



AUXETIC MALZEMELERİN DENEYSEL OLARAK VE  
SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

Ahmet Abdullah KARACA

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ

2016



**T.C.**  
**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AUXETIC MALZEMELERİN DENEYSEL OLARAK VE  
SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet Abdullah KARACA**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**BURSA**  
**Temmuz 2016**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

“Ahmet Abdullah KARACA” tarafından “Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ ve Yrd. Doç. Dr. Sukhwinder Kaur BHULLAR ” yönetiminde hazırlanan “AUXETIC MALZEMELERİN DENEYSEL OLARAK VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ” başlıklı tez, kapsamı ve niteliği açısından incelenmiş ve **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

### Sınav Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ .....  
(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği)

Prof. Dr. Bahattin KANBER .....  
(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği)

Doç. Dr. Ali DURMUŞ .....  
(Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği)

Tez Savunma Tarihi: .../.../....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Murat ERTAŞ

.../.../2016 İmza .....

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Ahmet Abdullah KARACA

İmzası:

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bana yol gösteren, bu tez çalışmasının oluşması ve yürütülmesi sırasında bilgi ve yardımını esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ' e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yürütücüsü olduğu TÜBİTAK 1001 destekli 214M377 proje no. lu "Nanolifli İlaç Taşıma Sistemlerine Sahip Yenilikçi Bir Oksetik Kan Damarı Stenti Geliştirilmesi" projesinde tam zamanlı bursiyer olarak çalışma imkânı sağladığı ve tezin oluşmasında büyük katkısı olan yardımcı tez danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Sukhwinder Kaur Bhullar'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen eski mesai arkadaşlarım Yasir Kantarcıoğlu, Hasan Hacıosmanoğlu, Yalçın Şensoy ve İbrahim Yelek'e canı gönülden teşekkür ederim.

Son olarak tez çalışmam süresince manevi desteğini esirgemeyen aileme özellikle anneme, babama ve dedeme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Abdullah KARACA

# İÇİNDEKİLER

İçindekiler	vi
Şekil Listesi	vii
Çizelge Listesi	xii
Sembol ve Kısaltma Listesi	xiii
Özet	xiv
Abstract	xv
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Literatürde Auxetic Malzemeler	1
1.2. Auxetic Malzemelerin Tarihçesi	3
1.3. Auxetic Malzeme Çeşitleri	4
1.3.1. Doğal auxetic malzemeler	4
1.3.2. İnsan yapımı auxetic malzemeler ve yapıları	5
1.4. Auxetic Malzemelerin Özellikleri	10
1.4.1. Kayma modulu	10
1.4.2. İndentasyon davranışı	11
1.4.3. Sinklastik eğrilik	12
1.4.4. Kırılma tokluğu	13
1.4.5. Sönümleme ve ses absorpsiyonu	13
1.5. Uygulama Alanları ve Auxetic Malzemelerin Geleceği	13
<b>2. AUXETIC PLAKALARIN TASARIMI VE ÜRETİMİ</b>	<b>15</b>
2.1. Tasarım	15
2.2. Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	18
2.3. Üretimi	18
2.3.1. Femtosecond lazer kesiminin işlem süreci	19
<b>3. AUXETIC PLAKA MALZEMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESBİTİ VE ÇEKME DENEYİ SİMÜLASYONU</b>	<b>22</b>
3.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi	22
3.1.1. Numunelerin hazırlanması	23
3.1.2. Gerilme gerinme eğrileri	24
3.2. Sonlu Elemanlar Metodu	277
3.2.1. Sonlu elemanlar metodunda modelleme	28
3.2.2. Uygun ağ yapısının oluşturulması	29
3.2.3. Sonlu elemanlar metodu yöntemlerinin sınıflandırılması	30

Kapalı (implisit) zaman integrasyonu	31
Açık (eksplisit) zaman integrasyonu	31
3.3. Tek Eksenli Çekme Deneyinin Simülasyonu ve Doğrulanması	32
<b>4. AUXETIC YAPILARIN ANALİZİ VE GELİŞTİRİLMESİ</b>	26
4.1. Ön Fikir İçin Doğrusal Statik Analizler	36
4.1.1. Numune 1 (orijinal boyut, 0,025 mm kalınlık)	37
4.1.2. Numune 2 (orijinal boyut %40 arttırılmış, 0,025 mm kalınlık)	39
4.1.3. Numune 3 (orijinal boyut %40 azaltılmış, 0,025 mm kalınlık)	41
4.1.4. Doğrusal statik analizlerin karşılaştırılması	42
4.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Açık Zaman İntegrasyonu Analizleri	43
4.2.1. Numune 1 (orijinal boyut, 0,025 mm kalınlık)	43
4.2.2. Numune 2 (orijinal boyut %40 arttırılmış, 0,025 mm kalınlık)	45
4.2.3. Numune 3 (orijinal boyut %40 azaltılmış, 0,025 mm kalınlık)	47
4.2.4. Numune 4 (orijinal boyut, 0,05 mm kalınlık)	48
4.2.5. Numune 5 (orijinal boyut %40 arttırılmış, 0,05 mm kalınlık)	49
4.2.6. Numune 6 (orijinal boyut %40 azaltılmış, 0,05 mm kalınlık)	50
4.2.7. Doğrusal olmayan açık zaman integrasyonu analizlerin karşılaştırılması	51
<b>5. AUXETIC YAPILARIN ÇEKME DENEYİ VE ANALİZLERLE KARŞILAŞTIRILMASI</b>	53
5.1. Numune 1 İçin Çekme Deneyi ve Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması	54
5.2. Numune 2 İçin Çekme Deneyi ve Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması	56
5.3. Numune 3 İçin Çekme Deneyi ve Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması	58
<b>6. SONRAKİ ADIMLAR İÇİN YAPILAN ÖN ÇALIŞMALAR</b>	60
6.1. Ön Fikir İçin Stentlerin Doğrusal Analizleri	62
6.2. Stentin Mekanik Özellikleri İçin Test ve Simülasyonları	63
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	66
<b>KAYNAKLAR</b>	68
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	71

## ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa no</u>
Şekil 1.1	(a) Auxetic davranış (b) Auxetic olmayan davranış	2
Şekil 1.2	Auxetic malzemelerin tarihsel gelişim ve keşif çizelgesi [11]	4
Şekil 1.3	(a) Rib davranışlı re-entrant hücre modeli (b) Kayıp rib modeli (c) Chiral petek yapısı (d) Döner üçgen ve döner dörtgen yapıli menteşeler ve (e) Düzensiz auxetic yapı [14]	5
Şekil 1.4	(a) PU köpüklerinin SEM görüntüleri (sol) geleneksel (sağ) (b) den d ye) Köpüğün optik görüntüsü ve şematik kurulumu (c) öncesi ve (d) proses sonrası (e) X-ray mikro topografik görüntüsü	6
Şekil 1.5	Tipik auxetic mikro-gözenekli polimer PTFE'nin nodül-fibril' in modelinin şematiği (a) Yüksüz halde polimer (b) Çekme yükü altında polimer (c) Auxetic PTFE mikro-yapısının büyütülmüş SEM görüntüsü [18]	7
Şekil 1.6	Suni kan damarının deformasyon davranışının şematik gösterimi (a) Geleneksel malzeme ve (b) Auxetic malzeme (c) Kılıf ve auxetic malzeme kullanılan dilatör [21]	8
Şekil 1.7	Kompozit auxetic ve auxetic olmayan(non-auxetic) fiberlerin şematik diyagramı [23]	9
Şekil 1.8	Nano auxetic piezoelektrik seramik çubuk içeren piezokompozit cihaz geometrisi [25]	10
Şekil 1.9	Auxetic olmayan(a) ve Auxetic(b) malzemelerin yük altında çentikleme direncinin gösterilmesi [30]	12
Şekil 1.10	Konvasiyonel malzemelerin antiklastik davranışı (b) auxetic malzemelerin kubbeleşme kabiliyeti [30]	12
Şekil 2.1	Farklı kalınlık ve boyutlardaki numuneler (a) (Orijinal) 0,025mm kalınlık (b) Orijinal +%40 0,025mm kalınlık (c) Orijinal % -40 0,025mm kalınlık d) (Orijinal) 0,050mm kalınlık (e) Orijinal +%40 0,050mm kalınlık (f) Orijinal +%40 0,050mm kalınlık	16
Şekil 2.2	(a) Auxetic desene sahip geometri (b) Birim hücrenin boyutlandırılması	19
Şekil 2.3	(a) Deney setinin şematik görünümü (b) Femtosecond lazerin izlediği yolu (c) Lazer kesimde nihai geometri	20



