştirme ilişkisinde, mikro-kafes yapı topolojisi, uygulanan gerilmeye karşılık uzama ve kısalma davranışı göstermektedir. Diğer bir deyişle, mikro-kafes yapıyı oluşturan birim hücre bağlantıları, uygulanan gerilme neticesinde çekme ya da basmaya maruz kalırlar. Şekil değiştirmenin son aşamasında ise, burkulmaya maruz kalırlar ve burkulmayla beraber şekil değiştirmeleri de hız kazanır. Tipik bir çekme-basma baskın gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 2.16' da gösterilmektedir.



Şekil 2.16 : Çekme-basma baskın gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Gümrük, 2012).

Çekme-basma baskın davranışta, gerilme başlangıçta bir pik değerine çok düşük birim şekil değiştirme değerinde ulaşır (I). Sonrasında hücre duvarlarında meydana gelen burkulmaların etkisiyle gerilme değeri ani düşüş gerçekleştirir (II). Kararlı çökme bölgesinde (III), çekme-basma baskın yapılar da yapının çökme mekanizmasına bağlı olarak gerilme düz bir değişim göstermekten ziyade birçok pik değer yapabilir (Gümrük, 2012). IV. bölgede ise eğilme baskın gerilme-şekil değiştirme diyagramında olduğu gibi yoğunlaşma (densification) gerçekleşir ve gerilme hızlı bir biçimde artış gösterir.

2.6.3 Negatif Poisson oranı

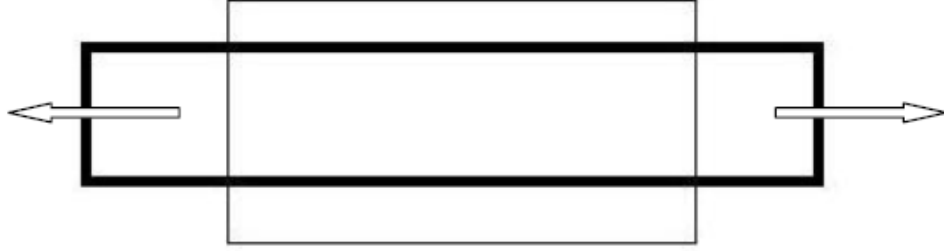
Malzemenin karakteristik özelliklerinden biri Poisson oranıdır. Poisson oranının tanımı şu şekilde yapılmaktadır: Bir malzemeye uygulanan kuvvetin dik doğrultusunda oluşan birim şekil değiştirme ile kuvvetin uygulandığı doğrultudaki birim şekil değiştirme oranı Poisson oranıdır. En basit tanımlamayla Poisson oranı bir malzemenin basınç altında ne kadar daraldığının ya da genişlediğinin matematiksel değeridir (Uzun, tarih yok). Simgesi ν ile gösterilir ve formülü Denklem 2.2' deki gibidir.

$$\nu = \frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (0.2)$$

ε_1 : uygulanan kuvvete dik doğrultudaki birim şekil değişimi

ε_2 : uygulanan kuvvet doğrultusundaki birim şekil değişimi

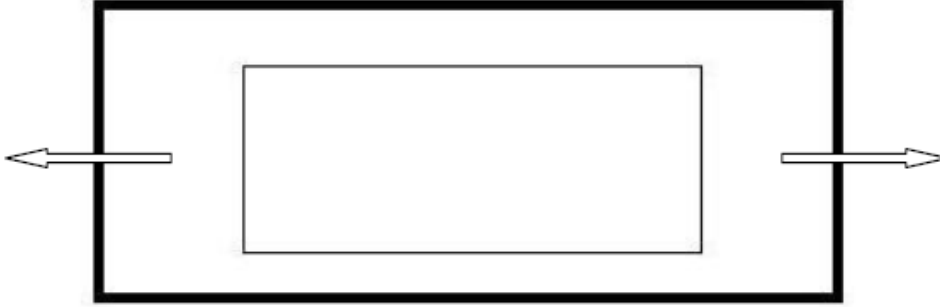
Doğadaki malzemeler incelendiğinde genel olarak Poisson oranının pozitif olduğu görülür. Diğer bir deyişle malzemelerin doğal karakteristiklerinden bir tanesi Poisson oranıdır ve bu oran pozitif olarak tanımlanır. Bunun dışında, sayısal olarak bu oran 0.5 değerini geçmez. Şekil 2.17’ de pozitif Poisson oranına sahip bir malzemeye, yatay ekseninde çekme kuvveti uygulanması sonucunda, dikey eksenin şekil değişimi şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.17’ de ince çizgilerle gösterilen dikdörtgen yapı deformasyona uğramamış orjinal malzeme görünümüdür. Çekme kuvveti sebebiyle oluşan deformasyon sonrası yapının aldığı biçim, kalın çizgilerle belirtilmiştir. Şematik gösterimden de anlaşıldığı üzere, pozitif Poisson oranına sahip malzemelerde çekme kuvvetine karşılık daralma meydana gelmektedir.



Şekil 2.17 : Pozitif Poisson oranına sahip bir malzemeye çekme kuvveti uygulanmasının şematik görünümü. İnce çizgiler orjinal malzemeye, kalın çizgiler deformasyon sonrasındaki malzemeye aittir (Jayanty, 2010).

Negatif Poisson oranına sahip malzemeler, literatüre bakıldığında “auxetic” malzemeler olarak da tanımlanırlar. Bu çalışma kapsamında auxetic malzeme tanımı kullanılmayacak, “negatif Poisson oranına sahip malzemeler” olarak nitelendirme yapılacaktır. Negatif Poisson oranının ortaya çıkışı ise ihtiyaç dahilinde yeni tasarımların yapılmasıyla olmuştur. Kullanım alanlarına ve kullanım şartlarına bağlı olarak çekmeye maruz kaldığında “açılma” yaratacak, aynı şekilde basmaya maruz kaldığında ise “kapanma” yaratacak tasarımlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu özellik, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek enerji sönümlenme yeteneği gibi ihtiyaçlarla da birleşince, genelde gözenekli yapılar özelde ise mikro-kafes yapılar

üzerine çalışmalar artmış ve negatif Poisson oranına sahip mikro-kafes yapı tasarımları önem kazanmıştır. Bazı malzeme özelliklerinde pozitif Poisson oranı ile kolayca gerçekleştirilemeyecek iyileştirmeler, negatif Poisson oranı ile dramatik şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Pirolini, 2014). Şekil 2.18’ de negatif Poisson oranına sahip bir malzemeye, yatay ekseninde çekme kuvveti uygulanması sonucunda, dikey eksenin şekil değişimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : Negatif Poisson oranına sahip bir malzemeye çekme kuvveti uygulanmasının şematik görünümü. İnce çizgiler orjinal malzemeye, kalın çizgiler deformasyon sonrasındaki malzemeye aittir (Jayanty, 2010).

Şekil 2.18’ de ince çizgilerle gösterilen dikdörtgen yapı deformasyona uğramamış orjinal malzeme görünümüdür. Çekme kuvveti sebebiyle oluşan deformasyon sonrası yapının aldığı biçim kalın çizgilerle belirtilmiştir. Şematik gösterimden de anlaşıldığı üzere, negatif Poisson oranına sahip malzemelerde çekme kuvvetine karşılık, kuvvete dik doğrultuda açılma meydana gelmektedir.

Negatif Poisson oranına sahip malzemeler sınıflandırılacak olursa; doğal ve insan yapımı malzemeler olarak ikiye ayrılır. Bu noktada şu husus belirtilmelidir ki, negatif Poisson oranına sahip malzemelerin büyük bir çoğunluğu insan yapımı malzemeler, diğer bir deyişle yapay malzemelerdir. Bununla beraber, doğada negatif Poisson oranına sahip malzemeler de bulunmaktadır. Örnek olarak, doğal oluşumlu kristalin-silkat ve α -kristobalitin verilebilir. Bazı kemik formları negatif Poisson oranına sahiptir. Bu örneklerin dışında da yeni doğal malzemelerin araştırılmasına devam edilmektedir (Pirolini, 2014).

Daha önce mikro-kafes yapıların kullanım alanlarında bahsedildiği üzere, birçok farklı uygulamada negatif Poisson oranına sahip mikro-kafes yapılar tercih edilmektedir. Biyomekanik ve havacılık/uzay sanayisi günümüzde kullanım imkanı

sağlayan ve sağlayacak olan en önemli iki alandır. Biyomekanikte kullanılan protezler, kullanım alanına ve protezden beklenen gerekliliklere göre, negatif Poisson oranına sahip olmasıyla, doğala en yakın şekilde işlevini yerine getirebilirler. Yine aynı şekilde havacılık ve özellikle uzay sanayisinde son yıllarda hızlanan ihtiyaçlar ile birlikte negatif Poisson oranına sahip malzemeler kullanım önceliğine sahip olabilecek durumdadır.

Negatif Poisson oranına sahip mikro-kafes yapıların, birçok alanda kullanım potansiyeline sahip olmalarının sebebi, bazı özelliklerinin diğer malzemelere nazaran üstün olmasıdır. Bu özelliklerden bazıları; (1) kayma modülünün (G) hacim modülüne (K) göre çok daha yüksek olması, (2) yüksek batma direnci, (3) yüksek sönümleme ve absorpsiyon yeteneği olarak sıralanabilir (Jayanty, 2010). Fakat henüz bu çalışmalar çoğunlukla teoride yapılan çalışmalardır. Teoride ve modellemede, negatif Poisson oranına sahip malzemelerin üstün özelliklerinin ispat edilmesiyle beraber, yeni çalışmalar eşliğinde pratikte de bu özelliklerin ne oranda var olduklarının incelenmesi gerekmektedir (Uzun, tarih yok).

2.7 Mikro-Kafes Yapıların Gelecekteki Yeri

Mikro-kafes yapıların kullanım alanları günümüzde oldukça sınırlıdır. Yapılan çalışmalar daha çok teoride kalmakta, pratiğe dökülmesi için bazı koşulların gerçekleşmesi gerekmektedir. Öncelikli olarak mevcut imalat yöntemleri hızlanmalı ve ticari üretime uygun hale getirilmelidir. İmalat yöntemleri hızlanmadığı ve yaygınlaşmadığı sürece, üretimler ve uygulamalar pilot uygulama olarak kalacak ve kullanım oranında bir artış söz konusu olmayacaktır. Teorideki çalışmalar pratik uygulamalarla bütünleştiği sürece, imalat yöntemlerini iyileştirmek için yapılan çalışmalar da hız kazanacaktır. Potansiyel kullanım alanlarına ek olarak hem malzeme hem de yapı olarak daha yeni alanlar geliştirilebilir ve teoride var olan avantajlar pratikteki neticeler ile kıyaslanabilir (Uzun, tarih yok). Fakat şu aşamada bu malzemeleri anlamak ve pratikteki uygulamalarda kullanabilmek için çok sayıda araştırmaya daha ihtiyaç vardır (Liu, 2006).

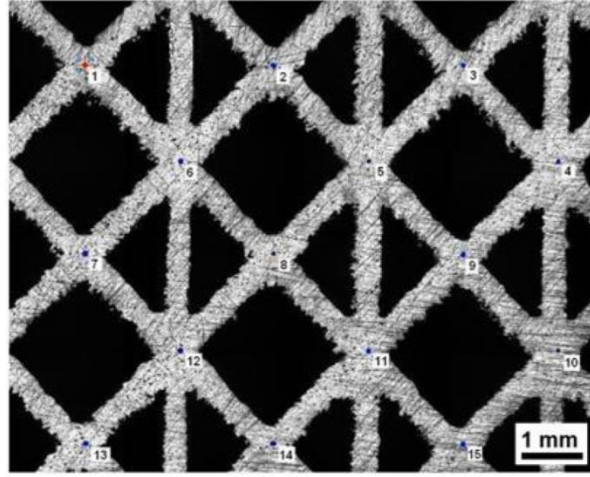
Özellikle havacılık ve savunma sanayinde rekabet ön planda olduğu için, mikro-kafes yapılar gibi üstünlük sağlayabilme potansiyeli olan malzemelere odaklanılması kaçınılmazdır. Bu sayede hem mühendislik alanında yeni yaklaşımlar ortaya çıkacak hem de rekabette üstünlük sağlanacaktır.

2.8 Literatürdeki Örnek Yapılara Genel Bakış

Günümüze kadar yapılan çalışmalar gözden geçirildiğinde örnek mikro-kafes yapı tasarımlarına ait modeller bulunmaktadır. Genel olarak literatürdeki modelleri iki gruba ayırıp sınıflandırabiliriz: İki boyutlu mikro-kafes yapı tasarımları ve üç boyutlu mikro-kafes yapı tasarımları.

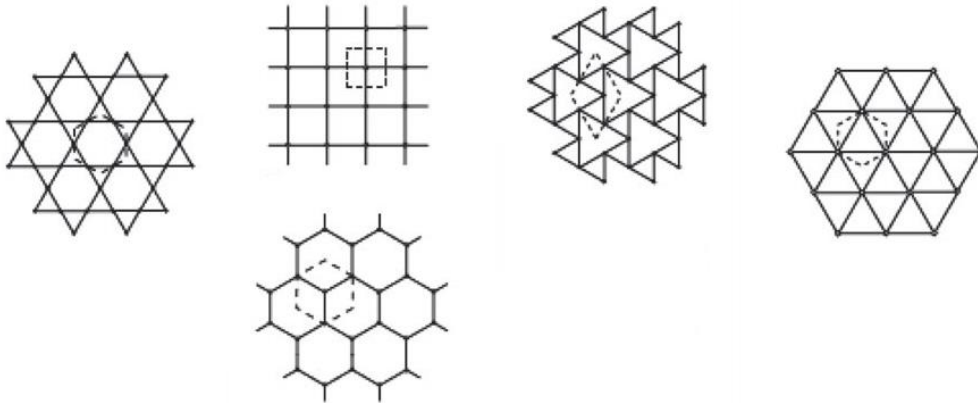
Bu başlık altında öncelikle literatürde bulunan iki boyutlu mikro-kafes yapı tasarımları ele alınmıştır. İki boyutlu yapıdan kasıt, üçüncü boyutun diğerlerine göre ihmal edilecek düzeyde küçük olmasıdır.

İki boyutlu mikro-kafes yapılara tipik bir örnek olarak Şekil 2.19’ daki tasarım verilebilir. Şekil 2.19’ daki yapı görünümü stereomikroskop altında elde edilmiştir.



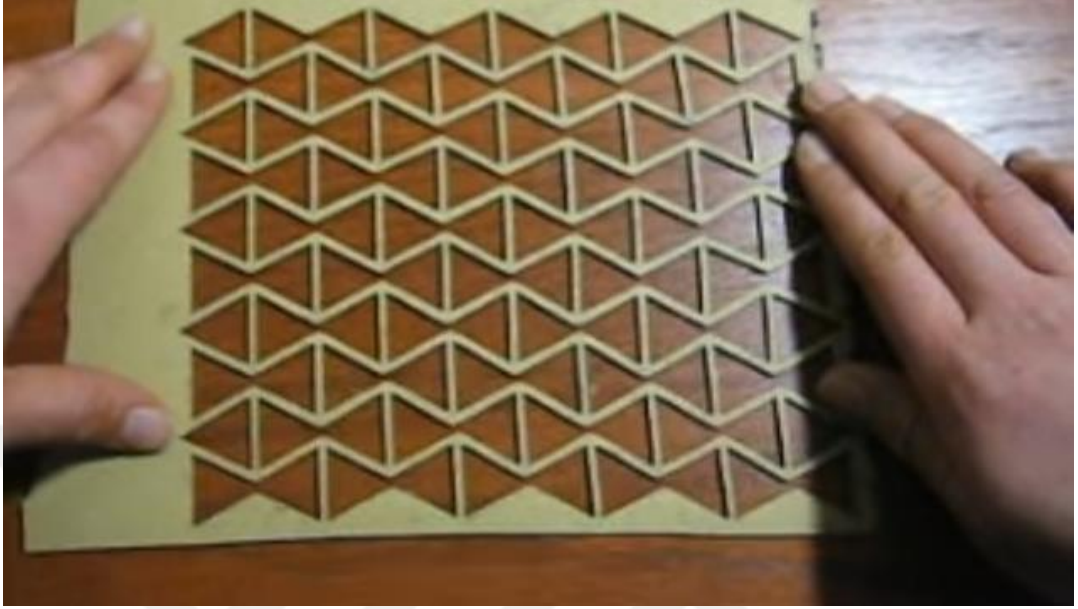
Şekil 2.19 : İki boyutlu mikro-kafes yapıya örnek (Caiazzo ve diğ, 2014).

İki boyutlu mikro-kafes yapı tasarımlarına ait çeşitli örnekler ise Şekil 2.20’ deki gibidir.