Şekil 2.4	(a) Gripli numuneler (b) Gripsiz numuneler	21
Şekil 2.5	Temizleme işleminden sonra tamamlanmış numune	21
Şekil 3.1	Çekme testi yapılacak konvansiyonel numuneler	23
Şekil 3.2	Deney Numunelerinin Hazırlanışı	23
Şekil 3.3	(a) Numunenin cihaza bağlanma şekli (b) Konvansiyonel malzemenin çekme testi sonucu hasar şekilleri	24
Şekil 3.4	(a)-(c) Numune 1, 2 ve 3 için kuvvet-uzama grafikleri (d) Üç numunenin karşılaştırılması ve ortalama grafiği	24
Şekil 3.5	Mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	26
Şekil 3.6	Sonlu elemanlar modeli örneği [37]	27
Şekil 3.7	Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri [40]	29
Şekil 3.8	Bir daireyi temsil eden farklı sayıdaki çizgiler[40]	29
Şekil 3.9	Çizgi sayısına bağlı olarak hesaplanan daire alanının değişimi [40]	30
Şekil 3.10	Katı mekaniği için analiz çeşidini belirlemekte kullanılabilir şema [42]	31
Şekil 3.11	Çekme Numunesinin Dörtgen-Kabuk Elemanlar ile Oluşturulan Ağ Yapısı	33
Şekil 3.12	Radioss çözücüsü için kullanılacak eğri ve veri giriş ekranı	34
Şekil 3.13	Alt kısmın tüm doğrultularda sabitlenmesi	34
Şekil 3.14	Üst kısma (beyazla belirtilmiş) çekme hızı uygulaması ve öteleme (z ekseni) harici doğrultularda sabitlenmesi	35
Şekil 3.15	Çekme deneyi simülasyonu sonucu oluşan (a) z-doğrultusundaki yer değiştirmeler [mm] (b) Von-Misses Gerilmeleri [GPa]	35
Şekil 4.1	Temel numune (numune 1) için kullanılan dikdörtgen-kabuk eleman yapısı	36
Şekil 4.2	Auxetic numunelere uygulanan sınır koşulları (a) Alt yüzey tüm doğrultularda sabitlenmiş (b) Üst yüzey y dışında bütün doğrultularda sabitlenmiş (c) Üst yüzey Y doğrultusunda yayılı yük uygulanmış	37
Şekil 4.3	300 MPa yayılı yük altında (a) Eleman Gerilmeleri (b) X doğrultusundaki orijinal boyutlar (c) Yük tatbik edildikten sonra X doğrultusundaki boyutlar (d) Y doğrultusundaki orijinal boyutlar (e) Yük tatbik	38

	edildikten sonra Y doğrultusundaki boyutlar	
Şekil 4.4	24,85 MPa yayılı yük altında (a) Eleman Gerilmeleri (b) X doğrultusundaki orijinal boyutlar (c) Yük tatbik edildikten sonra X doğrultusundaki boyutlar (d) Y doğrultusundaki orijinal boyutlar (e) Yük tatbik edildikten sonra Y doğrultusundaki boyutlar	39
Şekil 4.5	21,85 MPa yayılı yük altında (a) Eleman Gerilmeleri (b) X doğrultusundaki orijinal boyutlar (c) Yük tatbik edildikten sonra X doğrultusundaki boyutlar (d) Y doğrultusundaki orijinal boyutlar (e) Yük tatbik edildikten sonra Y doğrultusundaki boyutlar	41
Şekil 4.6	Numune 1 eksplisit analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki genişlemenin zamana bağlı değişimi. (b) Hasardan bir önceki zaman dilimindeki Von-Misses gerilmesi dağılımı. (c) Numunenin üst kısmındaki hasar başlangıcı (d) Auxetic etki kaybolduktan sonra oluşan kırılma hali (e) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (f) 20ms de oluşan şekil değişimi	44
Şekil 4.7	Numune 2 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin alt kısmındaki hasar başlangıcı (c) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (d) 11 ms de oluşan şekil değişimi	46
Şekil 4.8	Numune 3 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin alt kısmındaki hasar başlangıcı (c) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (d) 51 ms de oluşan şekil değişimi	47
Şekil 4.9	Numune 4 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (c) 73 ms de oluşan şekil değişimi	48
Şekil 4.10	Numune 5 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (c) 38 ms de oluşan şekil değiştirme	49
Şekil 4.11	Numune 6 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (c) 200 ms de oluşan şekil değişimi (d) 200 ms deki plastik şekil değişimleri	50

Şekil 5.1	Auxetic numunelerin çekme deneyi için hazırlanma sürecinden bir fotoğraf	53
Şekil 5.2	Auxetic numunelerin çekme deneyi esnasında kamera ile kaydedilmesi	53
Şekil 5.3	Numune 1 in çekme deneyi sonucu kuvvet yer değiştirme grafiği	54
Şekil 5.4	Numune 1 in çekme deneyi simülasyonunda kopmadan hemen önceki uzama değeri	55
Şekil 5.5	Numune 1 in çekme deneyi esnasındaki belli aralıklarla görüntüleri	55
Şekil 5.6	Numune 2 nin çekme deneyi sonucu kuvvet şekil değiştirme grafiği	56
Şekil 5.7	Numune 2 nin çekme deneyi simülasyonunda kopmadan hemen önceki uzama değeri	57
Şekil 5.8	Numune 2 nin çekme deneyi esnasındaki belli aralıklarla görüntüleri	57
Şekil 5.9	Numune 3 ün çekme deneyi sonucu kuvvet şekil değiştirme grafiği	58
Şekil 5.10	Numune 3 ün çekme deneyi simülasyonunda kopmadan hemen önceki uzama değeri	58
Şekil 5.11	Numune 3 ün çekme deneyi esnasındaki belli aralıklarla görüntüleri	59
Şekil 6.1	Stent şekli için kaynak ekleme yerleri	60
Şekil 6.2	Stent geometrileri (a) (Orijinal) 0,025mm kalınlık (b) Orijinal +%40 0,025mm kalınlık (c) Orijinal +%40 0,025mm kalınlık	61
Şekil 6.3	Stent Yapısı için Sınır Koşulları ve Yüklemeler	62
Şekil 6.4	Numune 1 hücre yapısına sahip, 72.54 MPa'lık iç basınç altında olan stent için eleman gerilmeleri	64
Şekil 6.5	Stentin damar içerisinde maruz kaldığı yüklemeler. [41]	64
Şekil 6.6	Yükleme durumlarının şematik gösterimi (a) Boyuna yönde çekme (b) Basma testi ve stente uygulanan radyal basma testi (c) burulma testi (d) 3 nokta eğme testi	64
Şekil 6.7	Yükleme durumlarının şematik gösterimi (a) Boyuna yönde çekme (b) Stente uygulanan radyal basma simülasyonu (c) burulma simülasyonu (d) 3 nokta eğme simülasyonu	65

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa no</u></b>
Çizelge 1.1 Auxetic Malzemelerin Uygulama Alanları	14
Çizelge 2.1 Numunelerin Ölçüleri	15
Çizelge 2.2 Paslanmaz çelik 316L nin mekanik özellikleri [34]	18
Çizelge 2.3 Numunelerin femtosecond lazer de işlenilen ölçüleri	19
Çizelge 4.1 Malzeme Parametreleri	36
Çizelge 4.2 Doğrusal Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları ve Hesaplanan Eşdeğer Young Modülü ve Poisson Oranı Değerleri	42
Çizelge 4.3 Tüm Numuneler İçin Açık Zaman İntegrasyonu Sonuçları	51
Çizelge 6.1 Stentlerin Ölçüleri	60
Çizelge 6.2 Stent Geometrisi İçin Doğrusal Sonlu Eleman Analizi Sonuçları	63

## SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$K$	Bulk Modulu
$F_{dış}$	Dış Kuvvetler
$\varepsilon_{ir}$	Gerçek birim şekil değiştirmesi
$\sigma_{ir}$	Gerçek gerileme
$V$	Hız
$F_{iç}$	İç Kuvvetler
$G$	Kayma Modulu
$M$	Kütle Matrisi
$\varepsilon_e$	Mühendislik birim şekil değiştirmesi
$\sigma_e$	Mühendislik gerilemesi
$l$	Numunelerin boyuna uzunluğu
$W$	Numunelerin enine uzunluğu
$\nu$	Poisson Oranı
$\bar{a}_x(t)$	X Yönündeki Maksimum İvmelenme
$\bar{a}_y(t)$	Y Yönündeki Maksimum İvmelenme
$u$	Yer Değiştirme
$E$	Young Modulu
$\bar{a}_z(t)$	Z Yönündeki Maksimum İvmelenme

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CCD	Charge coupled device
DOF	Degrees of freedom
PTFE	Polytetrafluoroethylene
UHMWPE	Ultra-high-molecular-weight polyethylene

## ÖZET

### AUXETIC MALZEMELERİN DENEYSEL OLARAK VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

**Ahmet Abdullah KARACA**

Bursa Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ

Temmuz 2016, 86 sayfa

Akıllı malzemeler, bir veya daha fazla özelliğın kontrollü bir şekilde dışarıdan yapılan müdahaleler ile değiştirilmesi sonucu tasarlanan malzemelerdir. Bazıları çok yaygın olmakla birlikte birçok akıllı malzeme çeşidi vardır. Bunlardan biri de negatif Poisson oranına sahip auxetic malzemelerdir. Bu özellikteki malzemeler gergin hale getirildiğinde uygulanan kuvvete dik yönde genişler. Auxetic malzemelerin yüksek enerji soğuran, kırılmaya karşı dirençli yapılar olması beklenir. Bu sebeple medikal uygulamalar ve birçok endüstriyel uygulamalar için kullanışlıdırlar. Modern teknolojinin yeni malzemelere ihtiyacı vardır ve bu yeni malzemelerin de birçok yeni onay sürecine ihtiyacı vardır. Bu sebeple de bunların mekanik özelliklerinin tespiti ve incelenmesi teknolojik ve teorik açıdan son derece önemlidir. Auxetic malzemelerin mekanik davranışlarının tespiti ve boyutlandırma aşamasında simülasyonlardan yararlanmak etkin bir yoldur.

Bu tez çalışmasında auxetic malzemeler incelenecektir. Auxetic malzeme elde etmek için paslanmaz çelik malzemesi seçilmiştir ve geometri üzerinde şekil değişikliği uygulanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı sayesinde numuneler modellenmiş, Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımında sonlu elemanlar metodu (FEM) ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler üretilmeden önce doğru mekanik davranışlarının tespiti için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonrasında sonlu elemanlar sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneylerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiş ve böylece auxetic yapılar için tasarım ve analiz prosedürlerinin doğruluğu kanıtlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Auxetic Malzeme, Auxetic Stent, Auxetic yapıların Sonlu Elemanlar Metodu ile analizi

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF AUXETIC MATERIALS EXPERIMENTALLY AND USING FINITE ELEMENT METHOD

**Ahmet Abdullah KARACA**

Bursa Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering Program

Master of Science Thesis

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin LEKESİZ

Assoc. Prof. Dr. Sukhwinder Kaur BHULLAR

July 2016, 86 pages

Smart materials are designed material that have one or more properties that can be changed in a controlled fashion by tailoring microstructure. There are number of types of smart material and some of them are already commonly used in literature. One of the smart material is auxetic material which have a negative poisson's ratio. When stretched, they become thicker perpendicular to the applied force. Therefore, Auxetic material structures are expected to have superior mechanical properties such as high energy absorption and fracture resistance. Thus they can be useful in medical applications and other industries. Modern technologies require new materials and this new materials require verification of properties. Therefore mechanical property definition and investigation is technologically and theoretically important. Simulation is an effective way to design, predict their mechanical behavior and sizing the auxetic materials.

In this thesis, auxetic materials are introduced. In order to obtain auxetic structure, stainless steel plates are tailored in re-entrant shape using femtosecond laser technology. Specimens are designed and sized by CAD software and these models were analyzed by CAE software via finite element modeling (FEM). Mechanical properties of stainless steel sheet before tailoring are determined via tensile testing and obtained parameters are used in simulations. Tensile testing of auxetic sheets are also conducted and then Finite Element results and experimental results are compared and a good match is obtained. Thus, the analysis procedure of auxetic structures are verified for future studies.

**Key Words :** Auxetic Material, Auxetic Stent, FEM Analysis of Auxetic Structure

## 1. GİRİŞ

Yeni özelliklere sahip çok fonksiyonlu malzemelere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Konvansiyonel malzemelere ek bir özellik katarak veya yeni bir tasarımla elde edilen malzemelere akıllı malzemeler denir. Yaklaşık 50 yıldır akıllı malzemeler üzerine biyomedikal ve diğer birçok alanı kapsayacak şekilde araştırmalar yapılmaktadır. Günümüzde akıllı malzemeler; doku mühendisliği, stentler, yapı iskeletleri, vücut içerisine yerleştirilen malzemeler, tıbbi cihazlar, seramikler, polimerler ve kompozitler gibi biyomedikal sistemlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır [1].

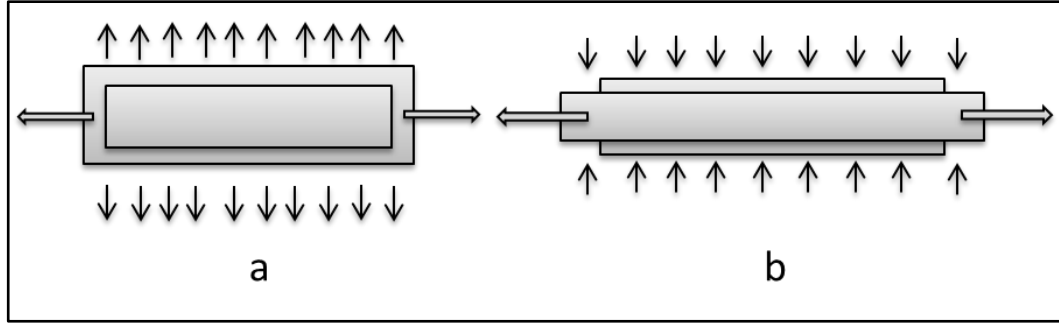
21. yüzyılın akıllı malzemeler kategorisinde bulunan auxetic malzemeler etkili ve özel deformasyon özelliklerinden dolayı tıbbi cihazlara uyumludur ve bu cihazların mekanik özelliklerini iyileştirirler.

Bu tez çalışmasında akıllı malzemelerden olan Auxetic malzemeler incelenecek ve auxetic bir yapı tasarlanarak sonlu elemanlar metodu kullanılarak analizleri gerçekleştirilecek ve iyileştirilecektir. Geleneksel malzemelerin negatif Poisson Oranına sahip olmaları durumunda ne gibi ek özellikler kazanacağı ve kullanımdaki artı özellikleri incelenecektir.

### 1.1. Literatürde Auxetic Malzemeler

Şekil 1.1 (a)'da gösterilen auxetic malzemeler sıradan malzemelerin davranışına zıt yönde bir davranış gösterirler; çekme kuvveti uygulandığında genişlerler, basma kuvveti uygulandığında daralırlar. Ayrıca, bu yapılar iyi enerji absorpsiyonu [2] ve yüksek kırılma tokluğu gibi özellikler sunarlar. Bu özellikleriyle auxetic yapılar biyomedikal endüstrisinde oldukça önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır.





Şekil 1.1 (a) Auxetic davranış (b) Auxetic olmayan davranış

Dahası negatif Poisson Oranına sahip auxetic malzemeler istenilen iyileştirilmiş mekanik özelliklere [3] ve özel deformasyon mekanizmasına sahip olabilirler. Bilindiği gibi bir malzemenin Poisson Oranı ( $\nu$ ), elastik yükleme bölgesindeki enine gerilme ile boyuna gerilmenin oranıdır ve malzeme esnetildiğinde ne kadar incelmesini ifade eder. Çoğunlukla konvansiyonel malzemeler pozitif Poisson Oranına sahiptir. İzotropik malzemelerin Poisson Oranı maksimum +0,5 olabilmektedir. Bazı malzemeler için Poisson Oranı sifıra eşitken, bazı malzemeler için de sıfırdan küçük negatif bir değerdir.

Negatif Poisson Oranına sahip malzemeler auxetic malzeme olarak isimlendirilir ve klasik Yunan kelimesi olan Oksetos'tan gelmektedir ve artış anlamına gelmektedir. Gerildikçe genişler, basıldıkça daralırlar ve bükülme uygulandığında da kubbe şeklini alırlar. Negatif Poisson Oranı ise yüksek derecede anizotropikliğin olmasına bağlıdır. Bu etki bazı yönlerde oluşur ve germe kuvveti ve kayma deformasyonlarının kombine edilmesiyle daha baskın hale getirilebilir [4]. Auxetic malzemeleri ve uygulama alanlarını içeren araştırmalar disiplinlerarası çalışmayı gerektirir. Auxetic malzemeler üzerine yapılan çalışmalar ve deneyler, bu malzemelerin biyomedikal endüstrisine çok fazla uygulama alanı sunduğunu destekler. Bazı uygulama alanlarına , protezler, iskelet dokusu ve stentler örnek verilebilir [5].

Auxetic malzemelerin sunduğu faydalar oldukça fazladır ve dünya çapındaki araştırmacılar, sadece biyomedikal değil aynı zamanda mühendislik ve inşaat endüstrilerinde de çok fazla uygulama alanı olduğunu görmüşlerdir.

## 1.2. Auxetic Malzemelerin Tarihçesi

Negatif Poisson Oranına sahip malzemelerin son yıllardaki tarihçesi Roderick Lakes tarafından oluşturulmuştur [6]. Auxetic malzemeler üzerine yapılan uluslararası gelişmeler 1991’lerde daha görünür olmasına rağmen, Roderick Lakes bu malzemeleri ilk defa auxetic malzeme olarak isimlendirmiştir. 1900’lerin başlarına bakıldığında, Alman fizikçi Woldemar Voigt demir pirit üzerine yaptığı deneysel çalışmalarında negatif Poisson Oranına sahip bir malzemeyi tanımladı ve Poisson Oranı -0,14 olan kübik tek bir kristal pirit örneğini sundu. Çalışmasında kristallerin yana doğru esnetildiğinde nasıl olduysa bir şekilde aynı doğrultuda genişlediğini gözlemlemiştir. Voigt bu özgün davranışı açıklayamadı ve bu özellik ile ilgili olası uygulamaları o zaman tahmin edemedi ve onlarca yıl göz ardı edildi. Voigt bu etkinin kristal ikizleşmesi sonucu oluşabileceğini önerdi.