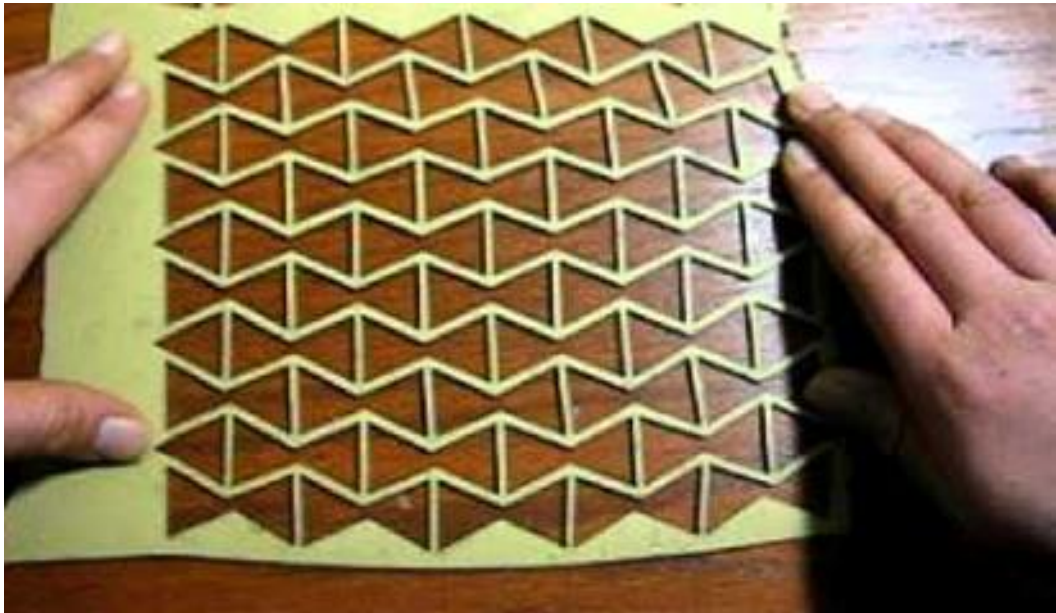
Şekil 2.20 : İki boyutlu mikro-kafes yapı tasarımları (Ashby ve diğ, 2010).

Çalışma kapsamında üzerinde durulan, negatif Poisson oranına sahip iki boyutlu mikro-kafes yapılara örnek olarak Şekil 2.21’ deki tasarım verilebilir. Şekilde görülen tasarımda malzeme olarak polimer kullanılmıştır.



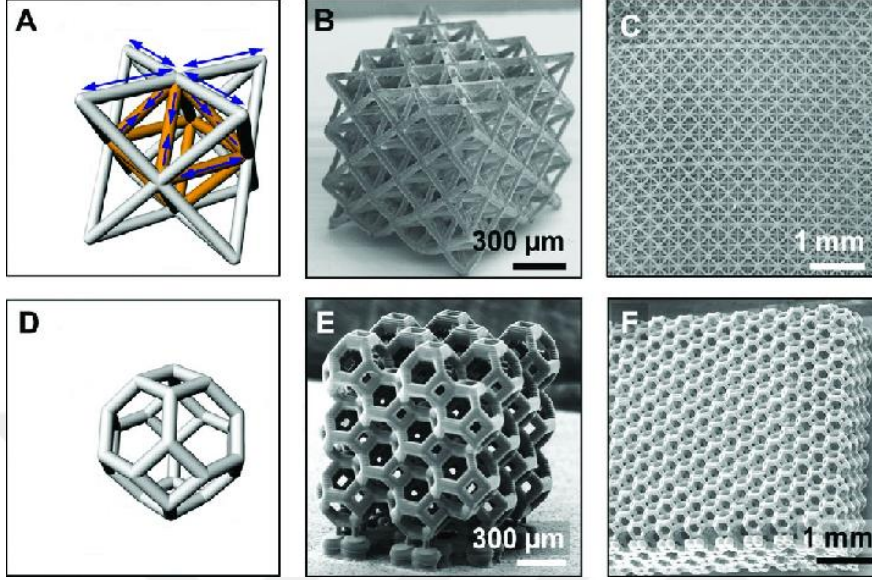
Şekil 2.21 : Literatürde kullanılan iki boyutlu mikro-kafes yapıya örnek.

Şekil 2.22’ de ise, Şekil 2.21’ deki yapının çekme kuvveti etkisindeki şekil değiştirmesi görülmektedir. Modelin alt kısmında bir genişleme söz konusudur. Diğer bir deyişle, uygulanan kuvvete dik doğrultuda bir “açılma” gerçekleşmiştir. Bu da iki boyutlu modelin negatif Poisson oranına sahip olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 2.22 : Literatürde kullanılan iki boyutlu mikro-kafes yapının çekme kuvveti altında şekil değişimi.

Üç boyutlu mikro-kafes yapılarında birim hücre oluşmak ve sıralı ya da rastgele dizilimle bu birim hücreyi çoğaltmak esastır. Şekil 2.23’ te üç boyutlu kafes yapıyı oluşturan birim hücre mantığı ve hücre çoğaltılması net bir şekilde görülebilir.



Şekil 2.23 : Üç boyutlu kafes yapıyı oluşturan birim hücre ve hücre yayılımı.

Şekil 2.23’ te A ve D ile gösterilen yapılar birim hücrelerdir. Sırasıyla çekme-basma baskın ve eğilme baskın birim hücre örneğidirler. Diğer yapılarda ise bu birim hücrelerin sıralı dizilim ile yaygınlaştırılıp çoğaltılması görülmektedir.

Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’ de gösterilen iki boyutlu yapı ise farklı bir yöntem kullanılarak üç boyutlu hale getirilmiştir. İki boyutlu olan yapı rulo şeklinde kıvrılıp sarılmak suretiyle üç boyut kazandırılmış ve bu şekilde de negatif Poisson özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Yapının üç boyutlu hali Şekil 2.24’ te görüldüğü gibidir.



Şekil 2.24 : İki boyutlu yapı rulo şeklinde sarılarak üç boyutlu hale getirilmiştir.

Şekil 2.24' teki yapının negatif Poisson oranına sahip olduğu Şekil 2.25' te açıkça görülmektedir.



Şekil 2.25 : Rulo yapının çekme kuvveti altında şekil değişimi.

Verilen örnekler dışında literatürde pek çok iki boyutlu ve üç boyutlu kafes yapılar bulmak mümkündür. Bunların bir kısmı sadece metal malzemeler düşünülerek tasarlanmış, bazıları ise malzeme ayrımı yapmadan sadece kafes yapı topolojisine odaklanmak suretiyle oluşturulmuştur.



3 . ÇALIŞMA KAPSAMINDA YAPILAN TASARIM VE ANALİZLER

3.1 Tasarımdan Beklenen Özellikler

Bu çalışma kapsamında oluşturulacak tasarımın öncelikle negatif Poisson oranına sahip olması istenmiştir. Sırasıyla önce birim hücre oluşturulmuş, oluşturulan birim hücre sıralı dizilim yöntemi ile yaygınlaştırılıp türetilerek iki boyutlu bir plaka yapı elde edilmiş ve son olarak da elde edilen plaka yapı belirli eksenlerde çoğaltılıp üç boyutlu mikro-kafes yapı meydana getirilmiştir.

Oluşturulan üç boyutlu mikro-kafes yapı topolojisinin, ilk koşul olarak, negatif Poisson oranına sahip olması ortaya konulmuştur. Daha sonra ise SEY analizleri ile mikro-kafes yapının ne gibi mekanik özelliklere sahip olduğu incelenmiştir.

3.2 Tasarımın Amacı

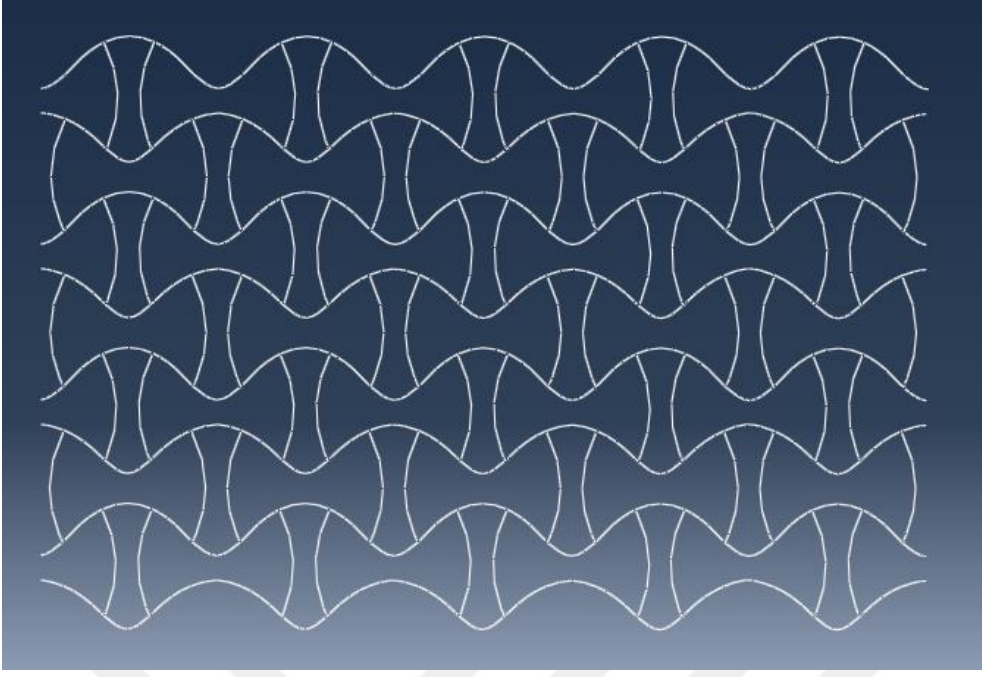
Tasarlanan mikro-kafes yapının öncelikli amacı literatürde varolan modellere yeni bir tasarımla katkıda bulunmaktır. Bununla beraber oluşturulan modelin mekanik özelliklerinin, diğer modellere nazaran daha üstün olmasına çalışılmış, ileride yapılabilecek çalışmalara ilham olması adına eksik ya da geliştirilmeye açık yönleri tespit edilmiştir.

3.3 Mikro-Kafes Yapı Modellemesi

Mikro-kafes yapı modellemesi hem iki boyutlu plaka şeklinde hem de üç boyutlu olarak plakaların periyodik dizilimi yapılmak suretiyle oluşturulmuştur. Kafes yapı, plaka yapı tasarımından yola çıkılarak oluşturulduğu için öncelikle plaka yapı tasarımı ele alınacaktır.

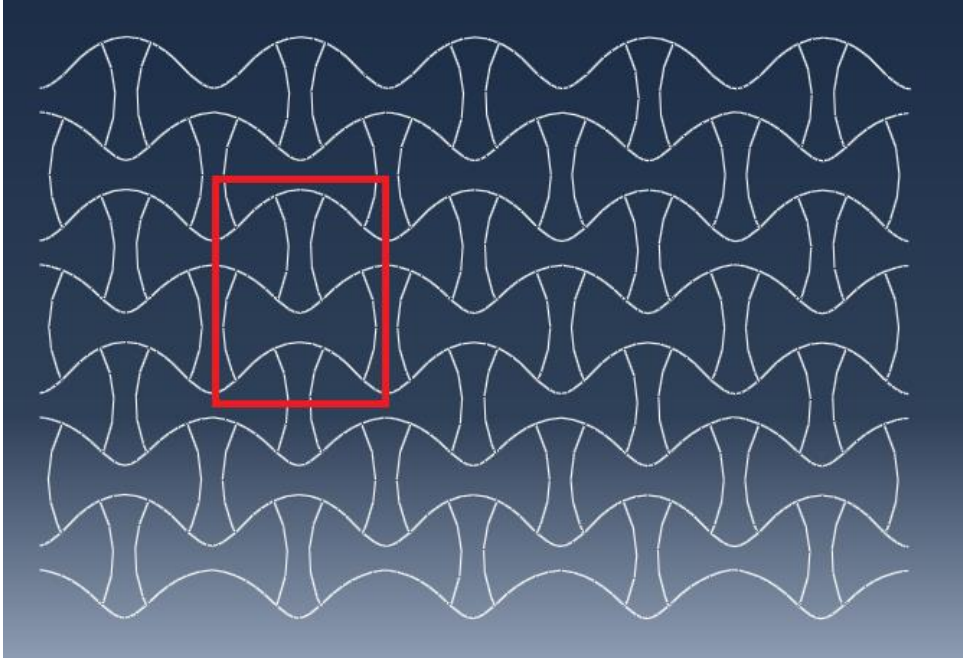
3.3.1 Plaka yapı modellemesi

Modelleme yapılırken, tasarımın negatif Poisson oranına sahip olması temel alınmıştır. Şekil 3.1' de, oluşturulan mikro-kafes yapı plakası görülmektedir.



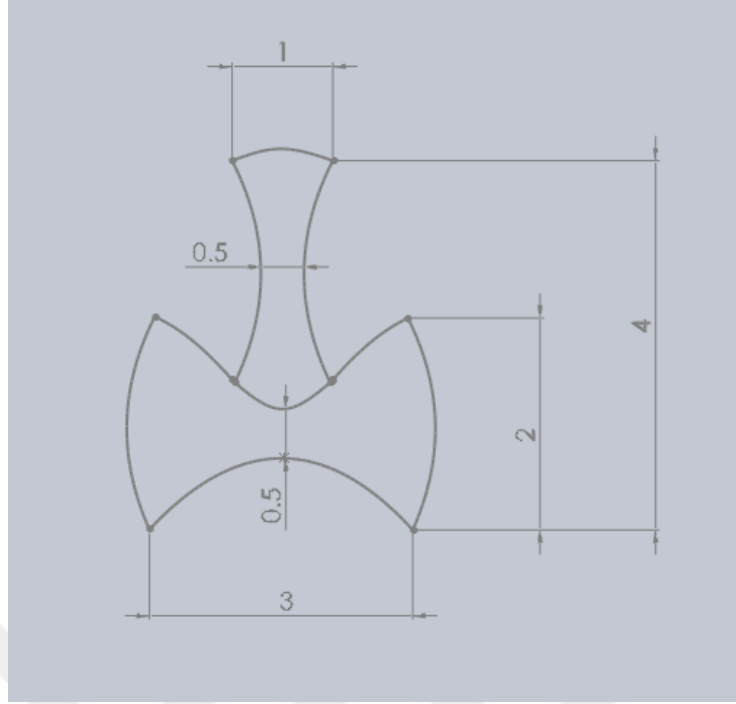
Şekil 3.1 : Tasarlanan iki boyutlu plaka yapı.

Negatif Poisson oranını yakalayabilmek için incelemeler öncelikle birim hücre üzerinde yapılmıştır. Ardından birim hücrenin periyodik dizilimi ile iki boyutlu plaka yapı oluşturulmuştur. Plaka yapı içerisinde ele alınan birim hücre ve birim hücrenin periyodik dizilimi Şekil 3.2.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : İki boyutlu mikro-kafes yapının birim hücresi.

Birim hücreye ve dolayısıyla mikro-kafes yapıya ait ölçümler Şekil 3.3' teki çizimde verilmiştir.

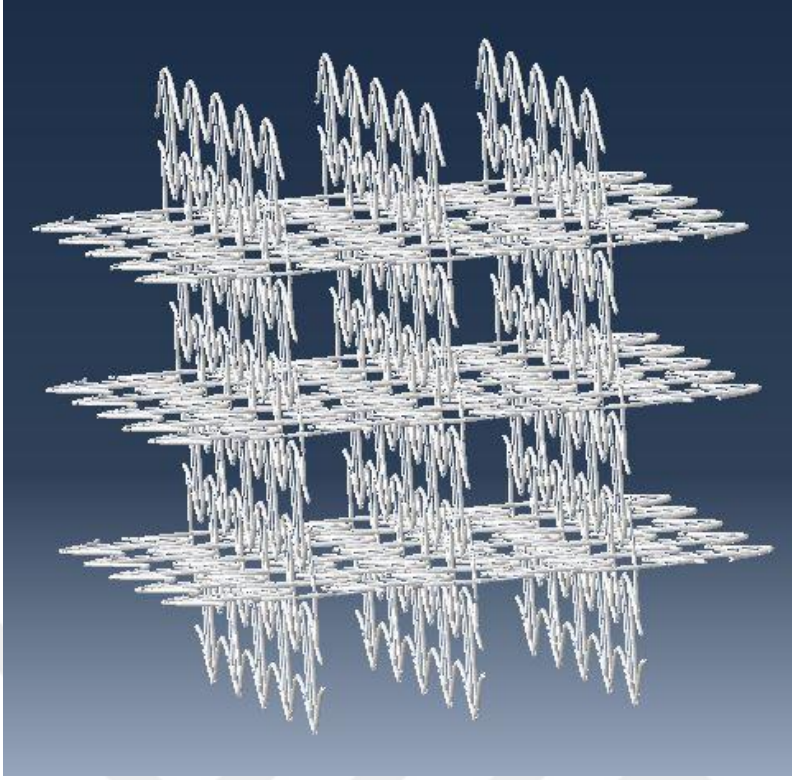


Şekil 3.3 : İki boyutlu birim hücre ölçüleri (mm).

3.3.2 Üç boyutlu modelleme

Üç boyutlu mikro-kafes yapının tasarımı süresince, iki boyutlu plaka yapı göz önünde bulundurulmuştur. Oluşturulan iki boyutlu plaka yapının yatay ve dikey ekseninde periyodik şekilde sıralanması ile üç boyutlu mikro-kafes yapı elde edilmiştir. Periyodik sıralamada iki boyutlu plakalar arası mesafe 3.5 mm olarak alınmıştır. Üç boyutlu mikro-kafes yapının yandan görünümü Şekil 3.4' te olduğu gibidir. Şekil 3.5' de yapıya ait birim hücrelerin birbiri içerisine nasıl geçtiği yakından görülmektedir. Burada, kırmızı renk ile belirginleştirilmiş birim hücre düşey yöndeki iki boyutlu plakaya ait iken, siyah renk ile belirginleştirilmiş olan birim hücre ise yatay yöndeki iki boyutlu plakaya aittir. Bir birim hücre boşluğundan başka bir birim hücrenin kırımları geçmektedir. Kesit çapına bağlı olarak aradaki boşluk miktarı ve dolayısıyla mikro-kafes yapının gözeneklilik oranı değişkenlik göstermektedir. Şekil 3.6' da ise üç boyutlu mikro-kafes yapının izometrik görünüşü mevcuttur.