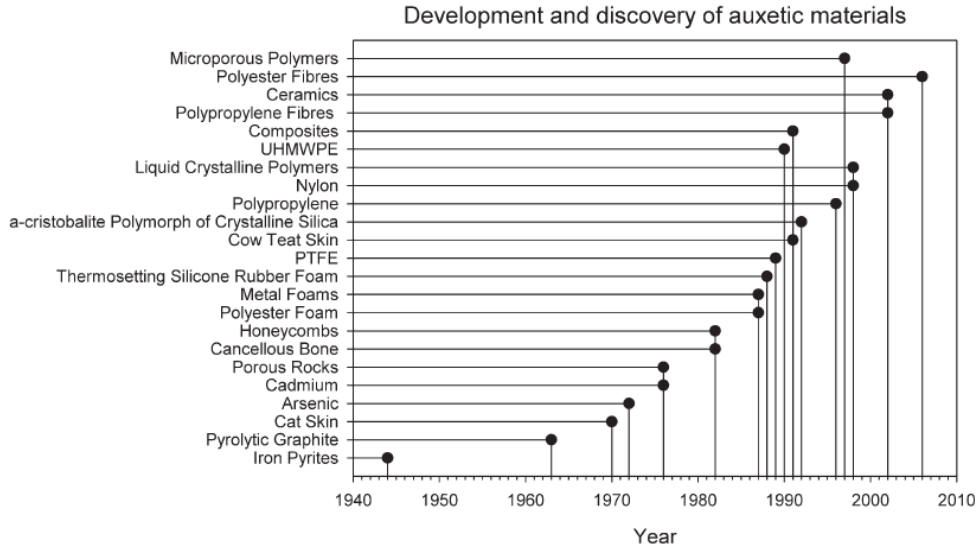
1980’lerin sonlarına doğru araştırmacılar ticari bir köpükten auxetic özelliğe sahip köpük ürettiler. Bu büyük gelişme gösterdi ki konvansiyonel bir malzemeye kendi tasarımları sayesinde auxetic özellik kazandırılmıştır [7]. Bu gelişme ile araştırmacılar auxetic özelliğe sahip malzemelerin birçok uygulama alanı olduğunun farkına varmışlardır. O zamandan beridir üretilen sentetik auxetic malzemelerin temel sınıflandırması metaller, seramikler, polimerler ve kompozitlerdir [8].

Doğal olan auxetic malzemeler de mevcuttur, arsenik kristali, kadmiyum kristali,  $\alpha$ -cristobalite ve birçok kübik elementel metal bunlara örnek olarak verilebilir. Dahası kedi derisi, semender derisi, inek meme derisi gibi bazı biyolojik malzemeler de doğal olarak auxetic özelliğe sahiptir [9].

Auxetic malzemelerin mekanizması, bu yapılara kuvvet uygulandıklarında mikro ya da geometrik yapıya ve deformasyon mekanizmasına bağlıdır. Auxetic malzemeye ya da yapıya bir yönde kuvvet uygulandığında, dik yönde esner ve negatif Poisson Oranı sergilerler [10]. Kuvvet uygulandığında malzemenin içyapısı ve deformasyon türü auxetic davranışın oluşumuna sebep olur.

100 yıldan fazla süredir auxetic malzemeler bilinmesine rağmen 1980'lerin sonlarından bu yana yeniden daha çok dikkat çekmişlerdir.

Bu güne kadar polimerler, metaller, seramikler, kompozitler, kaplamalar ve lifler gibi farklı birçok auxetic malzeme üretilmiştir. Auxetic malzemeler doğal auxetic ve insan yapımı (yapay) auxetic olmak üzere temel olarak iki grupta incelenebilir. Doğal ve yapay auxetic malzemelerin keşfini ve kullanım alanlarını gösteren zaman çizelgesi şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Auxetic malzemelerin tarihsel gelişim ve keşif çizelgesi [11]

### 1.3. Auxetic Malzeme Çeşitleri

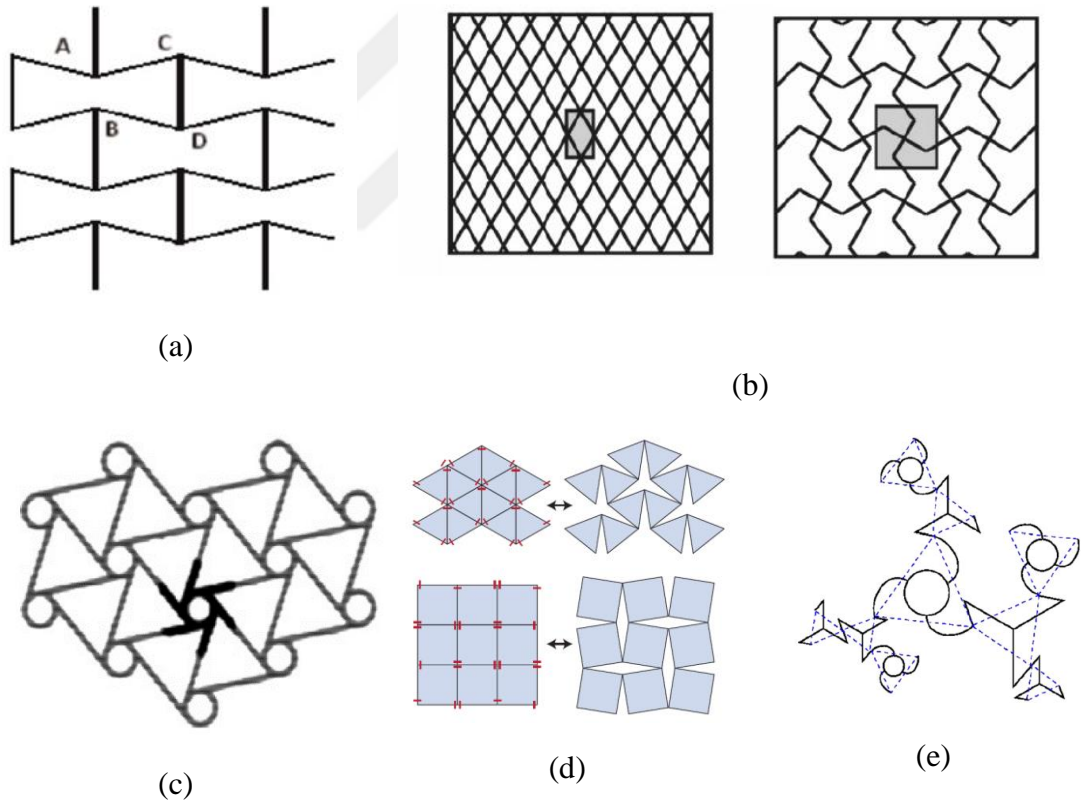
#### 1.3.1. Doğal auxetic malzemeler

Auxetic malzemelere ilk örnek deri verilebilir çünkü semender derisi, kedi derisi, inek memesi derisi gibi çeşitli deriler negatif Poisson Oranına sahiptirler. Derinin özelliklerini ölçmek zor olmasına rağmen, mekanik özellikleri medikal operasyon uygulamaları ve suni deri fabrikasyonu gibi geniş çalışma alanlarına sahiptirler [12].

Buna ek olarak çok çeşitli kayalar,  $\alpha$ -cristobalite ve kübik elementli metaller de doğal auxetic malzemeler olarak tanımlanmıştır [13].

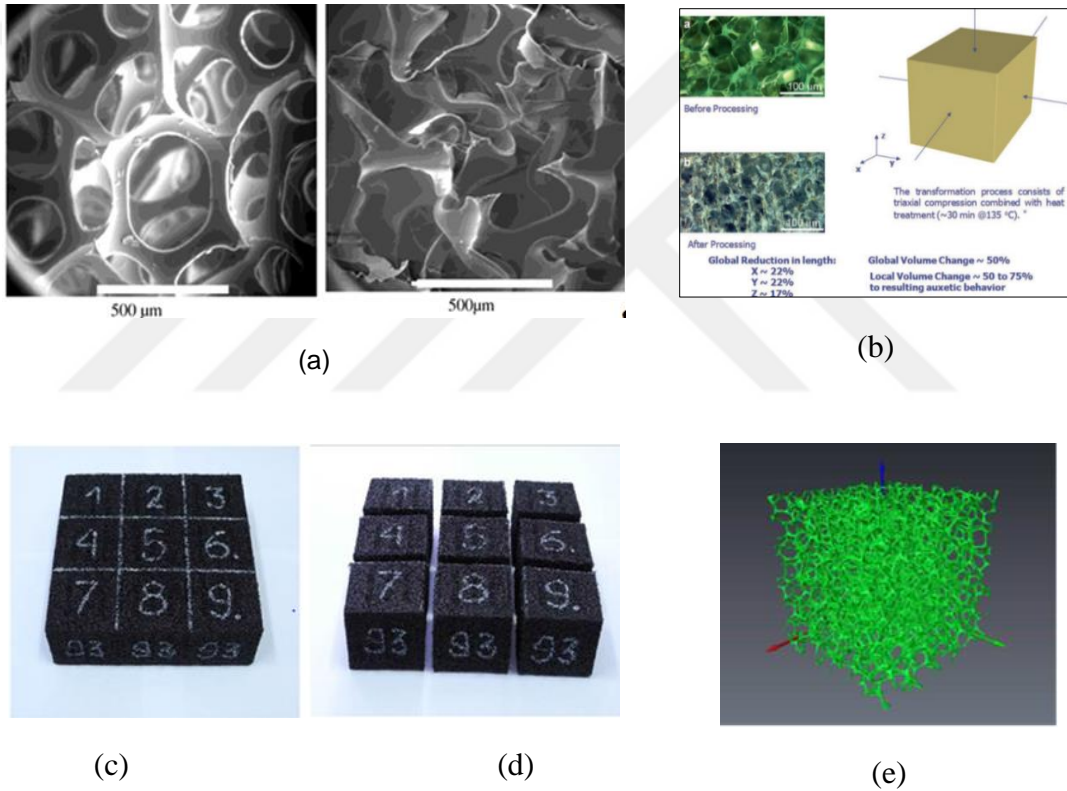
### 1.3.2. İnsan yapımı auxetic malzemeler ve yapıları