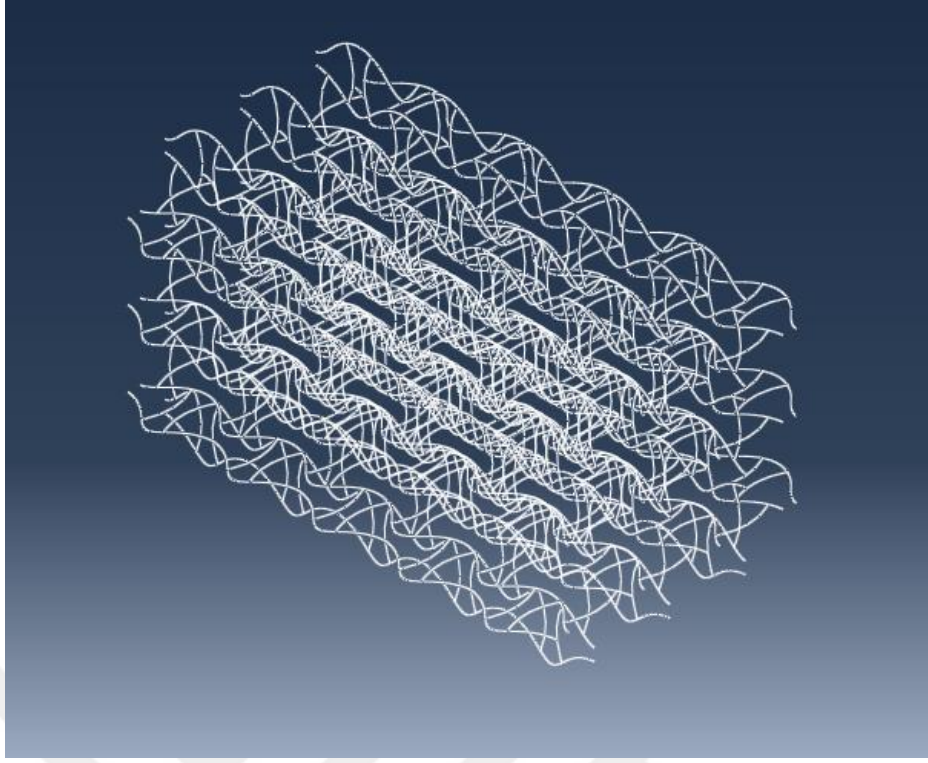
Model, sıralı dizilimle çoğaltıldığı için simetrik ve periyodik bir yapıya sahiptir. İmal usulü ve üretilebilirlik kabiliyeti tasarım aşamasında dikkate alınmamış, uygun topolojiyi oluşturmaya ve yakalamaya çaba sarf edilmiştir. Bununla beraber SLM teknoloji ile çap aralığı 0.1 mm ile 0.5 mm olacak şekilde mikro-kafes yapı imalatı yapılabilmektedir. Bu sebeple mikro-kafes yapı, 0.1 mm, 0.3 mm ve 0.5 mm olacak şekilde farklı kesit çaplarına uygun biçimde tasarlanmıştır.



Şekil 3.4 : Tasarlanan üç boyutlu mikro-kafes yapı.



Şekil 3.5 : Üç boyutlu kafes yapıda birim hücrelerin birbirine geçişi.



Şekil 3.6 : Tasarlanan üç boyutlu mikro-kafes yapı (izometrik görünüş).

3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri

İki boyutlu plaka yapı ve üç boyutlu mikro-kafes yapı modellemelerinden sonra, tasarım özelliklerinin tespiti, irdelenmesi ve yorumlanıp iyileştirilmesi adına SEY analizleri yapılmıştır. Analiz için Abaqus CAE 6.14 programı kullanılmıştır. Analizler statik ve dinamik olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Bu başlık kapsamında; çekme, basma ve darbe analizleri yapılmıştır. Öncelikle proses parametreleri ve varsayılmış olan kabuller üzerinde durulmuş, daha sonra yapılan analizler ve sonuçları paylaşılmıştır.

3.4.1 Statik analiz

3.4.1.1 Çekme analizi

Çekme analizi yapılmasındaki amaç, öncelikli olarak yapının negatif Poisson oranına sahip olduğunu açık bir şekilde göstermektir.

Tasarım süresince malzeme temelli düşünülmemiş, ana malzemenin tasarıma olası etkileri gözardı edilmiştir. Bununla beraber analiz esnasında malzeme olarak düşük karbonlu çelik seçilmiştir. Medikal uygulamalar kullanım alanlarının başında geldiğinden dolayı bu tercih yapılmıştır. Malzeme özellikleri için, Denklem 3.1' de

belirtildiği şekilde çeliğin elastisite modülü (E_{st}), Denklem 3.2' de belirtildiği şekilde çeliğin yoğunluğu (ρ_{st}) ve Denklem 3.3' te belirtildiği şekilde çeliğin Poisson oranı (ν_{st}) değerleri alınmıştır.

$$E_{st} = 200GPa \quad (3.1)$$

$$\rho_{st} = 7.85gr / cm^3 \quad (3.2)$$

$$\nu_{st} = 0.26 \quad (3.3)$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus, yeni yapılan tasarımın Poisson oranının negatif sonuç vermesidir. Kullanılan malzeme, normal şartlarda olduğu şekilde, pozitif Poisson oranına sahiptir. Kritik olan konu, çelik malzemesinden negatif Poisson oranına sahip bir yapı elde etmektir. Diğer bir deyişle, negatif Poisson oranı malzemeye değil, tasarlanan yapıya aittir.

Analizde kiriş eleman (beam element) kullanılmış olup kiriş kesiti dairesel olarak belirlenmiştir. Her bir analiz, kesit çapı 0.1 mm, 0.3 mm ve 0.5 mm olacak şekilde tekrar edilmiştir. Böylece kesit çapındaki değişimin sonuçlara olan etkisi karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

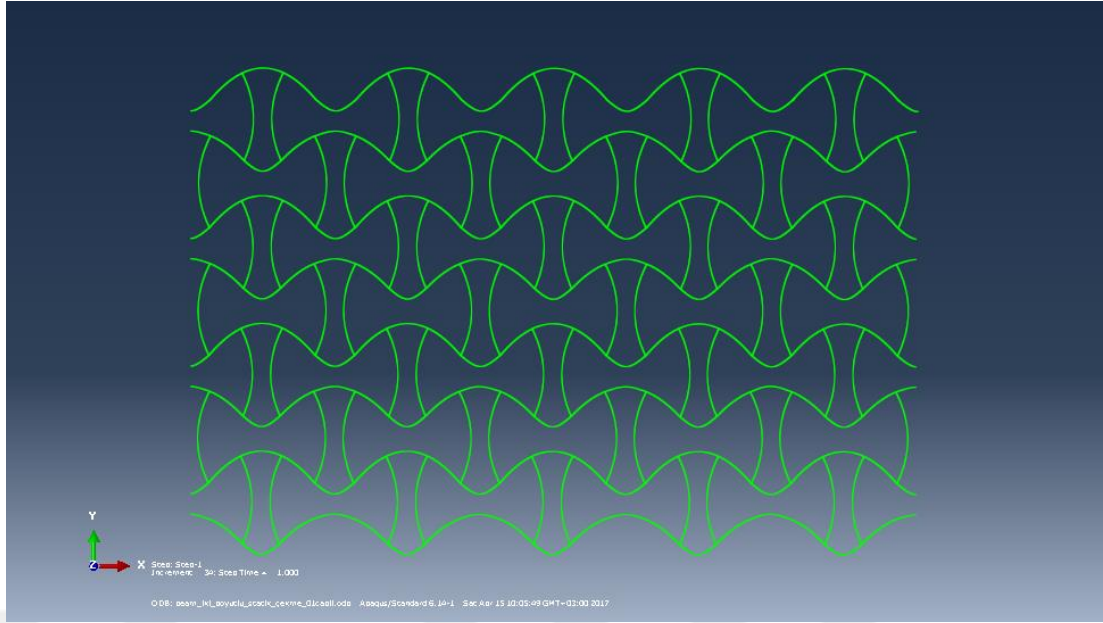
Çekme analizi kapsamında uygulanan sınır koşullarından biri mikro-kafes yapının bir tarafının ankastre olarak belirlenmesidir. Ankastre sınır koşulu için kafes yapının 1 mm' lik mesafesi kullanılmıştır.

Diğer sınır koşulu ise mikro-kafes yapının ankastre olarak belirlenmemiş tarafına, çekme işleminin yapılacağı yer değiştirmeyi tanımlamaktır. Çekme analizi için Denklem 3.4' te belirtildiği gibi, yer değiştirme 2 mm olarak verilmiştir.

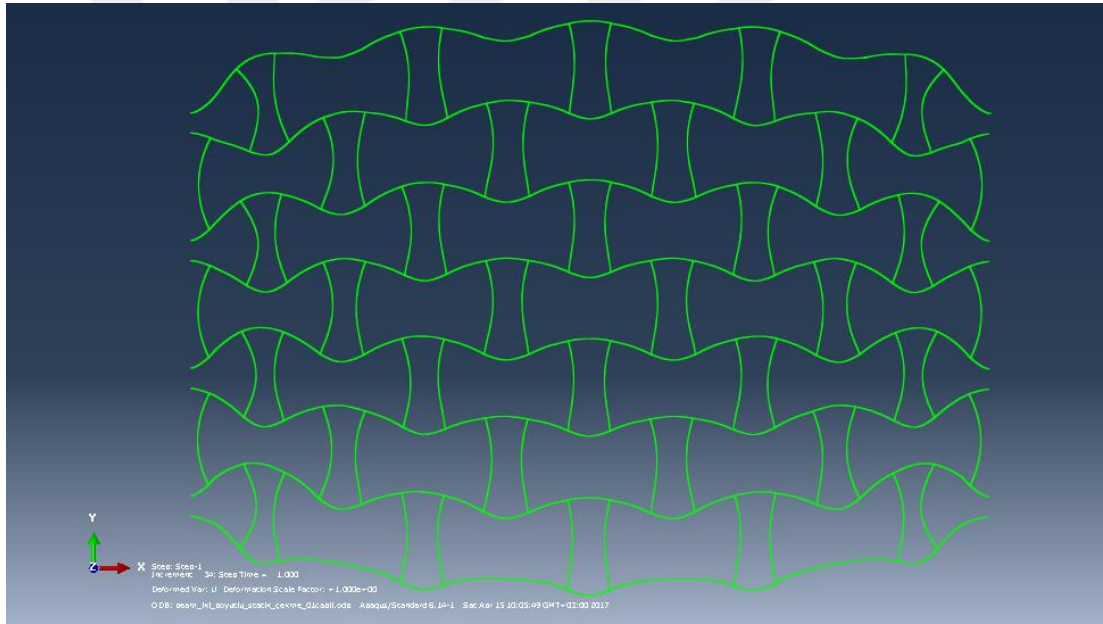
$$\Delta x = 2mm \quad (3.4)$$

Çekme analizi tamamlandıktan sonra, öncelikle görsel olarak deformasyonun hangi yöne doğru aktığı incelenmiştir. Böylece mikro-kafes yapının negatif Poisson oranına sahip olduğu tam anlamıyla tespit edilmiştir. Şekil 3.7' de deformasyon öncesi iki boyutlu mikro-kafes yapı plakası görülmektedir. Şekil 3.8' de ise deformasyonun aktığı yön ve deformasyon sonrası mikro-kafes yapı plakası görülmektedir.

Şekil 3.7 ve 3.8 incelendiğinde, yatay yönde çekme gerçekleştirildiğinde, mikro-kafes yapının dikey yönde açıldığı görülür.



Şekil 3.7 : Deforme olmamış iki boyutlu mikro-kafes yapı.

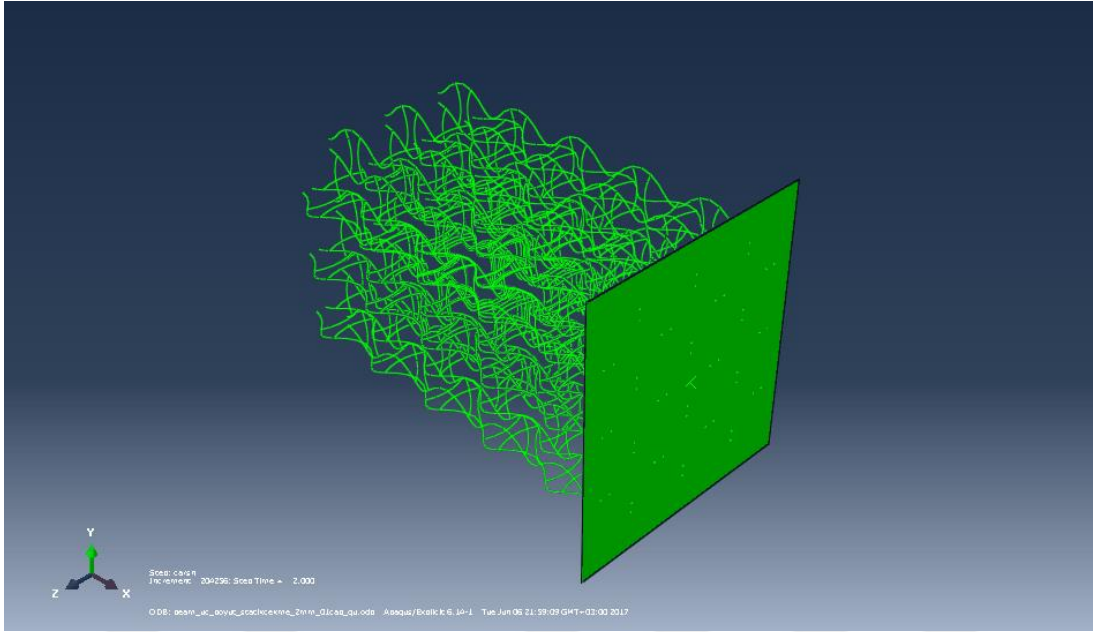


Şekil 3.8 : Çekme analizi sonrası, deforme olmuş iki boyutlu mikro-kafes yapı.

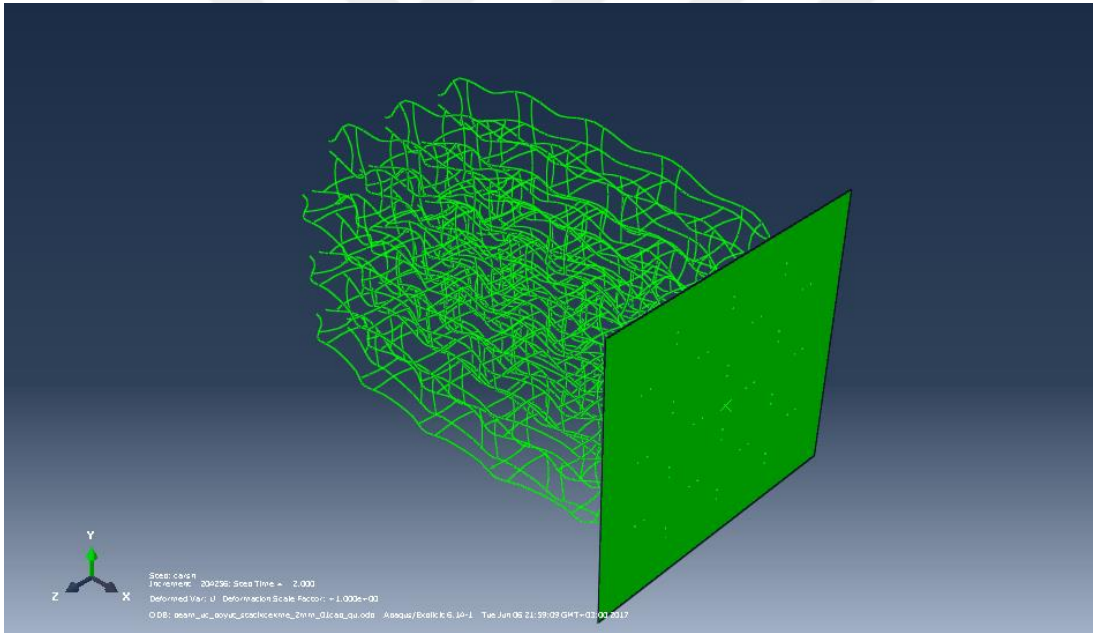
Benzer şekilde üç boyutlu mikro-kafes yapının çekme analizi öncesi ve sonrası görünümleri Şekil 3.9 ve Şekil 3.10' daki gibidir.

Şekil 3.9 ve 3.10 incelendiğinde, yatay yönde çekme gerçekleştirilince, mikro-kafes yapının dikey yönde açıldığı görülür. Bu da üç boyutlu mikro-kafes yapının negatif Poisson oranına sahip olduğunun göstergesidir.

İki boyutlu yapıdan farklı olarak, üç boyutlu mikro-kafes yapının x ekseninde çekme uygulandığında hem y ekseninde hem de z ekseninde açılma görülmektedir.



Şekil 3.9 : Deforme olmamış üç boyutlu mikro-kafes yapı.