Son on yılı aşkın süredir, auxetic etkisi ile sonuçlanabilecek farklı geometrik yapılar ve modeller önerilmiş, üretilmiş ve test edilmiştir. En önemli sınıflar arasında bulunan auxetic yapılar 2 ve 3 boyutlu re-entrant yapılar, kayıp rib modeli, chiral yapısı, döner birimler, yıldız şekilli yapılardır. Bu düzenli yapılar haricinde de auxetic etkili düzensiz yapılar üzerine de çalışılmıştır [14]. Bunlardan bazıları şekil 1.3 de gösterilmiştir



**Şekil 1.3** (a) Rib davranışlı re-entrant hücre modeli (b) Kayıp rib modeli (c) Chiral petek yapısı (d) Döner üçgen ve döner dörtgen yapıları (e) Düzensiz auxetic yapı

Auxetic köpükler son yıllarda bir hayli dikkat çekici hale gelmiştir. Bazı poliüretan (PU) köpük örnekleri şekil 1.3 de verilmiştir. -0,7'lik bir Poisson Oranıyla, ilk defa Laker tarafından şekil 1.3 (a) da görülen re-entrant hücre yapıları 1987 de üretilmiştir. [15]. Ayrıca auxetic termoplastik (polyester üretan), termoset (silikon kauçuk) ve metal (bakır) köpükler üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Poisson Oranı'nın hem polimerik ( $\nu = -0,7$ ) hem de metalik ( $\nu = -0,8$ ) köpükler için -1 limit değerine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Auxetic etki, hücrelerin konkavlığından ileri gelmektedir ve numunelerin farklı kısımlarına ait X-Ray mikro tomografik görüntüleri Şekil 1.4 (e) de verilmiştir.

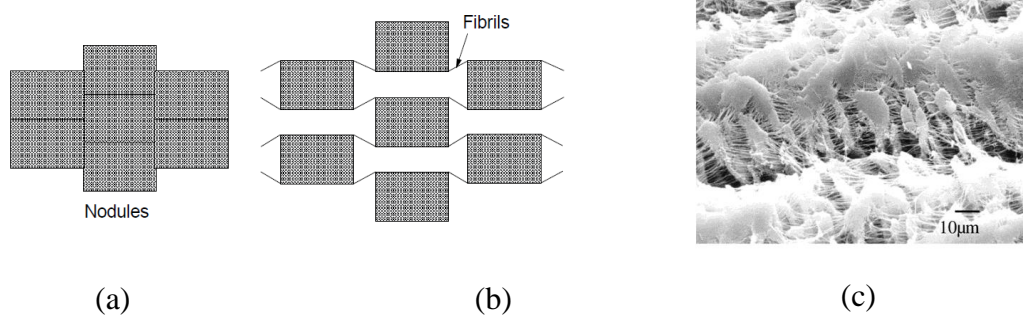


**Şekil 1.4 .** (a) PU köpüklerinin SEM görüntüleri (sol) Geleneksel (sağ) (b den d ye) Köpüğün optik görüntüsü ve şematik kurulumu (c) öncesi ve (d) proses sonrası (e) X-ray mikro topografik görüntüsü

Auxetic malzemelerle ilgili yeni araştırmalar daha çok polietilen gibi yoğun malzemeler üzerinde genişletilmiştir. Boncuk-zincir (bead-spring) modelleri, bükülen örgü modellerin mikro polar süreklilikleri, düzenli ya da düzensiz parçacıkların hareketi, elastik enerjiyi depolamak için bir takım yaylar ve topolojik sabitler de literatürde araştırmalar yapılan diğer konulardandır [16]. Bu yapılarıdaki

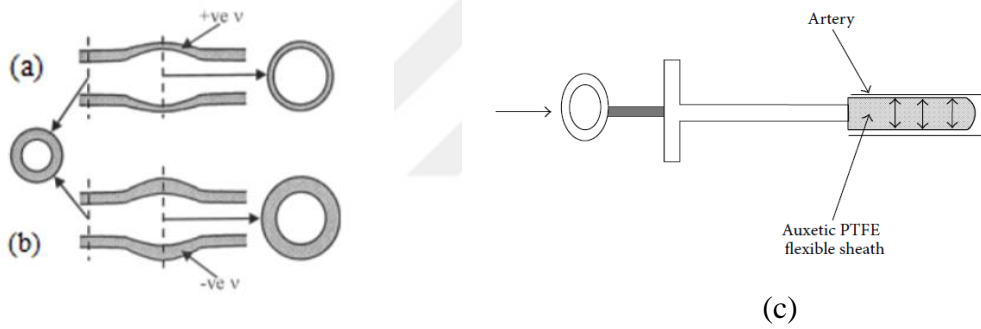
deformasyon mekanizmaları, eğilme mekanizmalarının aksine, çekirdekdeki esnekliğin depoladığı enerji sayesinde elde edilmiştir.

Ayrıca ekstrüzyon, tek eksenli ve çift eksenli çekme kullanarak, silindir şerit ve yaprak formundaki politetraflorüretilen (PTFE)'den üretilmiş auxetic polimer mevcuttur [17]. Bu çalışmada auxetic etki, mikro rotasyon veya çekme deformasyon mekanizmasından dolayı ortaya çıkmıştır. Yoğun auxetic etki elde etmek için, -12' ye kadar negatif Poisson Oranı sergileyen mekanizmalar literatürde tartışılmıştır. Mikro-gözenekli auxetic polimer için, mikro yapıların karakteristikleri, basit 2D modeliyle şekil 1.5(a) ve (b) de gösterilmiştir. Burada mikro yapı, nodül ve fibrillerin birbirine bağlı bir ağ yapısı olarak modellenmiştir ve auxetic davranış nodül ve fibrillerin kuvvet altındaki birlikte hareketinden ötürü oluşmaktadır [18]. Morfolojik çalışmalar ve analitik modelleme gösteriyor ki PTFE de auxetic özellik, fibriller sayesinde partiküllerin 3 boyutlu düzende bağlanmasını sağlayan mikro yapısından dolayıdır ve bu durum şekil 1.3(c) de gösterilmiştir. UHMWPE ve PP yapıları, sıkıştırma, sinterleme ve ekstrüzyon yoluyla veya sadece sinterleme ve ekstrüzyon prosesiyle oluşturulmuştur ve bu oluşum auxetic davranış sağlamıştır çünkü mikro yapı, nodüllerin ve fibrillerin bağlantı ağını içerir. Nodüller ve fibriller beraberce dik yönde genişleme sağlayarak tepki gösterirler ve aynı zamanda fibriller nodülleri bir tarafa itmesine sebep olurlar. Poisson Oranının değeri çekme gerilmesiyle çeşitlenmiş ve -6 kadar büyük değerler ve hatta -12 elde edilmiştir [19].



**Şekil 1.5** Tipik auxetic mikro-gözenekli polimer PTFE'nin nodül-fibril' in modelinin şematiği (a) Yüksüz halde polimer (b) Çekme yükü altında polimer (c) Auxetic PTFE mikro-yapısının büyütülmüş SEM görüntüsü

Bu auxetic mikro-gözenekli ve hücreli malzemeler biyomedikal alanda potansiyel sahiptirler. Örneğin, atardamar oyuğunu açmak için bir dilatör veya atardamar gibi benzer damarların kalp ameliyatlarında kullanımı için de oldukça uygundur ve şekil 1.6 (c) de gösterilmiştir Atardamar, içi boş esnek auxetic PTFE çubuğunun veya çekme altındaki kılıfın aksel genişlemesiyle açılır [20]. Auxetic olmayan malzemeyle yapılan bir kan damarı duvar kalınlığında azalma eğilimi gösterecektir çünkü damar kan akışı boyunca darbeye cevap olarak açılır (Şekil 1.6a). Bu da damarı potansiyel feci sonuçlarla er geç yırtılmaya götürebilir. Auxetic kan damarı, aksine kan akışı boyunca darbeye cevap olarak duvar kalınlığı artacaktır (Şekil 1.6b) bu nedenle duvar incelmeye ve nihai yırtılmaya karşı dirençlidir. Diğer potansiyel biyomedikal uygulamalar, kemiğin gelişmesine destek verebilen gözenekli yapıların kullanılmasıyla elde edilen cerrahi implantlar, dikiş çapaları veya kas/lif çapalarını içerir [21].