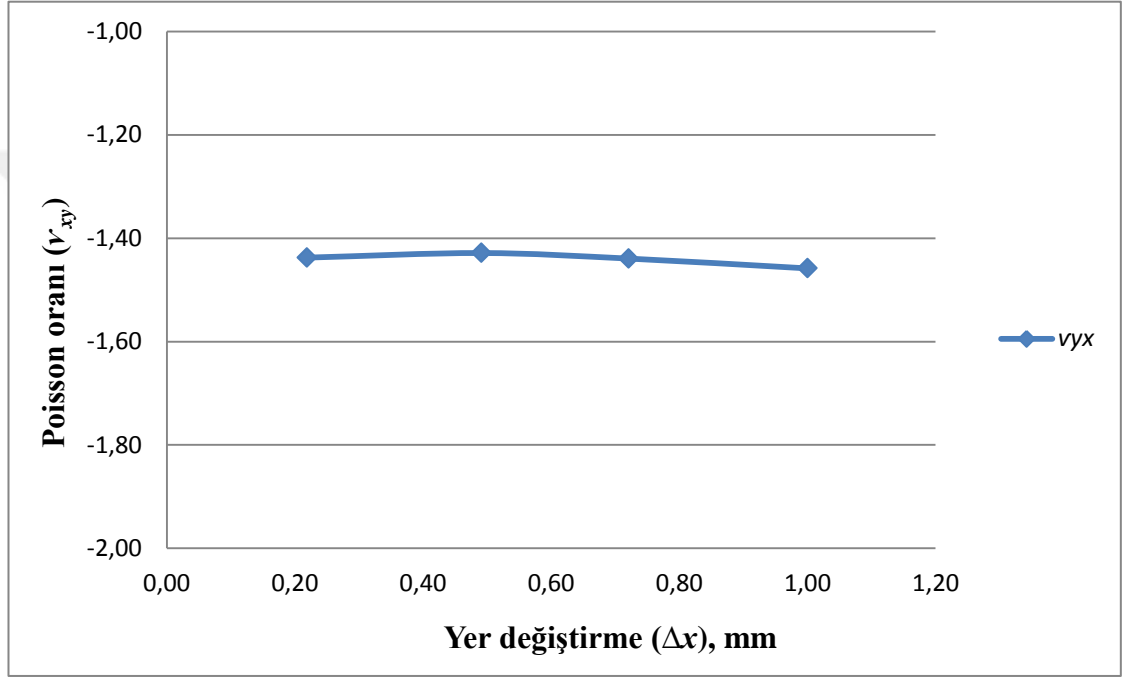
Şekil 3.10 : Çekme analizi sonrası, deforme olmuş üç boyutlu mikro-kafes yapı.

Üç boyutlu mikro-kafes yapının ve yapıyı oluşturan iki boyutlu mikro-kafes yapı plakasının negatif Poisson oranına sahip olduğu belirlendikten sonra, Poisson oranının değeri hesaplanmıştır. Poisson oranının formülü, Denklem 2.2’ de tanımlanmıştır.

Denklem 2.2’deki genel formülden yola çıkarak hesaplanacak Poisson oranı Denklem 3.5’ teki gibidir. Burada x yatay eksen, y ise düşey eksen belirtmektedir. İki boyutlu yapı söz konusu olduğu için z eksenini ihmal edilmiştir.

$$\nu_{yx} = \frac{-\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad (3.5)$$

Çekme analizi sonucunda, -x ekseninden 1 mm çekmeye maruz kalan mikro-kafes yapının Poisson oranı hesaplanmıştır. Hesaplama yapılırken plaka yapının maksimum yer değiştirmeye maruz kalan noktaları kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 3.11’ de görülmektedir.

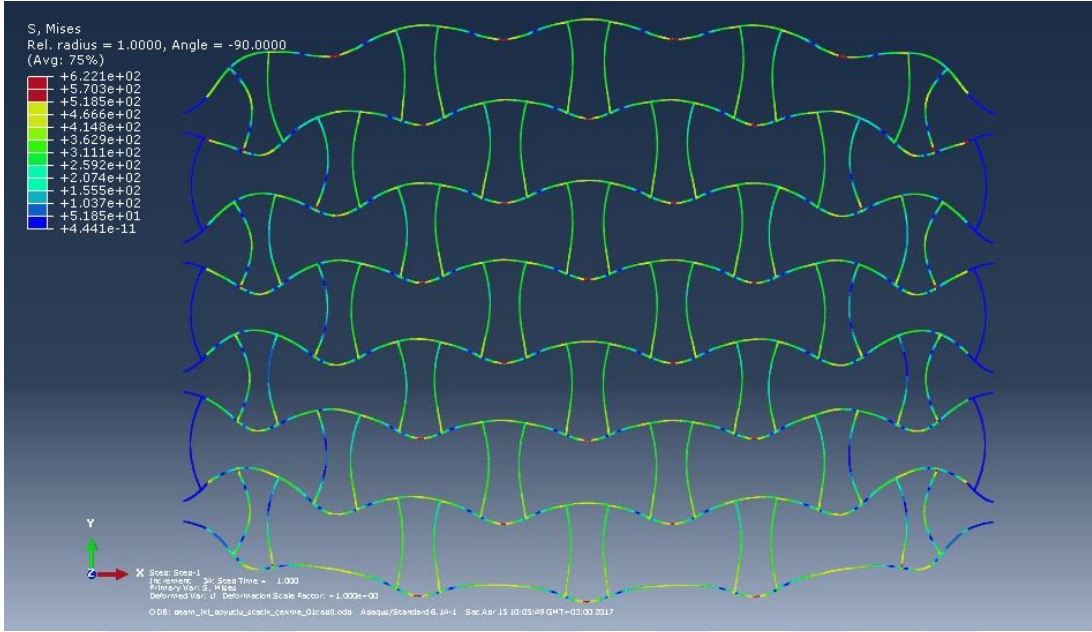


Şekil 3.11 : Çekme etkisinde, Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.

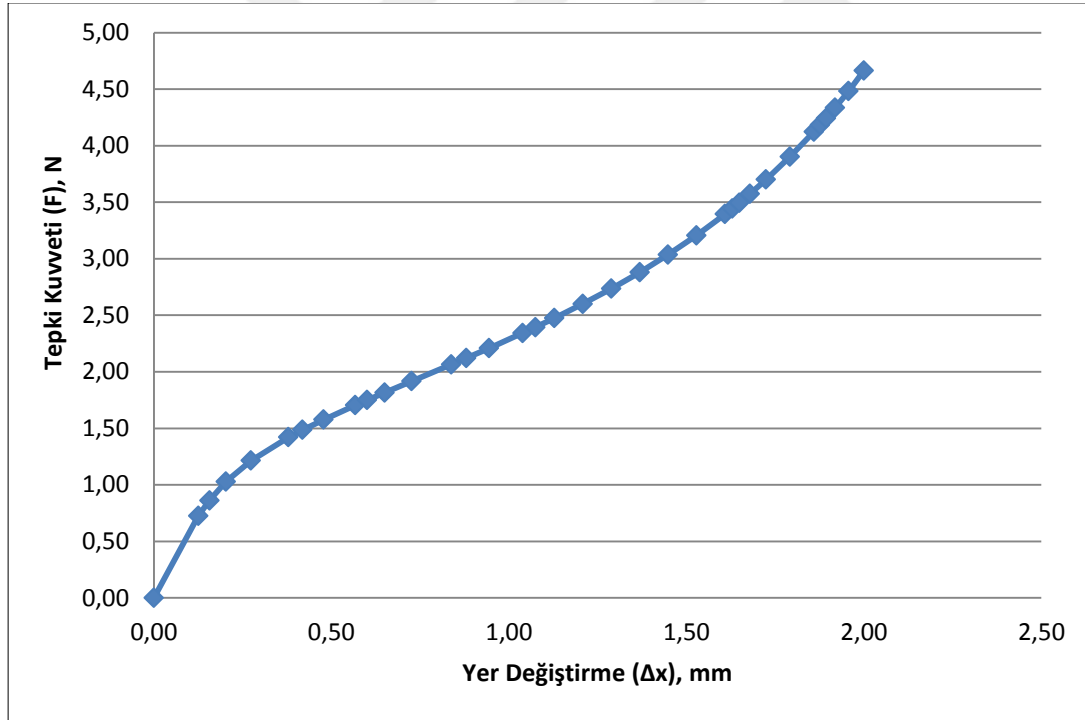
Şekil 3.11’ deki grafikten görülebileceği üzere, kafes yapının Poisson oranı negatiftir ve yaklaşık sabit bir değerdedir.

Çekme analizi sonucunda, yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı iki boyutlu mikro-kafes yapı için Şekil 3.12’ de görüldüğü gibidir. Elde edilen veriler Şekil 3.13’ teki tepki kuvveti-yer değiştirme diyagramına taşınmıştır.

Şekil 3.12 incelenecek olursa, yapının akma gerilmesi değerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Bu da mikro-kafes yapıda kalıcı deformasyon, diğer bir deyişle plastik şekil değişimi olduğu anlamına gelir. Plastik şekil değişimi kırmızı renkli bölgelerde açığa çıkmıştır, tasarım esnasında bu bölgelerin mukavemetini arttıracak değişiklikler yapılarak mikro-kafes yapının elastik bölgede kalması sağlanabilir.



Şekil 3.12 : Çekme analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 3.13 : Çekme analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değişirme grafiği.

Üç boyutlu mikro-kafes yapı için Von Mises gerilme dağılımı Şekil 3.14' te görüldüğü gibidir. Kuvvet-yer değişirme grafiği ise Şekil 3.15' te verilmiştir.

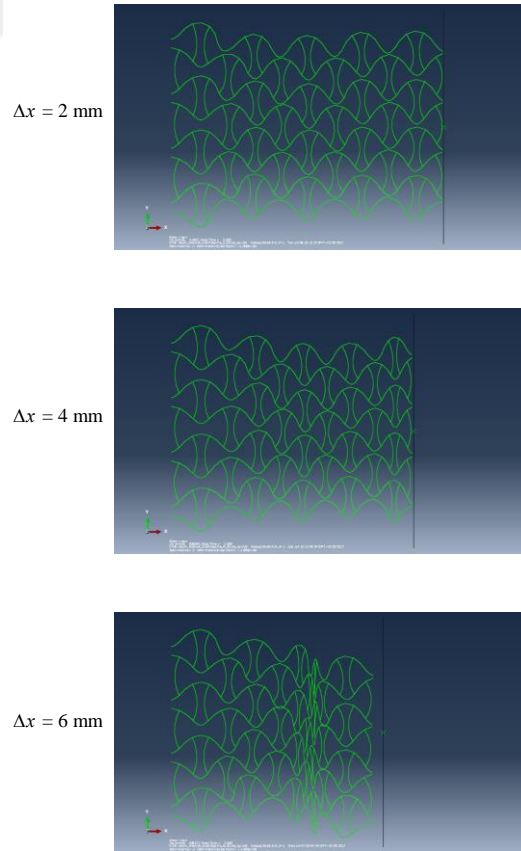
Benzer şekilde Şekil 3.14 incelenecek olursa, üç boyutlu mikro-kafes yapıda da plastik şekil değişiminin gerçekleştiği görülür.

3.4.1.2 Basma analizi

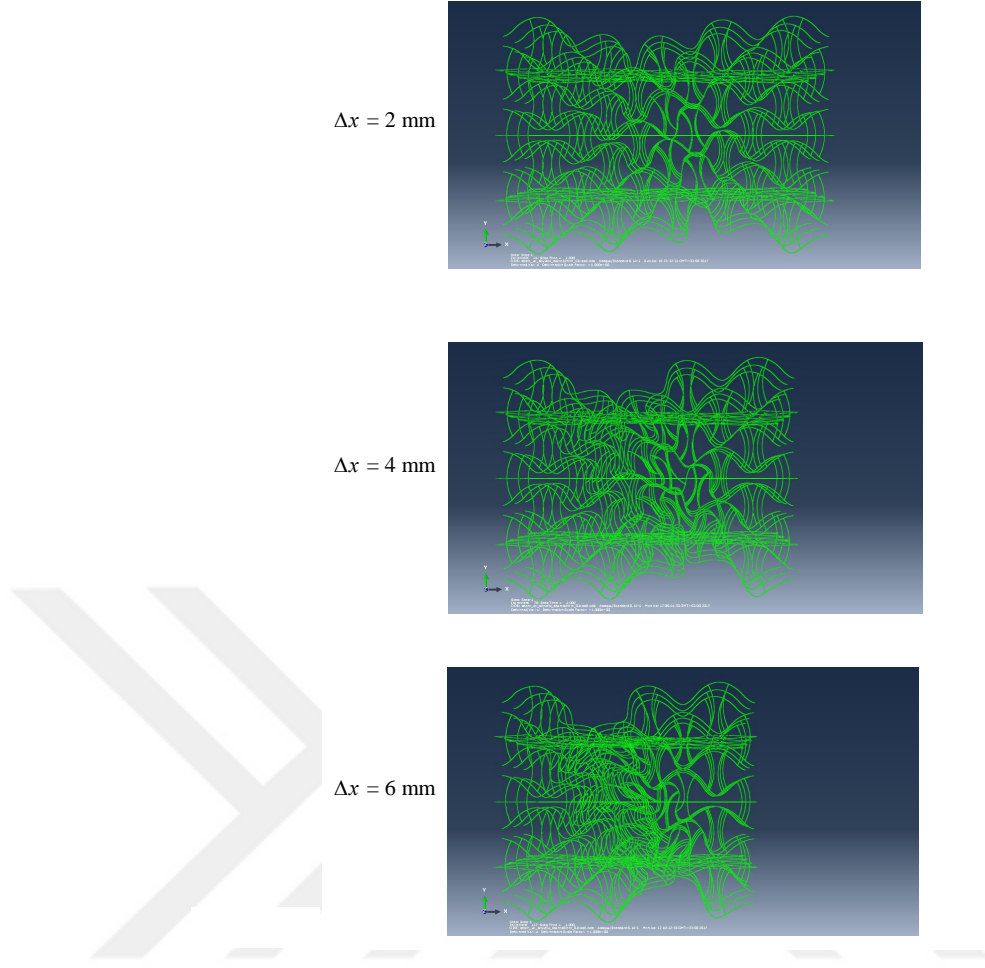
Basma analizi için, çekme analizinde olduğu gibi düşük karbonlu çelik, malzeme olarak atanmış ve yine çekme analizindeki gibi kiriş eleman (beam element) kullanılmıştır. Sınır koşulu olarak kafes yapının 1 mm' lik kısmı ankastre olarak belirlenirken, yer değiştirme mesafeleri sırasıyla 2 mm, 4 mm ve 6 mm olarak verilmiştir. Şekil 3.16' da basma analizi sonrası iki boyutlu plaka yapıda oluşan şekil değiştirmeler ve Şekil 3.17' de ise basma analizi sonrası üç boyutlu mikro-kafes yapıda oluşan şekil değiştirmeler görülmektedir.

Basma neticesinde, deformasyonun kafes yapının orta bölgesinde, çapraz bir hat üzerinde başladığı ve bu doğrultuda artarak ilerlediği şekilden anlaşılmaktadır.

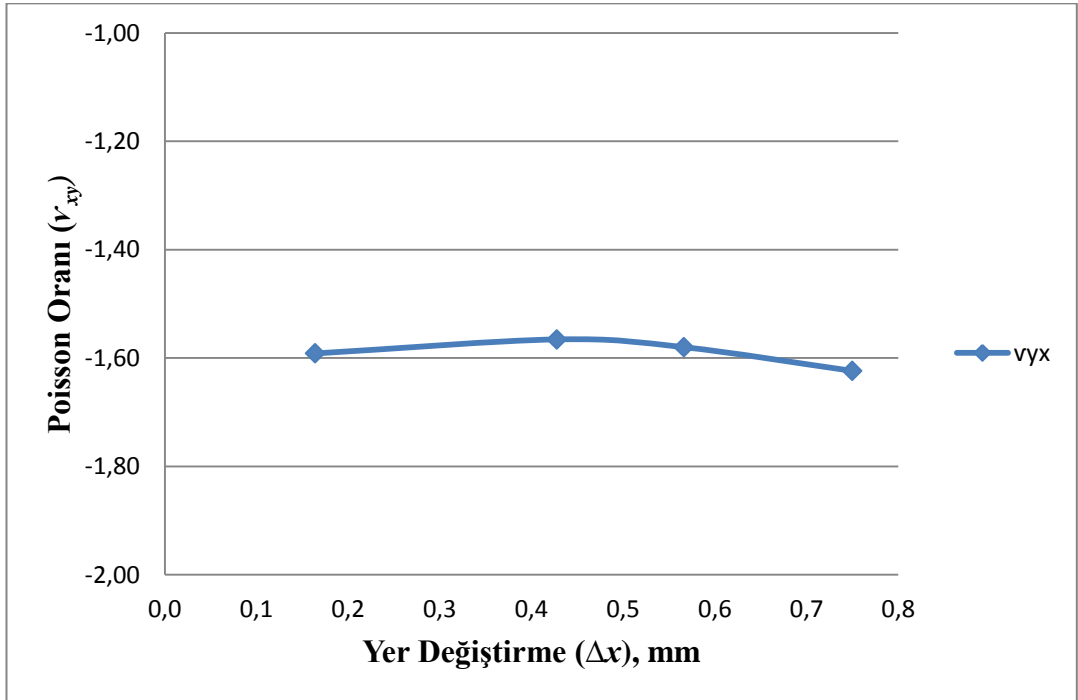
Kafes yapının negatif Poisson oranının basma analizinde değişip değişmediğini görmek için tekrar hesaplama yapılmıştır. Hesaplama yapılırken plaka yapının yine maksimum yer değiştirmeye maruz kalan noktaları kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 3.18' deki gibidir. Basma etkisinde de Poisson oranı negatiftir ve yaklaşık sabit bir değerdedir.



Şekil 3.16 : Basma analizi sonrası, deforme olmuş iki boyutlu mikro-kafes yapısı.