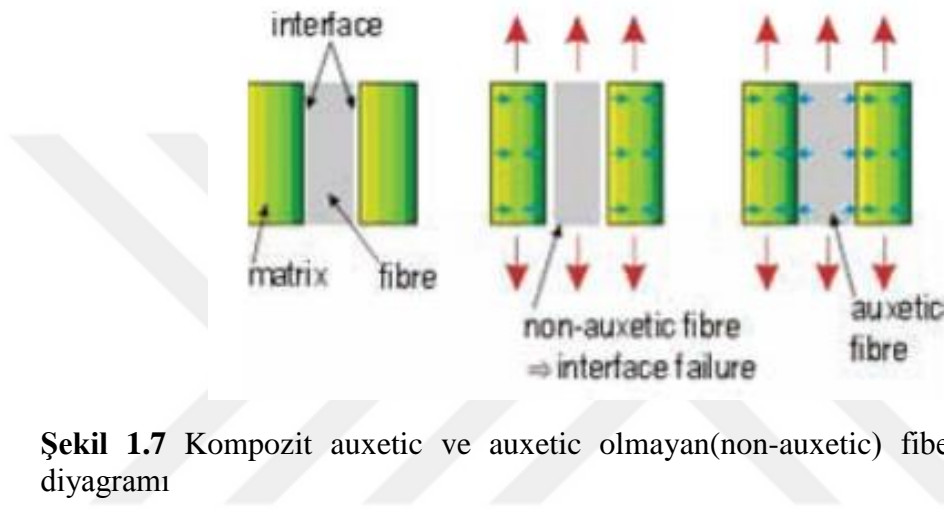


**Şekil 1.6** Suni kan damarının deformasyon davranışının şematik gösterimi (a) Geleneksel malzeme ve (b) Auxetic malzeme (c) Kılıf ve auxetic malzeme kullanılan dilatör

Ayrıca, kompozit malzemeler içyapılarındaki farklı varyasyonlarına bağlı olarak yüksek sertlikli auxetic malzeme gelişiminde önemli bir yere sahiptir. Biyomedikal alanda yüksek potansiyel gösteren auxetic kompozitler aynı zamanda havacılık ve otomotiv uygulamalarında da kullanılır. Sandviç panel kompozitleri, düşük yoğunluklu çekirdeğin bir dış lamina tabakasıyla kaplanmasıyla elde edilir. Kompozit panel, hafif yapısı, iç yapısı (genellikle petek ya da köpük malzeme) sebebiyle yüksek out-of-plane modülü ve dış lamine yüzeyi sayesinde yüksek in-plane modülü sağlamaktadır [22]. Bu optimum kombinasyon, havacılık ve otomotiv uygulamaları için kavisli gövde bölgelerinde oldukça tercih edilir. Auxetic sandviç



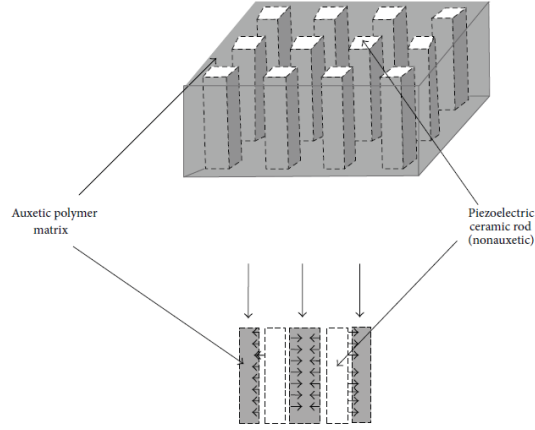
modeller re-entrant petek core malzemesi içererek imal edilmiştir. Bu paneller, auxetic malzemelerin sinklastik eğrilik özelliğinden dolayı çift eğimli olarak ya da kubbe biçimde şekillendirilebilirler. Bu nedenle auxetic olmayan yani antiklastik eğriliğine karşı meyilli olan paneller için gerekli olan pahalı ve zarar verici tekniklerin kullanılmasını ortadan kaldırır. Buna ek olarak kompozit paneller şekil 1.7 de gösterildiği gibi komşu katmanlarla sandviç panelleri birbirine kenetlemek için destekleyici bağlantı potansiyeline sahiptir [23].



**Şekil 1.7** Kompozit auxetic ve auxetic olmayan(non-auxetic) fiberlerin şematik diyagramı

Fonksiyonel kompozit (karışım) malzemeler, sensor (algılayıcı) ve aktivatör (çalıştırıcı) uygulamalarında kullanılırlar. Auxetic polimer matris birçok uygulamada auxetic olmayana göre daha çok tercih edilir. Hatta yanıl auxetic polimer matris uygulamalarında cihazın yüzeyindeki sıkıştırma yüküne cevaben de kullanılabilmesi, söz konusu polimerleri daha da önemli hale getirmektedir. Bu yüzden auxetic polimerler, sensörler ve aktivatörler için umut verici adaylar olarak gösterilmektedir. Örneğin, şekil 1.8 de pasif polimer içinde piezoelectric kompozitleri görebilirsiniz.





**Şekil 1.8** Nano auxetic piezoelektrik seramik çubuk içeren piezokompozit cihaz geometrisi

Moleküler seviyede auxetic malzemelerin tasarımı ve sentezi, auxetic malzemelerin geliştirmesinde en çok heyecanlandırıcı unsurlardan biri oldu. Bu güne kadar bu polimerlerin pratik uygulamaları olsa da sınırlı sayıdadır. Yine de, bir geleneksel polimer matrisde ki nanofiber içeren polimer tabanlı auxetic malzemelerin geliştirilmesi bir alternatif yaklaşım olarak yakınlarda raporlandı [25].

#### 1.4. Auxetic Malzemelerin Özellikleri

Auxetic malzemeler çekildiği zaman kalınlaşarak olağandışı bir özellik gösterir ve sadece bu malzemelere has bazı özellikler mevcuttur. Örneğin malzemelerin auxetic davranış gösterecek şekilde tasarlanması halinde, kırılma toklukları, kayma modülleri, indentasyon dirençleri artar ve akustik özellikleri iyileşir.

##### 1.4.1. Kayma modülü

Auxetic malzemelerin en önemli özelliklerinden biri burulma ya da kopma kuvvetlerine maruz kaldığında yüksek kayma direnci göstermesidir [26]. Kayma direnci yapı malzemelerinde, plakalar, inşaatlardaki kirişler, arabalar, uçaklar gibi yerlerde özellikle önemli bir yere sahiptir. Bu özellik, kayma modülü (rijitlik modülü)  $G$ , young modülü  $Y$  ve bulk modülü  $K$  (sünekliğin tersi) ve Poisson Oranı ( $\nu$ ) kavramlarının birbirleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki denklemlerden çıkartılabilir.

$$v = \frac{1}{2} \left( \frac{3K-2G}{3K+G} \right) \quad (1.1)$$

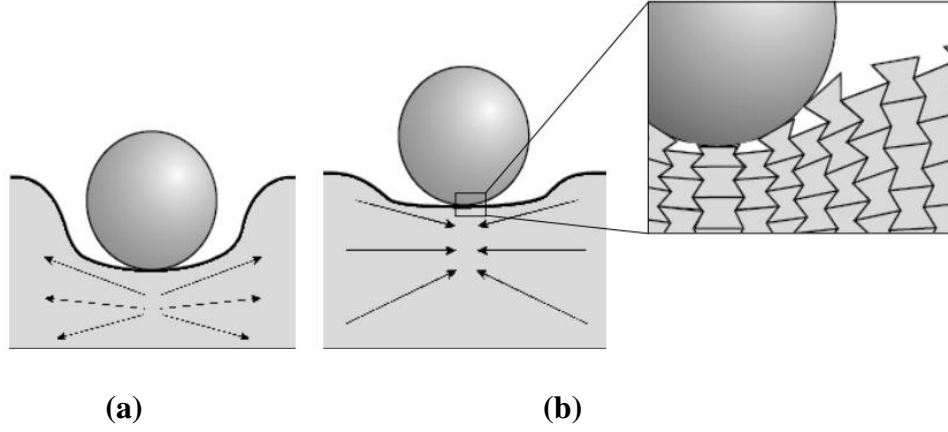
$$E = \frac{9KG}{3K+G} \quad (1.2)$$

v değeri , +0,5 değerine yaklaştığı zaman, bulk modülü (K), kayma modülü(G) ne göre çok daha büyük bir değer alır ki bu malzemenin kolay kaymasını sağlar. Başka bir deyişle v değeri -1 e yaklaştığında, kayma modülü belirgin olarak artar ve E azalır ve dolayısıyla deforme olması kolaylaşır. K, -1 e yaklaştığı zaman ise şu anlama gelir: malzemenin kayması zorlaşır ancak oldukça sıkıştırılabilir olur.

#### 1.4.2. İndentasyon davranışı

Auxetic malzemeler, şok emiliminin önemli olduğu birçok uygulamada kullanılabilirler [27]. Auxetic olmayan bir malzemeye indentasyon kuvveti uygulandığında malzemenin uygulanan kuvvete dik olarak yayılma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum şekil 1.9 (a) da gösterilmiştir. Öte yandan auxetic malzemelerin indentasyon altındaki davranışları şekil 1.9 (b) gösterilmiştir. indentasyon kaldırıldığı zaman auxetic malzeme orijinal şekline geri döner [28].