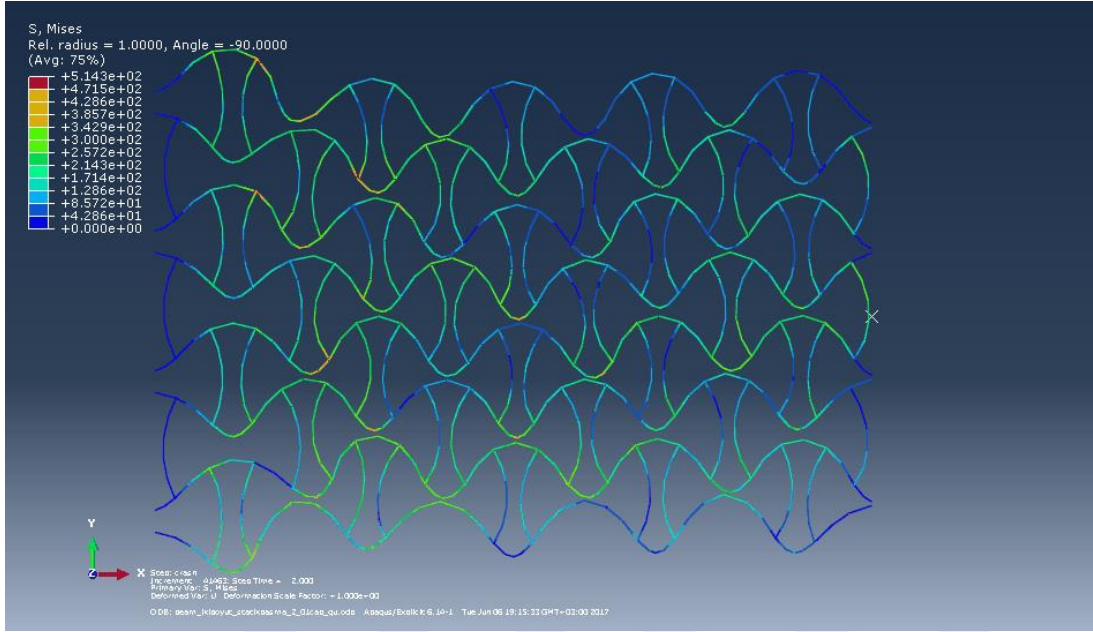


Şekil 3.17 : Basma analizi sonrası, deforme olmuş üç boyutlu mikro-kafes yapı.

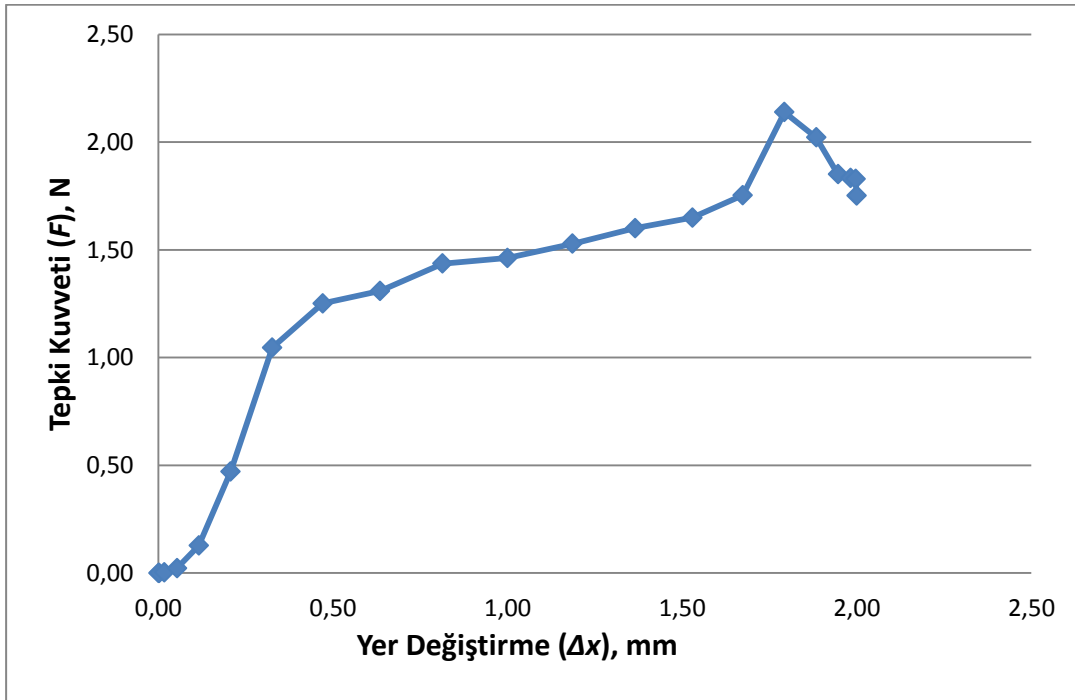


Şekil 3.18 : Basma etkisinde, Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.

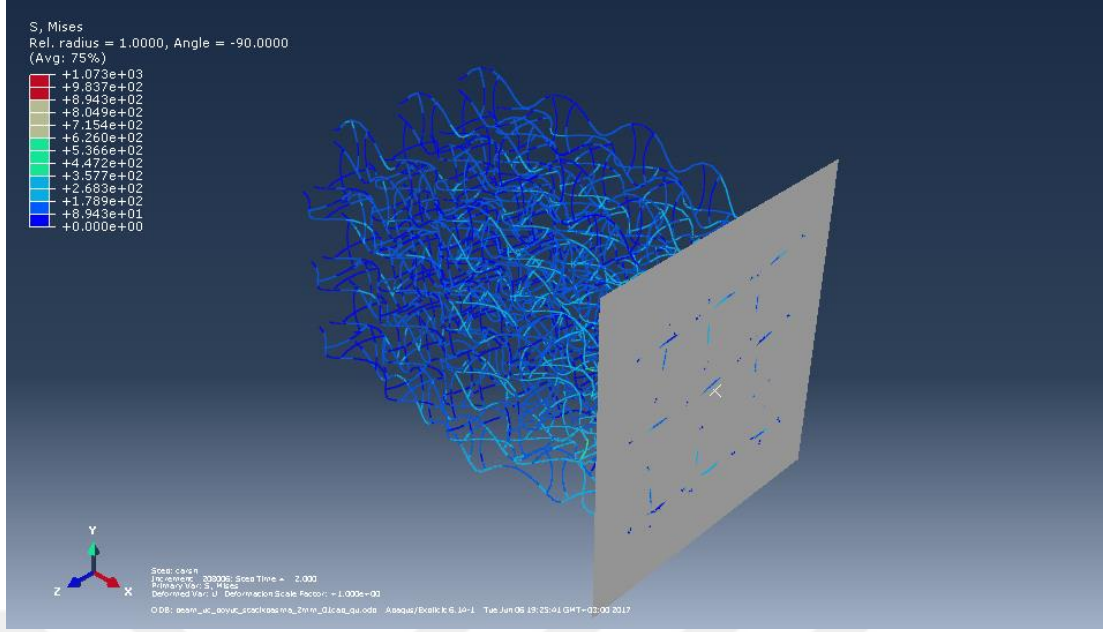
Basma analizi sonucunda, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı Şekil 3.19’ da görüldüğü gibidir. Elde edilen veriler Şekil 3.20’ deki kuvvet-yer değiştirme diyagramına taşınmıştır. Üç boyutlu mikro-kafes yapı için ise Von Mises gerilme dağılımı Şekil 3.21’ de görüldüğü gibidir. Kuvvet-yer değiştirme grafiği de Şekil 3.22’ de verilmiştir.



Şekil 3.19 : Basma analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.

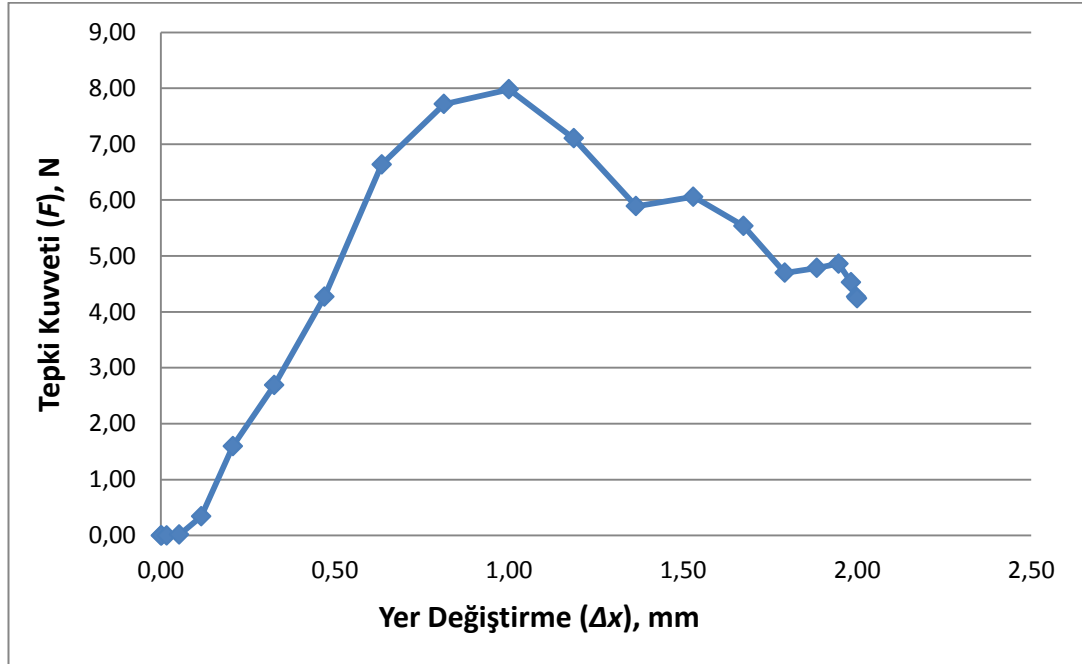


Şekil 3.20 : Basma analizi sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.21 : Basma analizi sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.

Bu çalışma kapsamında, çekme analizinde olduğu gibi, hem iki boyutlu mikro-kafes yapı hem de üç boyutlu mikro-kafes yapı için, sadece $-x$ ekseninden basma kuvvetine maruz kalma durumu incelenmiştir. $-y$ ve $-z$ eksenlerinden basma kuvvetine maruz kalan mikro-kafes yapılar için de benzer hesaplar yapılabilir ve aynı yöntemle sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 3.22 : Basma analizi sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.

3.4.2 Dinamik analiz

3.4.2.1 Darbe analizi

Çekme ve basma analizlerinde olduğu gibi, darbe analizi için de malzeme olarak düşük karbonlu çelik seçilmiştir. Malzeme özellikleri daha önce Denklem 3.1, Denklem 3.2 ve Denklem 3.3' te belirtildiği şekilde alınmıştır.

Darbe analizi kapsamında uygulanan sınır koşullarından biri mikro-kafes yapının bir tarafının 1 mm' lik mesafesinin ankastre olarak belirlenmesidir. Diğer bir sınır koşulu ise, darbe etkisi yapacak rijit plakaya -x doğrultusunda hareket imkanı verip, diğer eksenleri ve rotasyonların serbestlik derecelerini sıfırlamaktır. Rijit plakanın kütlesi 100 kg olarak alınmıştır.

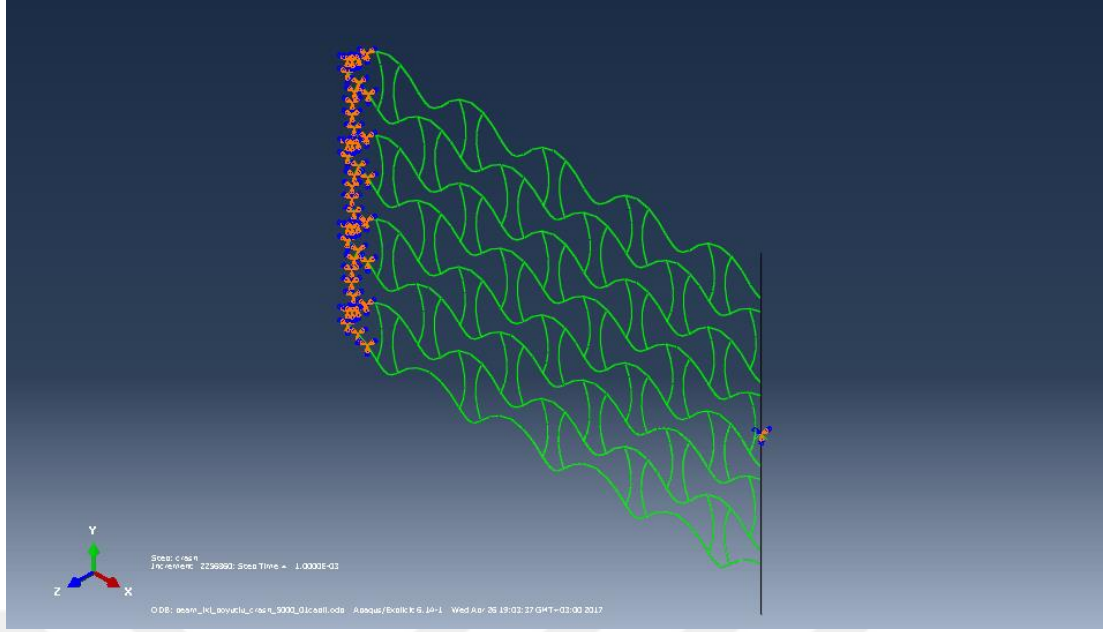
Darbe analizi kapsamında hareket halinde olacak parça rijit plakadır. Rijit plakanın hızı 1000 mm/s, 5000 mm/s ve 10000 mm/s olacak şekilde analiz tekrar edilmiş, böylece farklı hızların sonuçlara olan etkisi karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

Darbe analizi sonrasında, öncelikle yapının nasıl bir deformasyona uğradığı görsel olarak incelenmiştir. Şekil 3.23 ve 3.24' te sırasıyla çarpma öncesi ve 5000 mm/s hızla çarpma sonrası iki boyutlu mikro-kafes yapı ve rijit plaka görülmektedir. Şekil 3.25 ve 3.26' de ise üç boyutlu mikro-kafes yapı için deformasyon öncesi ve sonrası görüntüleri verilmiştir.

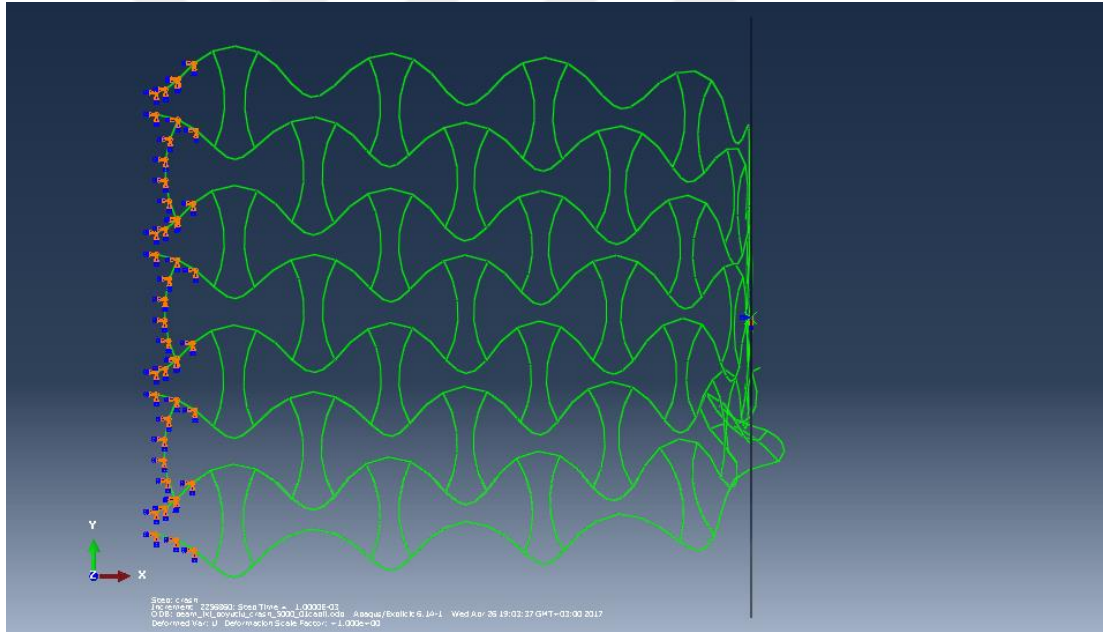
Bu analiz neticesinde, yapının darbe sönümlenme özelliği hakkında bilgi sahibi olunmak istenmiştir. Bununla beraber, hem iki boyutlu mikro-kafes yapı hem de üç boyutlu mikro-kafes yapı darbe esnasında plastik şekil değişimine maruz kalmıştır. Yani, mikro-kafes yapı elastik bölgede çalışmadığı için rijit plaka darbe sonrasında yapıdan uzaklaşsa dahi, yapı eski halini almayacaktır. Tasarım aşamasında, mikro-kafes modelinde çeşitli değişiklikler yaparak, yapının elastik bölgede kalması sağlanırsa, fazla sayıda darbeye maruz kalma potansiyeli olan bir yapı ortaya çıkabilir, bu da kullanım alanı olarak daha fazla sayıda çeşitlilik sunmuş olur.

Bununla beraber, araç tamponu örneğinde olduğu gibi, tek bir darbe anına maruz kalacak ve dolayısıyla plastik şekil değişimi gerçekleşecek bir yapı tasarımı da oldukça gereklidir.

Bu çalışma kapsamında, tek bir darbe anına maruz kalacak bir yapı düşünülmüştür.