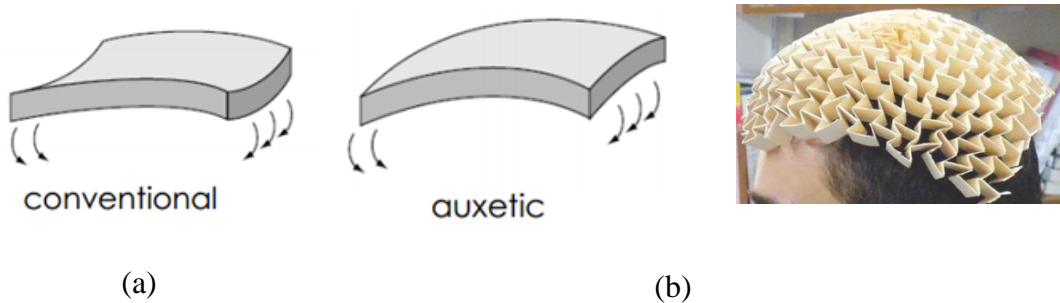
Ayrıca Auxetic olmayan UHMWPE ve Auxetic UHMWPE indentasyon direnci zayıf ultrasonic sinyaller altında karşılaştırıldığında, Auxetic UHMWPE diğer Auxetic olmayan UHMWPE ye göre indentasyon direncinin 3 kat fazla olduğu gözlemlenmiştir [29].



**Şekil 1.9** Auxetic olmayan(a) ve Auxetic (b) Malzemelerin yük altında çentikleme direncinin gösterilmesi [30]

### 1.4.3. Sinklastik eğrilik

Sinklastik davranış, bükülmeye maruz kalan malzemelerin yerine deforme olmuş kubbe şeklini alma kabiliyeti olarak açıklanmıştır. Auxetic malzemeler, sele şekli alma eğiliminde olan malzemelerin aksine kubbe şeklini alma eğilimindedirler. Genel malzemeler dışarıdan bir eğme momentine maruz kaldıklarında yüzeyleri uygulanan kuvvete dik doğrultuda kaçınılmaz olarak küçülme eğilimindedir. Yukarı doğru kıvrılma eğiliminden dolayı antiklastik eğilme gösterir. Bu durum şekil 1.10 (a) da gösterilmiştir. Ancak Auxetic malzeme, aşırı işlemeye veya yüklemeye gerek kalmadan uygun hasar altında sinklastik ya da çifte eğilim gösterir ve bu durum şekil 1.10(b) de gösterilmiştir [31].



**Şekil 1.10** Konvansiyonel malzemelerin antiklastik davranışı (b) Auxetic malzemelerin kubbeleşme kabiliyeti [30]

#### **1.4.4. Kırılma tokluğu**

Auxetic malzemeler, kompozitlerde zayıf kısımlar için kırılma tokluğunu artırmak amacıyla kullanılırlar. Kompozitlerde en zayıf kısım fiber ve matriks ara yüzeyidir. Auxetic olmayan fiber içeren kompozitlerde çekme esnasında fiberler ve matriksler arasında kırılma meydana gelir. Ancak Auxetic malzemelerde gerilim altında liflerde genişleme olduğundan matriks-fiber ara yüzeyinde kopma meydana gelmez. Ayrıca Auxetic malzemeler diğer genel malzemeler ile kıyas edildiğinde daha yüksek kırılma tokluğu gösterirler. Örneğin geleneksel polüüretan-polyester köpük malzemeleri ile kıyas yapıldığında Auxetic köpüğün kırılma tokluğu sırasıyla 1.7, 2.1, 2.3, 2.6, 3.2 ve hacimsel basınç altında oranı 2.0, 2.6, 3.2, 3.7 ve 4.2 ye artmış olduğu görülür [32]. Dahası auxetic malzemeler yüksek çarpışma direnci gösterirler. Çarpışma meydana geldiğinde auxetic malzemeler genişler ve çarpışma noktasına yaklaşır. Bir başka deyişle bu tip malzemeler çarpışma esnasında daha fazla kırılma direncine sahiptirler.

#### **1.4.5. Sönümlenme ve ses absorpsiyonu**

Negatif Poisson oranlı köpükler diğer geleneksel köpükler ile karşılaştırıldığında, büyük ölçüde daha iyi ses emilimi ve akustik özellikler gösterir. Auxetic köpükler auxetic olmayan köpüklere nazaran çeşitli frekanslarda daha iyi ses emilimi kapasitesi gösterirlerken dinamik ezilme performansı diğer malzemelere göre çok daha özel sonuçlar vermiştir.

### **1.5. Uygulama Alanları ve Auxetic Malzemelerin Geleceği**

Auxetic malzemeler gelişmiş mekanik özellikleri benzersiz deformasyon mekanizmaları ve şekil hafızaları nedeniyle biyomedikal, filtreleme, şok emilimi, ses yalıtımı, medikal cihazlar mesela stentler gibi, taşıma sistemleri, implantlar ve protezler gibi uygulamalarda geleneksel malzemelerin yerlerini alacaklardır. Ayrıca Auxetic malzemeler daha birçok tanımlanan sektörde, (tekstil endüstrisi, uzay,

koruma, sensörler, ve diğer sektörler gibi) önemli bir yere sahiptir [33]. Bazı temel uygulamalar aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1 Auxetic Malzemelerin Uygulama Alanları [33]**

Areas	Applications
Textiles	Auxetic fibers, threads, functional fabric, color-change straps or fabrics.
Industry	Reinforcement fibers, air filters, gasket, fishnet, rope or cord, filter, fastener, rivets, seal, seat cushions, earphone cushions, shock absorbers, sound absorbers, stress decay, packaging materials, radome.
Aerospace	Curved body part, aircraft nose-cones, wing panel.
Protection	Crash helmet, projectile-resistant or bullet proof vest, shin pad, knee pad, glove, porous barrier, protective clothing, car bumpers.
Biomedical	Bandage, wound pressure pad, dental floss, artificial blood vessel, artificial skin, drug release, surgical sutures, muscle/ligament anchors.
Sensors and actuators	Hydrophone, piezoelectric devices, miniaturized sensors.

Geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında negatif Poisson oranlı auxetic malzemeler, benzersiz mekanik özellikler, şekil hafızası, indentasyon direnci, yüksek kırılma tokluğu, yüksek kayma modülü gibi üstün özellikler gösterir. Auxetic malzemelerin 21. Yüzyılda gelişimi halen devam etmekte olan 16 akıllı malzemedен biri olacağına kesin gözüyle bakılmaktadır. Ek olarak bu malzemeleri daha fazla anlayabilmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Dahası gelecek çalışmaları için tekstil, malzeme, kimya ve biyoloji alanlarındaki araştırmacılar el birliği yapıp potansiyel uygulamaları keşfetmeleri gerekmektedir.

## 2. AUXETIC PLAKALARIN TASARIMI VE URETIMI

### 2.1. Tasarım

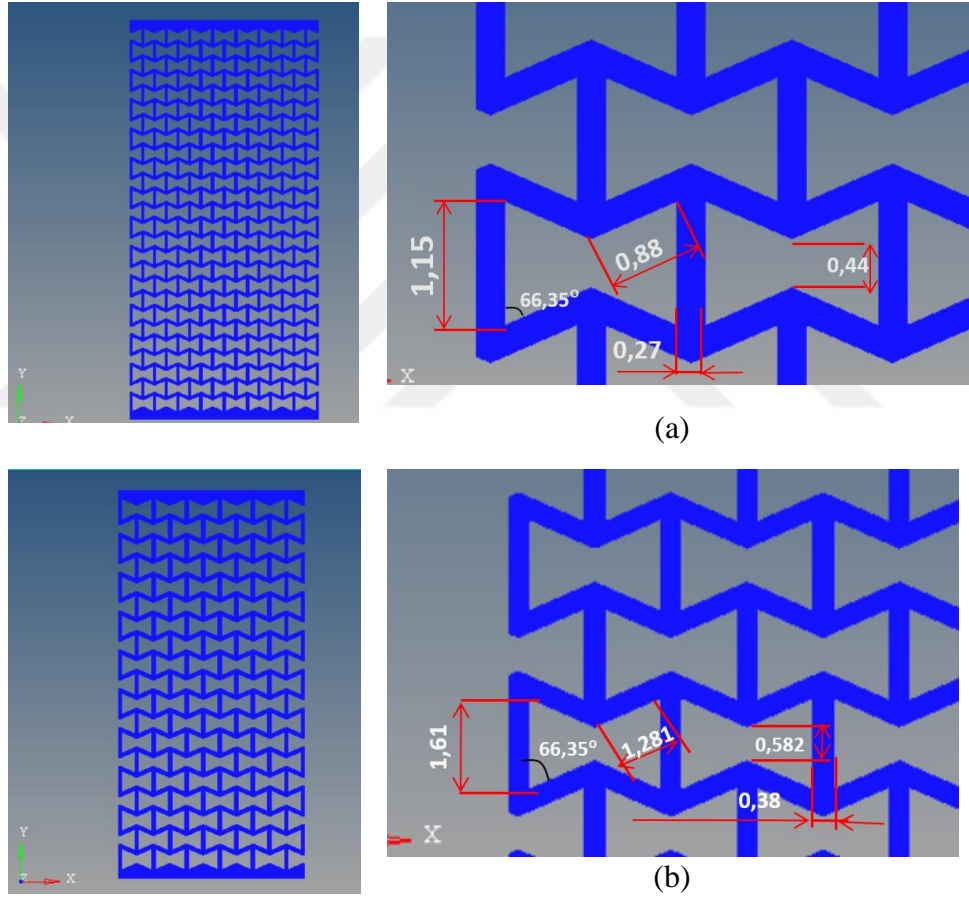
Bu tez çalışmasında re-entrant hegzagonal hücre şekilleri kullanılarak auxetic davranış elde edilmeye çalışılmıştır. Bir önceki bölümde izah edildiği gibi auxetic malzemeler, doğal ve insan yapımı olmak üzere ikiye ayrılır ve insan yapımı auxetic malzemelerin en önemli sınıflarından birisi re-entrant yapılardır. İnsan yapımı auxetic malzemeler mikro yada geometrik yapıdaki deformasyon kabiliyetleri sayesinde negatif poisson oranına sahiptirler. Re-entrant yapılar geometrik düzeyde sistemin deformasyon kabiliyeti sayesinde negatif Poisson Oranına sahip olurlar. Malzemenin mekanik özelliği olan Poisson Oranı değişmez, sistemin eşdeğer Poisson Oranı negatiftir.