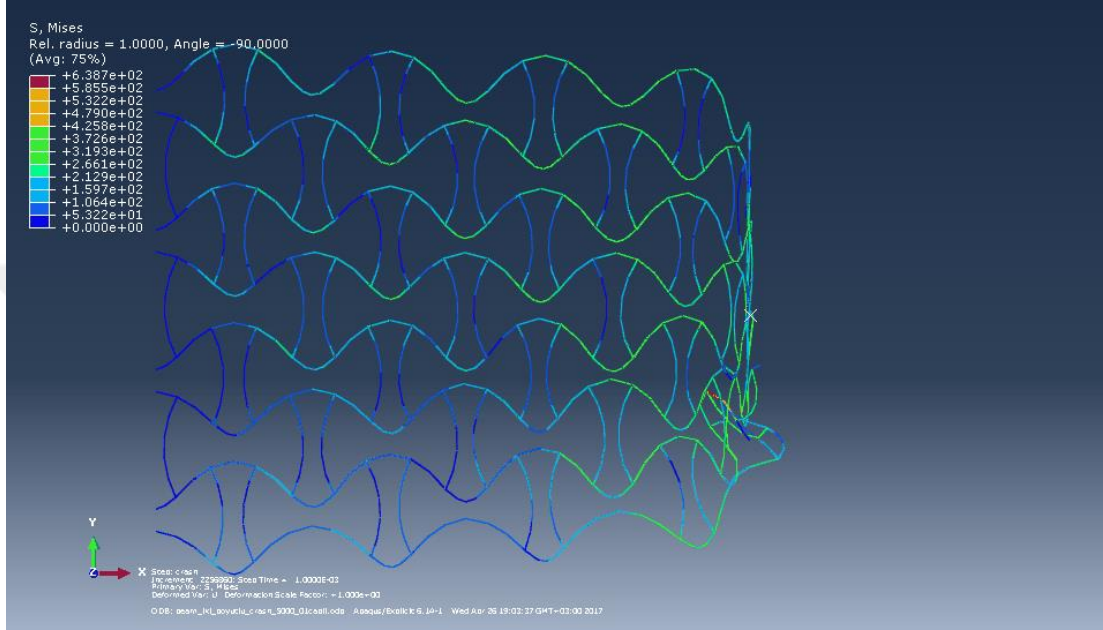
Şekil 3.23 : 5000 mm/s hızla çarpma öncesi, iki boyutlu mikro-kafes yapı ve rijit plaka.



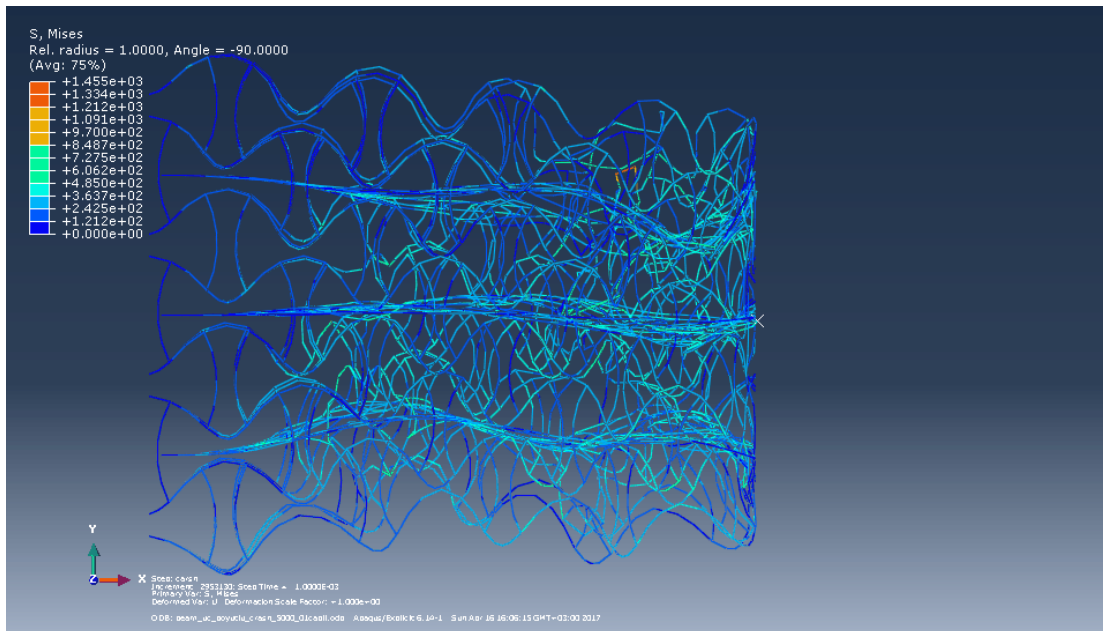
Şekil 3.24 : 5000 mm/s hızla çarpma sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapı ve rijit plaka.

Darbe analizinde ortaya çıkan Von Mises gerilme dağılımı sırasıyla iki boyutlu mikro-kafes yapı için Şekil 3.27’ de ve üç boyutlu mikro-kafes yapı için Şekil 3.28’ de gösterilmiştir. Gerilme dağılımından yapının elastik bölgede kalmadığı, plastik bölgede de çalıştığı görülmektedir. Elde edilen veriler kuvvet-yer değiştirme diyagramına da taşınmıştır. Bu diyagramlar iki boyutlu mikro-kafes yapı için Şekil 3.29 ve üç boyutlu mikro-kafes yapı için Şekil 3.30’ daki gibidir.

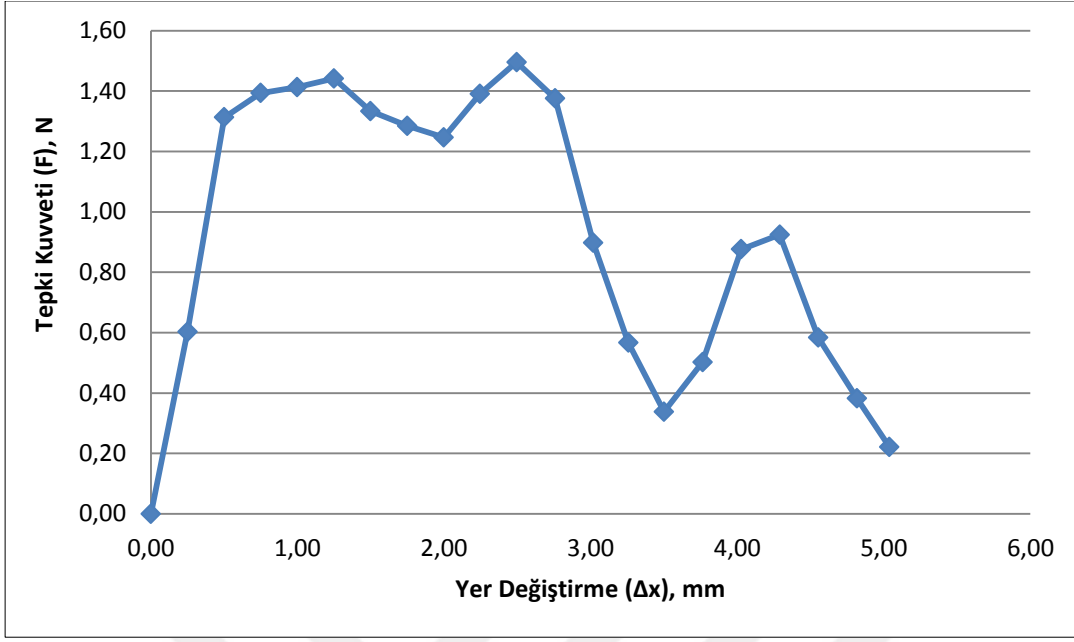
dolayısıyla benzer davranış sergilediği görülebilir. Fark olarak, üç boyutlu yapının kuvvet değerlerinin, iki boyutlu yapınınkinden daha büyük bulunduğu söylenebilir. Bu fark, üç boyutlu kafes yapının daha rijit ve şekil değişimine daha çok direndiğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple üç boyutlu kafes yapının deformasyonu için daha büyük kuvvetlere ihtiyaç vardır. Bununla birlikte üç boyutlu yapı daha rijit olduğu için, grafik eğimindeki dalgalanmalar iki boyutlu yapıya göre daha azdır.



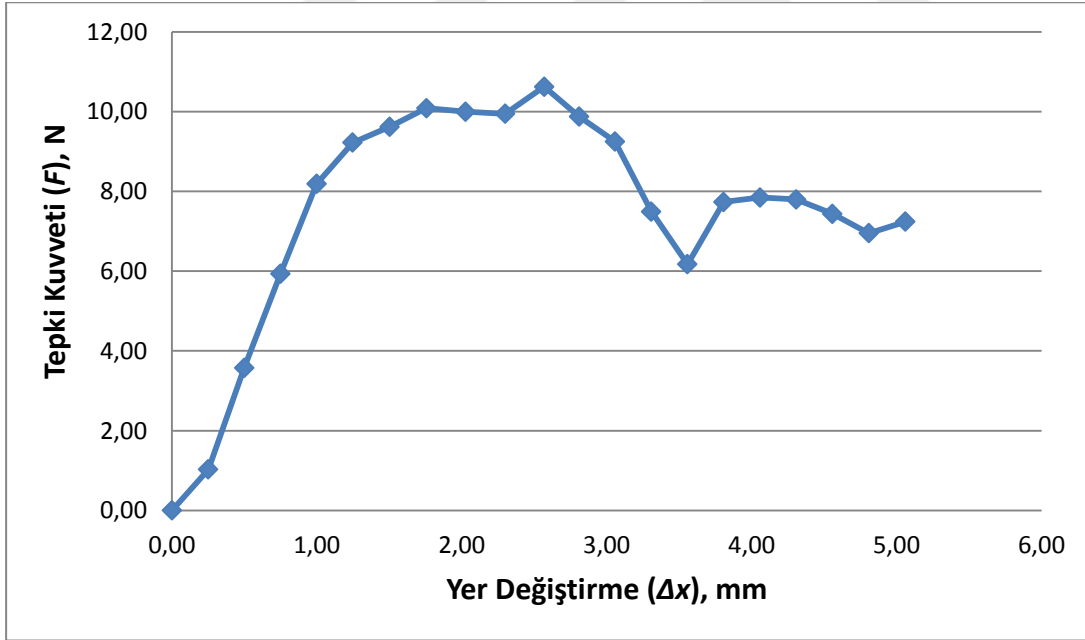
Şekil 3.27 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 3.28 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait Von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 3.29 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değişirme grafiği.



Şekil 3.30 : 5000 mm/s' lik hızla yapılan çarpma sonrası, üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değişirme grafiği.

Bu çalışma kapsamında, hem iki boyutlu mikro-kafes yapı hem de üç boyutlu mikro-kafes yapı için, sadece $-x$ ekseninden darbe kuvvetine maruz kalma durumu incelenmiştir. $-y$ ve $-z$ eksenlerinden darbe kuvvetine maruz kalan mikro-kafes yapılar için de benzer hesaplar yapılabilir ve aynı yöntemle sonuçlar elde edilebilir.

3.4.3 Analizlerden elde edilen bulguların değerlendirilmesi

Yapılan analizler neticesinde, mikro-kafes yapı sistemine dair çeşitli bulgular elde edilmiştir. Öncelikli olarak, yapının negatif Poisson oranına sahip olduğu tespiti yapılmıştır. Birçok malzemede Poisson oranı 0.50 değerini geçmezken, tasarlanan mikro-kafes sisteminde 1.30 ile 1.70 arasında değişkenlik göstermektedir. Bu husus, kafes yapının kullanım alanlarını belirlemek için kritik bir noktadır.

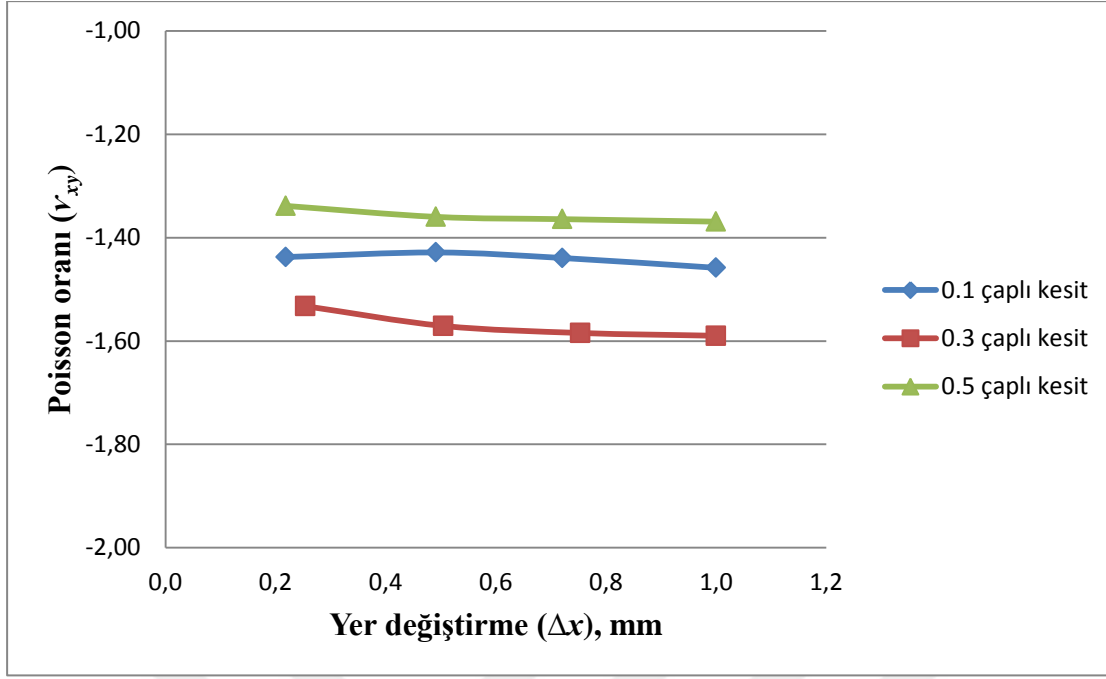
Farklı çaplardaki kiriş elemanların Poisson oranına etkisi Şekil 3.31 ve Şekil 3.32' deki gibidir. Çekme etkisi altında, kesit çapı ile Poisson oranı arasında doğrusal bir ilişkiden söz etmek mümkün değildir. Yapının çekme kuvveti altında açılma miktarını kontrol altında tutmak için kesit kalınlıklarında değişiklikler yapılabilir. Basma etkisi altında ise, Poisson oranlarında düzensizliğin daha fazla olduğu görülür. Basma etkisinde, en büyük Poisson oranına sahip kesit çapı 0.3 iken en düşük Poisson oranına sahip kesit çapı ise 0.5' tir. Kafes yapı kuvvet altında basmaya maruz kalırken, yapıya ait kirişler birbirleri ile temas etmeye başlar ve bu temas arttıkça kafes yapının rijitliğinde de artış olur. Dolayısıyla, temas etme biçimi, süresi ve yoğunluğuna bağlı olarak Poisson oranında düzensizlikler görülür. Bu durum, basma kuvveti altında yapının kapanma miktarını kontrol altında tutmak için, parametre olarak kesit çap değişkenliğini almanın yanıltıcı olacağını göstermektedir. Poisson oranı ile kesit çapı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmamaktadır.

Şekil 3.33' te ise çekme kuvveti altında, farklı kesit çaplarına ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı verilmiştir.

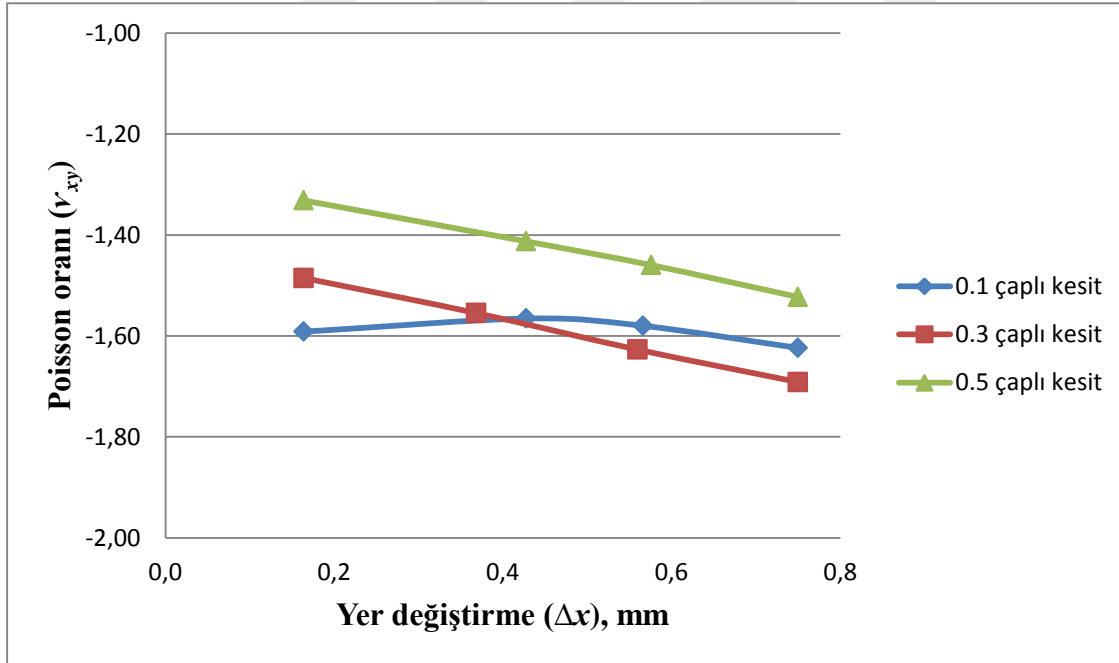
Kesit çap değeri arttıkça, kafes yapıya uygulanması gereken kuvvet de artmaktadır. Her bir kesit çapı için grafikteki eğriler birbirlerinin ötelenmiş halidir. Daha önce Şekil 2.15' te açıklandığı üzere, kafes yapının çekmeye karşı davranışı eğilme baskın karakterdedir.

Mikro-kafes yapının basmaya karşı verdiği tepki incelenecek olursa, daha önce Şekil 3.17 ve 3.18' de belirtildiği üzere, biçim şekil değişiminin çapraz eksen hattında başladığı ve yine aynı hat üzerinde katlanarak ilerlediği anlaşılmaktadır. Farklı deplasmanlardaki şekil değişimleri, sistemin basma kuvveti davranışını görsel olarak ortaya koymaktadır.

Daha önce Şekil 2.16' da açıklandığı üzere, mikro-kafes yapının basmaya karşı davranışı çekme-basma baskın karakterdedir.



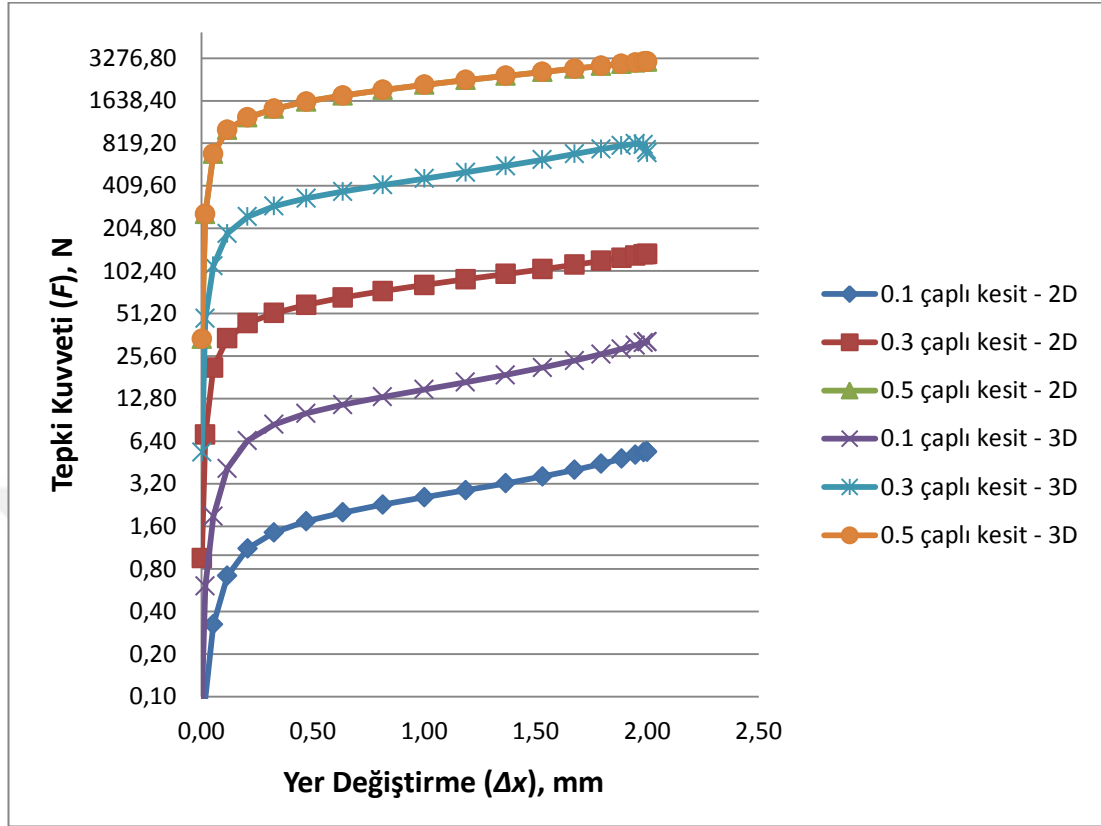
Şekil 3.31 : Farklı kesit değerleri için, çekme etkisinde Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.



Şekil 3.32 : Farklı kesit değerleri için, basma etkisinde Poisson oranının yer değiştirmeye göre değişimi.

Şekil 3.34' te ise basma kuvveti altında, farklı kesit çaplarına ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı verilmiştir. Basma kuvveti altında, her kesit çapı için, kuvvet değerlerinde belli bir noktadan sonra burkulma kaynaklı ani düşüşler meydana

gelmektedir. Kesit çapı arttıkça, yapının dayanabildiği kuvvet değeri artmakta, böylece sistem basmaya karşı mukavemet kazanmaktadır.

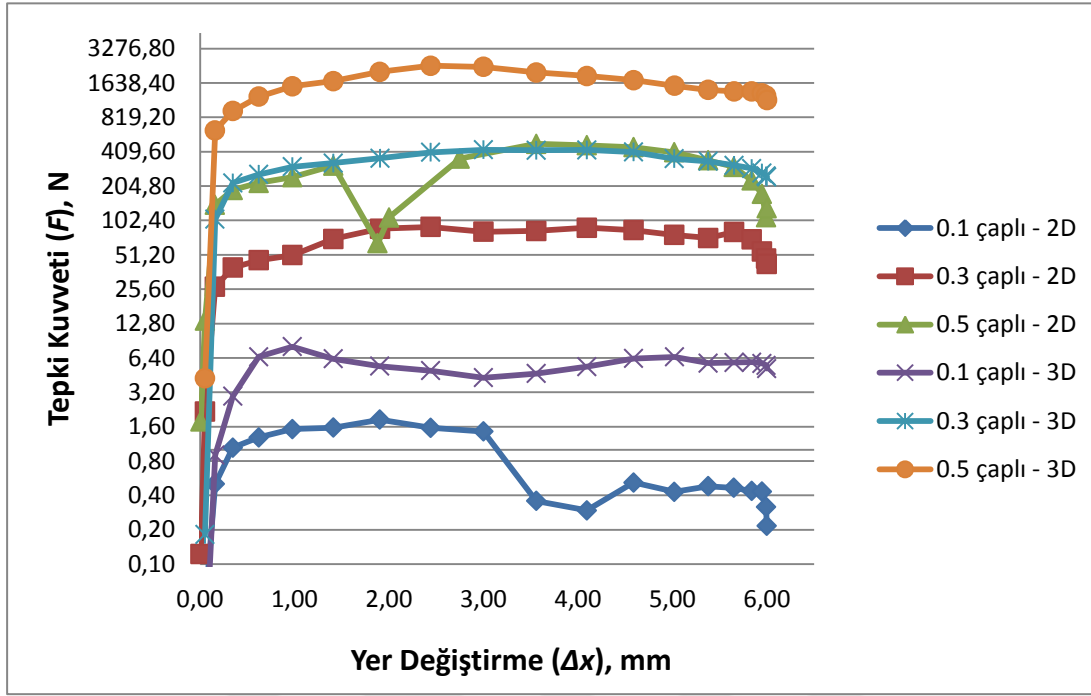


Şekil 3.33 : Farklı kesit değerleri için, çekme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrisi.

Çekme ve basma gerilmesi eğrileri karşılaştırılacak olursa, grafikler arasında dramatik farklar olduğu söylenebilir. Bu da bize çekme ve basma davranışlarının sistem üzerinde aynı etkiye sahip olmadığını ve sistemin bu gerilmelere karşı davranışının benzer olmadığını göstermektedir.

Darbe analizi 1000 mm/s, 5000 mm/s ve 10000 mm/s olacak şekilde farklı darbe hızlarıyla tekrarlanmış ve böylece hız faktörünün mevcut yapıya etkisi ortaya konulmuştur. Farklı darbe hızlarında ortaya çıkan kuvvet dağılımı şekil 3.35, 3.36, 3.37, 3.38, 3.39 ve 3.40' da gösterilmiştir. En yüksek kuvvete ulaşılan kafes yapısı, 0.5 mm kesit çapına sahiptir ve 10000 mm/s hızla çarpmaya maruz kalmıştır. Yine her kesit çapı için maksimum kuvvet maksimum çarpma hızında meydana gelmiştir.

Görüldüğü üzere, kafes yapısının kesit çapı değiştikçe, darbe hızlarına karşı gösterilen davranış da farklı olmaktadır. İki boyutlu ve üç boyutlu mikro-kafes yapılar karşılaştırıldığında ise, üç boyutlu yapı rijitliğinin daha fazla olmasından ötürü kuvvet dağılımının, iki boyutlu yapıya göre daha düzgün olduğu söylenebilir.



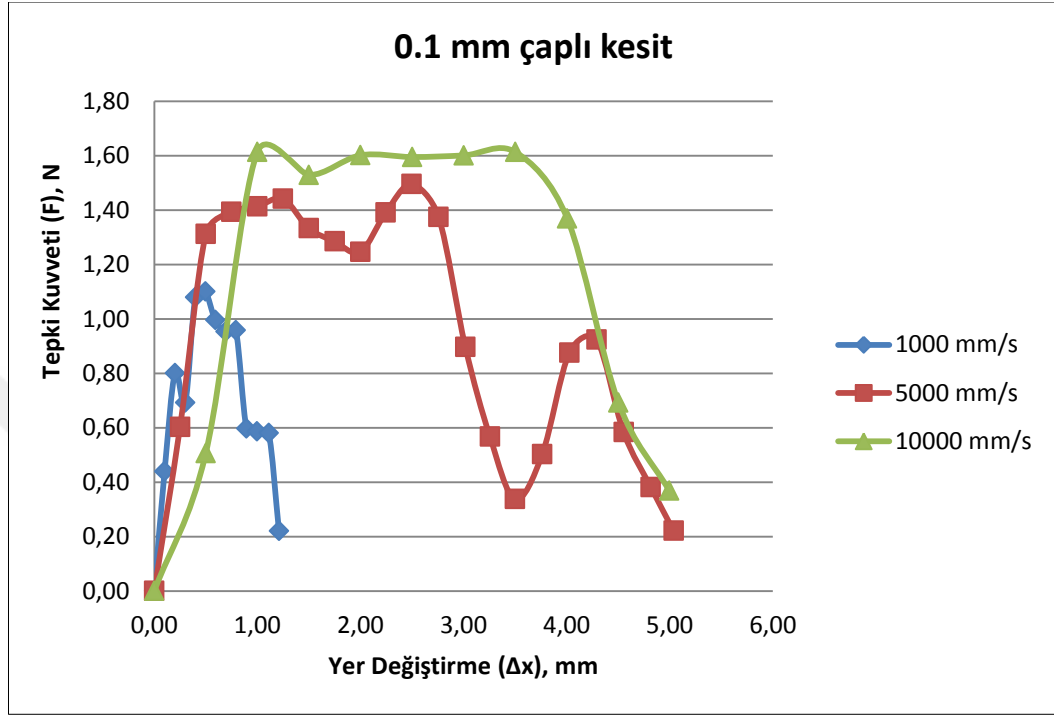
Şekil 3.34 : Farklı kesit değerleri için, basma analizi kuvvet-yer değiştirme eğrisi.

İki boyutlu mikro-kafes yapı incelenecek olursa; 0.1 mm kesit çapına sahip yapıda, en yüksek kuvvet değerine 10000 mm/s hız ile, en düşük kuvvet değerine ise 1000 mm/s hız ile ulaşıldığı görülmektedir. Maksimum ve minimum hızlarda görece düzenli bir kuvvet artışı ve azalışı olurken, 5000 mm/s' lik hızda daha düzensiz iniş ve çıkışlar mevcuttur. Bunun sebebi 5000 mm/s hızda yapının katlanarak deforme olmasıdır. Katlanan yapı elemanları birbirlerine temas edene kadar kuvvet değeri düşmektedir. Birbirlerine temas ettikten sonra ise, yapının rijitliği artmakta, bu sebeple kuvvet değeri de artmaktadır.

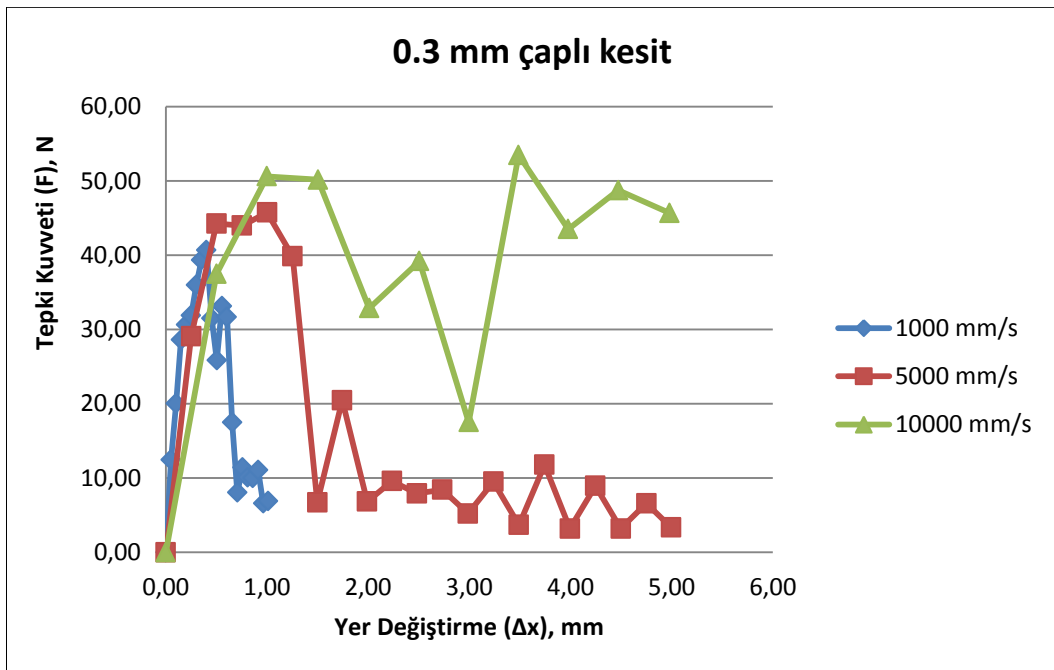
0.3 mm kesit çapına sahip yapıda ise, 1000 ve 5000 mm/s hızda düzgün bir kuvvet artışı, ani bir kuvvet düşüşü ve daha sonra kuvvetin neredeyse sabit kalışı görülmektedir. Belli bir değer aralığında sabit kalan kuvvet, bu aralık boyunca iniş çıkışlar göstermektedir. Bunun sebebi kafes yapıya ait kirişlerin burkularak deforme olmasıdır. Şekil değişimine direnirken artan kuvvet, burkulma anında düşmektedir. 10000 mm/s' lik hızda pik değerinin yaklaşık 3.5 mm' ilk yer değiştirmede gerçekleşmesinin nedeni ise, yapı kirişlerinin birbirlerine iyice yaslanarak deformasyonu zorlaştırmasıdır.

0.5 mm kesit çapına sahip yapıda, her üç hız için de pik değerine başlangıçta ulaşıldığı ve gittikçe kuvvet değerlerinin azaldığı görülmektedir. İki boyutlu mikro-

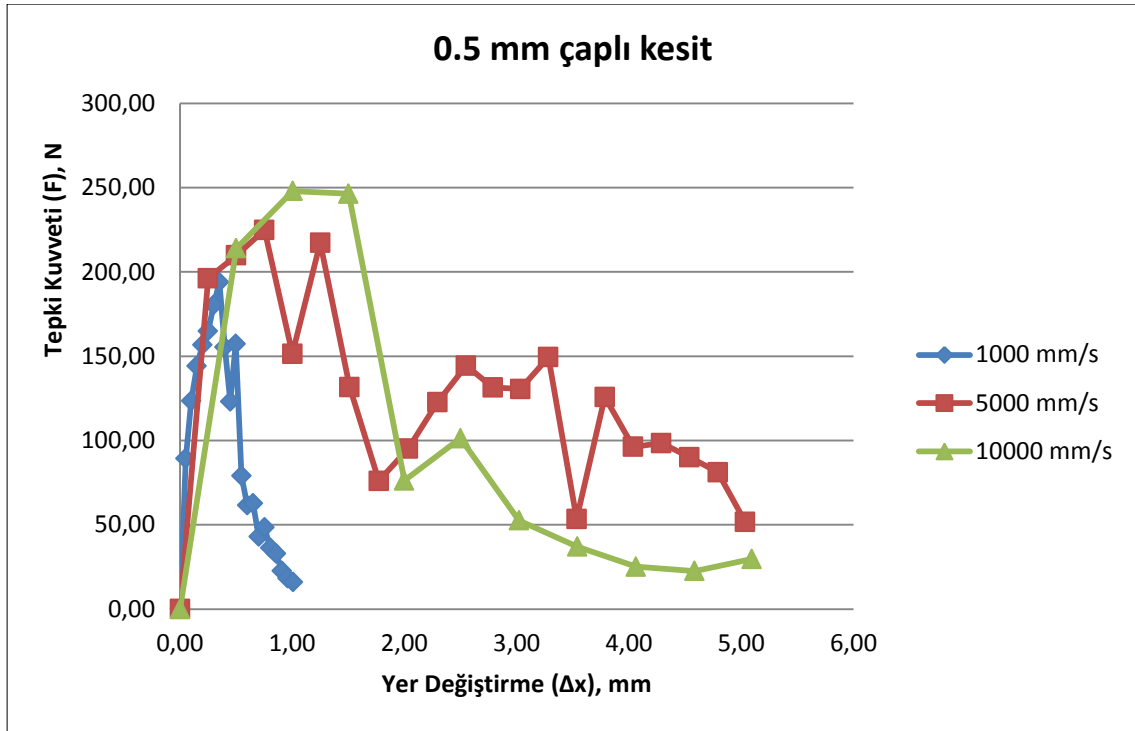
kafes yapıya ait üç grafikte de 1000 mm/s hızla gerçekleştirilen darbelerde, yapının 1 mm' lik yer değiştirmeye uğradığı görülmektedir. Farklı hızlardaki darbe analizleri eşit zaman aralıklarında gerçekleştirildiği için yer değiştirmelerin farklı olması beklenen bir durumdur.



Şekil 3.35 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.1 mm kesit çapı için).



Şekil 3.36 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.3 mm kesit çapı için).

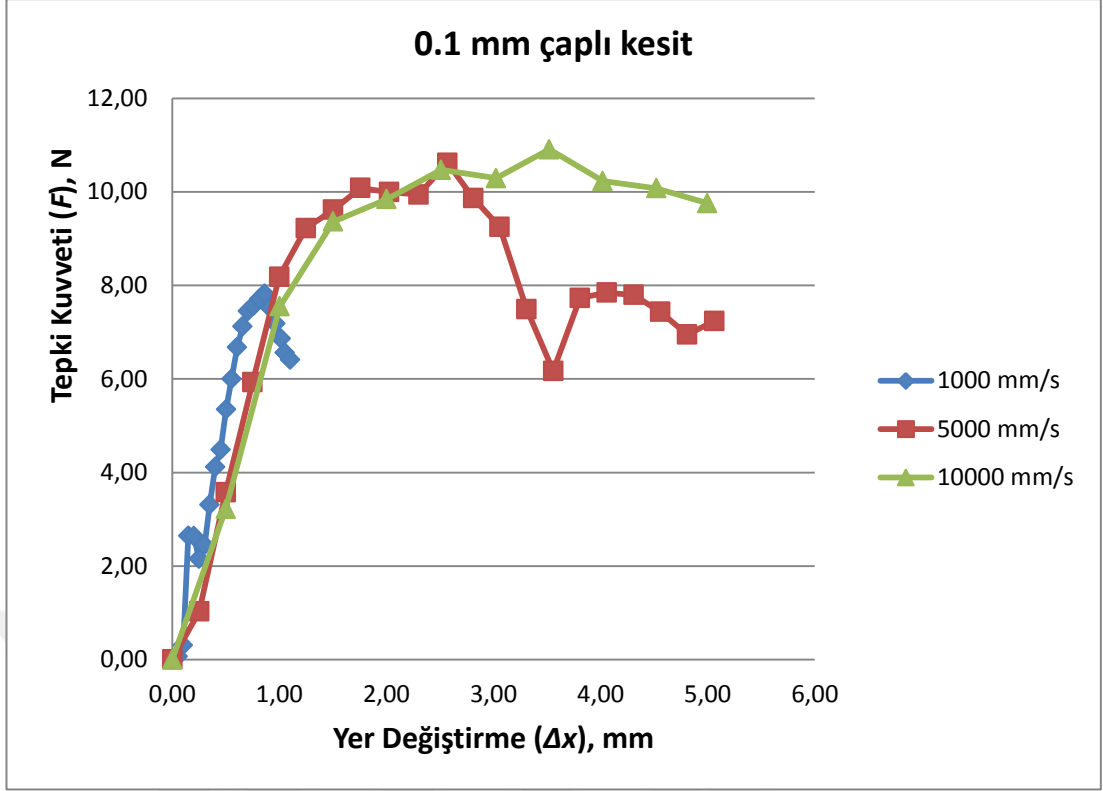


Şekil 3.37 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası iki boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.5 mm kesit çapı için).

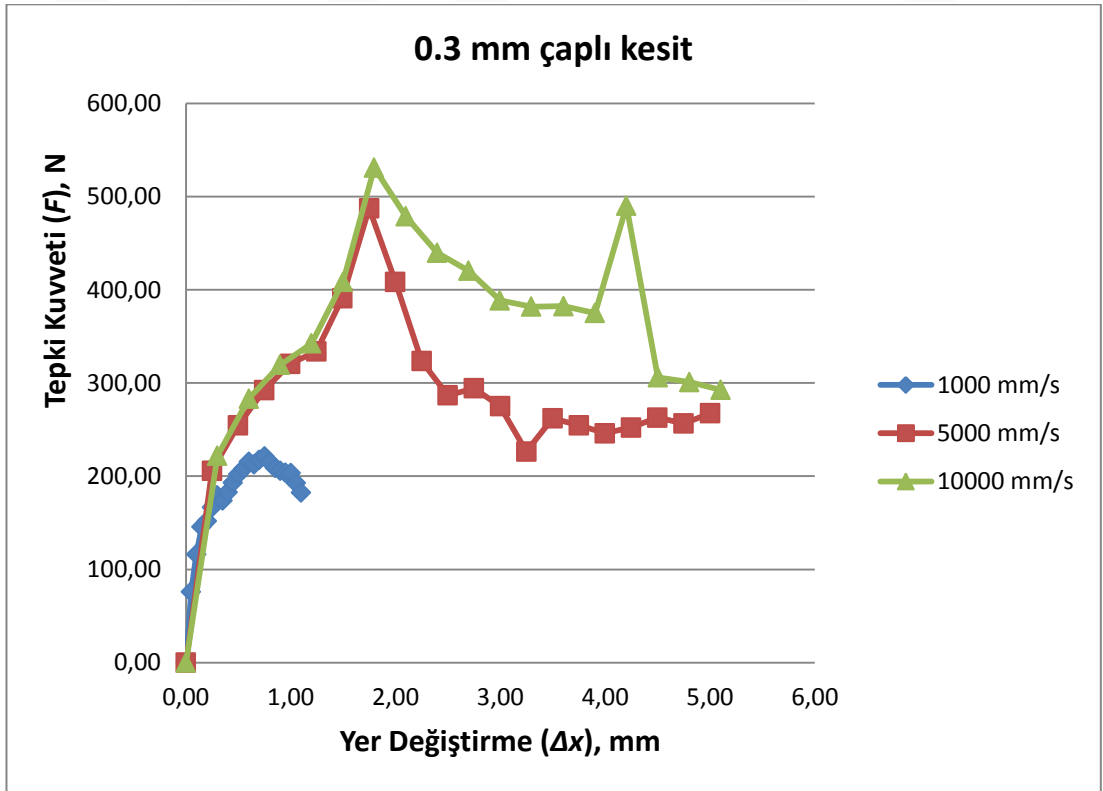
Üç boyutlu mikro-kafes yapı incelenecek olursa; 0.1 mm kesit çapına sahip yapıda, çok daha düzenli bir grafik dağılımı görülür. Yapının enerji sönümlenme özelliği değerlendirilecek olursa, grafik eğrisi altında kalan alanın maksimum olduğu durumda, enerji sönümlenme miktarı da maksimumdur. Dolayısıyla yapının en fazla enerji sönümlenmesini 10000 mm/s' hızda gerçekleştirdiği söylenebilir.

0.3 mm çaplı kesite sahip yapıda ise, iki boyutludakine benzer şekilde 10000 mm/s' lik hızda iki pik değeri oluştuğu görülür. Bu durum yine, yapı kirişlerinin birbirlerine yaslanması ile rijitliğin artması kaynaklıdır.

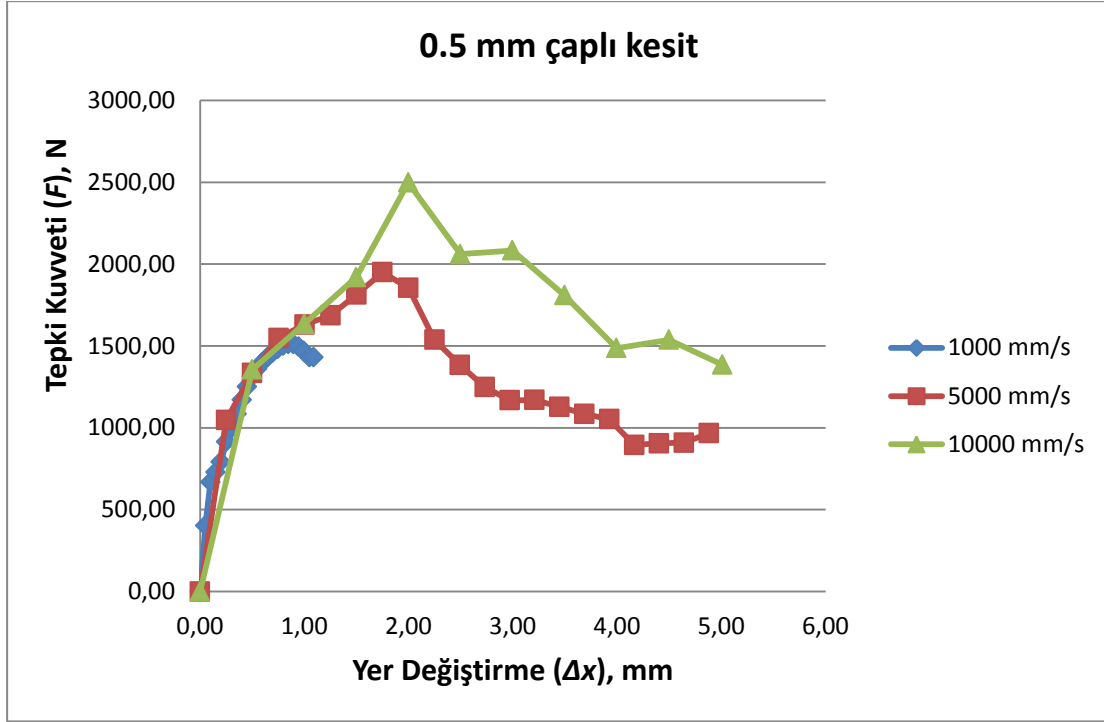
0.5 mm çaplı kesite sahip yapıda, nispeten düzenli bir kuvvet artışı ve azalışı görülmektedir. Üç boyutlu mikro-kafes yapı, iki boyutlu mikro-kafes yapılardan oluştuğu için, eğriler hemen hemen benzer davranışlar sergilerler. Fakat kuvvet değerleri, üç boyutlu yapıda, iki boyutlu ile kıyaslandığında oldukça fazladır. Fark yaklaşık on mislidir, bu durum da üç boyutlu yapının sağlamlığına dair fikir vermektedir.



Şekil 3.38 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.1 mm kesit çapı için).



Şekil 3.39 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası üç boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.3 mm kesit çapı için).



şekil 3.40 : Farklı hız değerleri için, darbe sonrası u boyutlu mikro-kafes yapıya ait kuvvet-yer değiştirme diyagramı (0.5 mm kesit çapı için).

4 . SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde sürekli olarak gelişen ve yenilenen teknolojiyle beraber, daha mukavim fakat aynı zamanda daha hafif, kullanım alanındaki dokuya çok daha fazla uyum sağlayabilme potansiyeli olan malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda artış görülmüştür. Bunlardan biri de gözenekli malzemelerdir. Çalışma kapsamında gözenekli malzeme grubundan mikro-kafes yapılar ele alınmış ve çalışma mikro-kafes yapılar üzerinden şekillenmiştir.

Bu çalışmayla öncelikli olarak hedeflenen, negatif Poisson oranına sahip yeni bir mikro-kafes yapı tasarımı yapmaktı. Gerçekleştirilen analizler ve elde edilen verilerle, oluşturulan üç boyutlu mikro-kafes yapının negatif Poisson oranına sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla çalışma öncelikli hedefine ulaşmıştır. Bununla beraber bazı konular üzerine yapılacak çalışmalarla, araştırma alanı derinleştirilebilir:

Kullanılan mikro-kafes yapı numunesinin boyutları değiştirilerek, farklı büyüklüklerdeki numunelerin sonuçlara etkisi olup olmadığı incelenebilir.

Mikro-kafes yapının negatif Poisson oranı değerinin artırılması ileriye dönük çalışmalar içerisinde düşünülebilir. Hangi parametrelerde değişiklik yapılarak artış sağlanabileceği araştırılabilir veya farklı bir model tasarlanılarak Poisson oranı değiştirilebilir.

Farklı malzemeler kullanılmak suretiyle analizler tekrarlanabilir. Metal ve ametal malzemelerle kafes yapının davranışı ölçülebilir ve böylece potansiyel kullanım alanları daha doğru belirlenebilir.

Çeşitli yapısal kusurlar modellemeye dahil edilebilir. Hiçbir yapı kusursuz değildir ve yapı içindeki kimi kusurlar dezavantaj yaratırken kimileri de avantaj sağlarlar. Olası kusurlar analize dahil edildiğinde gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek mümkündür.

Bu çalışma kapsamında, prototip üretimi yapılmamıştır. Tasarlanan yapılar prototip olarak üretilebilir ve test edilebilir. Böylece hem test hem de analiz sonuçları karşılaştırılıp doğrulanabilir.



KAYNAKLAR

- Ashby, M.F., Deshpande, V.S., Fleck, N.A.** (2001). Effective properties of the octet-truss lattice material, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 49, 1747-1769.
- Ashby, M.F., Deshpande, V.S., Fleck, N.A.** (2010). Micro-architected materials: past, present and future, *Proc. R. Soc. A* 466, 2495-2516.
- Ashby, M., Evans, F., Fleck, A.G., Gibson, N.A., Hutchinson, L.J. & Wadley, J.W.** (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Boston, Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M.F., Evans, E.G., Fleck, N.A., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G.** (2001). The topological design of multifunctional cellular metals, *Progress in Material Science* 46, 309-327.
- Ashby, M.F., Gibson, L.J.** (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge, Cambridge University.
- Ashraf, M., Hazellshed, P.J., Mines, R.A.W., Rashed, M.G.** (2016). Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications, *Materials and Design*, 518-533.
- Brooks, W., Mckown, S., Mines, R., Sutcliffe, C.J.** (2010). The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*.
- Caiazzo, F., Campanelli, S.L., Cardaropoli, F., Contuzzi, N., Ludovico, A.D., Sergi, V.** (2014). Manufacturing and Characterization of Ti6Al4V Lattice Components Manufactured by Selective Laser Melting, *Materials* 7, 4803-4822.
- Cantwell, W.J., Mines, R.A.W., Smith, M., Tsopanos, S., Ushijima, K.** (2011). An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures, *Journal of Sandwich Structures and Materials*.
- Dharmasena, K., Evans, A.G., Wadley, H.N.G., Wang, J.** (2003). On the performance of truss panels with Kagome cores, *International Journal of Solids and Structures* 40, 6981-6988.
- Evans, A.G., Fleck, N.A., Wadley, H.N.G.** (2003). Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, *Composites Science and Technology* 63, 2331-2343.

- Evans, A.G., Schwartz, D.S., Shih, D.S., Wadley, H.N.G.** (1998). Porous and Cellular Materials for Structural Applications, *Materials Research Society*.
- Fang, D., Zhang, Y., Xue, Z.** (2009). Deformation and Failure Mechanisms of Lattice Cylindrical Shells Under Axial Loading, *International Journal of Mechanical Sciences*.
- Gümrük, R.** (2012). *Seçici Lazer Ergitme Yöntemi İle Üretilen Mikro Kafes Yapıların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi* (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Hasan, R.** (2013). *Progressive Collapse on Titanium Alloy Micro-Lattice Structures Manufactured Using Selective Laser Melting* (Doctoral dissertation). University of Liverpool, Liverpool.
- Jayanty, S.** (2010). *Negative Poisson's ratio composites : finite element modeling and experiments* (Master dissertation). University of Toledo, Toledo.
- Kırca, M.** (2006). *Mikro Hücreli Karbon Köpüklerin İstatiksel Ve Sayısal Olarak Modellenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kooistra, G.W., Wadley, H.N.G.** (2007). Lattice truss structures from expanded metal sheet, *Materials and Design* 28, 507-514.
- Liu, Q.** (2006). *Literature Review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence*, DSTO Defence Science and Technology Organisation.
- Nakajima, H.** (2013). *Porous Metal with Directional Pores*. Tsuruga, Springer.
- Ogan, A.D.** (2008). *Alüminyum Esaslı Gözenekli Malzeme Elde Edilmesi, Karakterizasyonu Ve Bazı Özelliklerinin İrdelenmesi* (Doktora tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Pirolini, A.** (2014). *An Introduction to Auxetic Materials: an Interview with Professor Andrew Alderson*.
- Queheillalt, D.T., Wadley, H.N.G.** (2005). Cellular metal lattices with hollow trusses, *Acta Materialia* 53, 303-313.
- Rehme, O.** (t.y.). *Cellular Design for Laser Freeform Fabrication*. Hamburg: Institute of Laser and System Technologies, Hamburg University of Technology.
- Shen, Y.** (2009). *High-Performance Sandwich Structures Based On Novel Metal Cores* (Doctoral dissertation). University of Liverpool, Liverpool.
- Smith, M.I.H.** (2012). *The Compressive Response of Novel Lattice Structures Subjected to Static and Dynamic Loading* (Doctoral dissertation). University of Liverpool, Liverpool.
- Şimşek, V.** (2008). *Amberlit-35 Katalizörünün Gözenek Yapısının Üç Boyutlu (3D) Rastgele Ağ Modeli Üzerinden Modellenmesi Ve Ağ Boyutu Etkisinin İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Uzun, M. (t.y.). Negatif Poisson Oranına Sahip (Auxetic) Malzemeler ve Uygulama Alanları, *The Journal Of Textiles and Engineers*.

Wang, H.V. (2005). *A Unit Cell Approach For Lightweight Structure And Compliant Mechanism* (Doctoral dissertation). Georgia Institute Of Technology, Georgia

Wings of change: shape-shifting aircraft may ply future skyways. (2003). Erişim: 15 Ekim 2016, <https://www.thefreelibrary.com>.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Aslı Işıltan
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.07.1986 İstanbul
E-posta : asliisiltan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM :

- 2013 (Ekim) - ... : Proje Proses Mühendisi, Parsan Makine Parça Sanayi A.Ş.