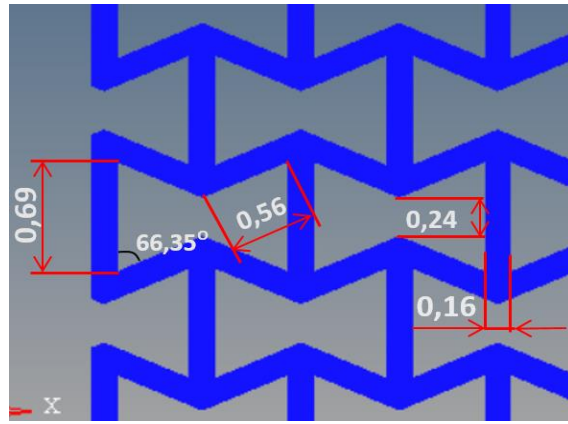
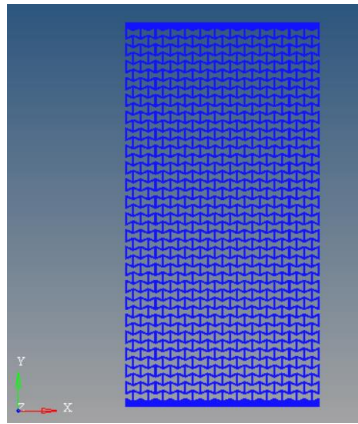
Tasarımlar Solidworks yazılımı sayesinde oluşturulmuştur. Bu auxetic tasarım daha sonrasında kalp damarları için kullanılacak olan bir stentin dokusunu oluşturacaktır. Hücrelerin boyutlarını ve kalınlığını kullanılacak stent için optimize etmek üzere 3 farklı hücre boyutu ve 2 farklı kalınlıkta toplam 6 adet numune tasarlandı ve üretildi. Numunelerin detayları çizelge 2.1 ve şekil 2.1 de görülmektedir

**Çizelge 2.1** Numunelerin Ölçüleri

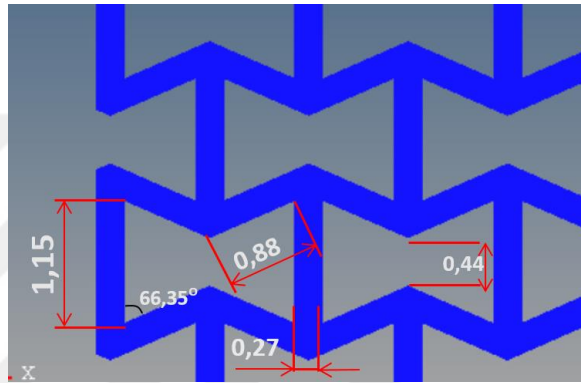
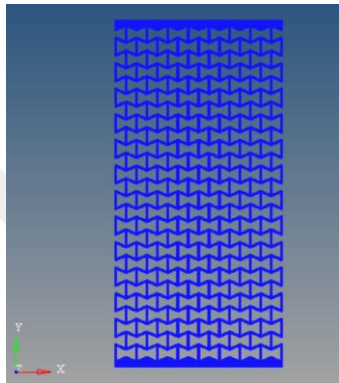
Numuneler	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Boyuna hücre sayısı	Enine hücre sayısı
Numune 1 (Orijinal)	0,025	30,045	15,272	26	8
Numune 2 (+%40)	0,025	30,305	15,380	19	5,5
Numune 3 (-%40)	0,025	29,721	15,577	44	13
Numune 4 (Orijinal)	0,05	30,045	15,272	26	8
Numune 5 (+%40)	0,05	30,305	15,380	19	5,5
Numune 6 (-%40)	0,05	29,721	15,577	44	13

Numuneler, ilerideki sayfalarda yer alan çalışmalarda ve tartışmalarda Numune 1 (Orijinal numune), Numune 2, Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 olmak üzere adlandırılmıştır ve boyutlandırma şekil 2.1 deki gibi yapılmıştır. Numune 1 olarak kabul ettiğimiz 0,025 mm kalınlığındaki numune asıl tasarımıdır ve orijinal hücre boyutlarını temsil etmektedir. Numune 2 ve Numune 3 un boyutları asıl tasarımda alınan hücre boyutlarının sırasıyla %40 büyütülmüş ve %40 küçültülmüş durumlarıdır. Numune 1 Numune 2 ve Numune 3 aynı kalınlıkta (0,025mm) üretilmiştir. Numune 4, Numune 5 ve Numune 6 sırasıyla Numune 1, Numune 2 ve Numune 3 ile aynı boyutlarda olmasına rağmen kalınlıkları 0,05 milimetredir.

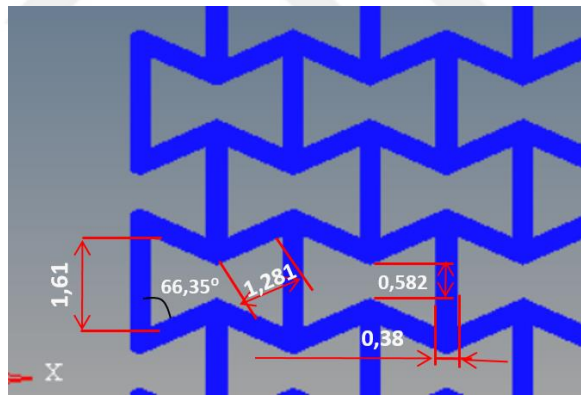
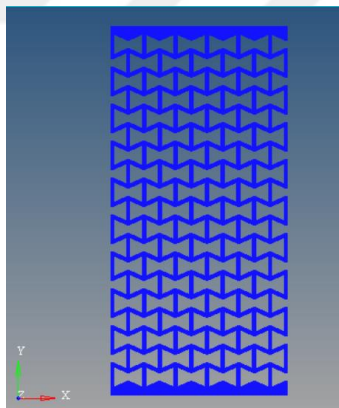




(c)

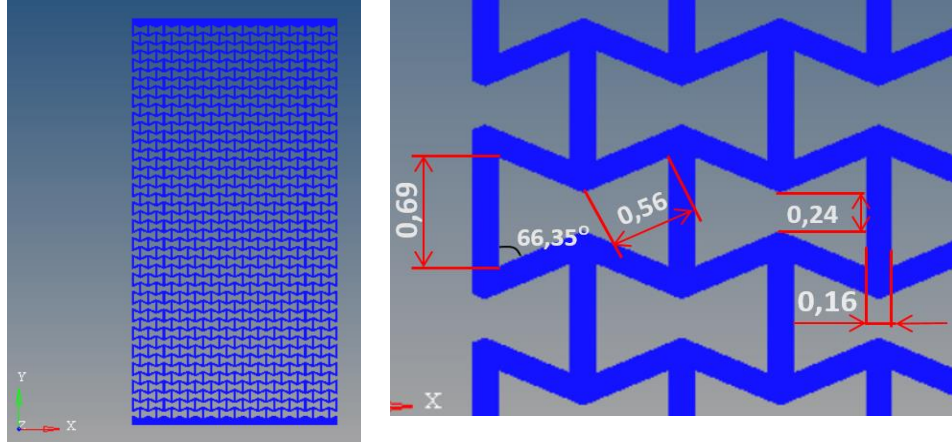


(d)



(e)





(f)

**Şekil 2.1** Farklı kalınlık ve boyutlardaki numuneler (a) (Orijinal) 0,025mm kalınlık (b) Orijinal +%40 0,025mm kalınlık (c) Orijinal -%40 0,025mm kalınlık (d) (Orijinal) 0,050mm kalınlık (e) Orijinal +%40 0,050mm kalınlık (f) Orijinal +%40 0,050 mm kalınlık

## 2.2. Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Auxetic yapı elde etmek için kullanılan temel malzeme Maudlin & Son Mfg. Co.Inc tarafından üretilen tavllanmış paslanmaz çelik 316L malzemesidir. Malzemenin katalog özellikleri çizelge 2.2 de gösterilmiştir. Malzeme 0,025mm ve 0,05mm kalınlıkta kullanılmıştır ve kalınlık etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple çizelgedeki katalog değerleri yerine çekme testiden elde edilen değerler kullanılmıştır.

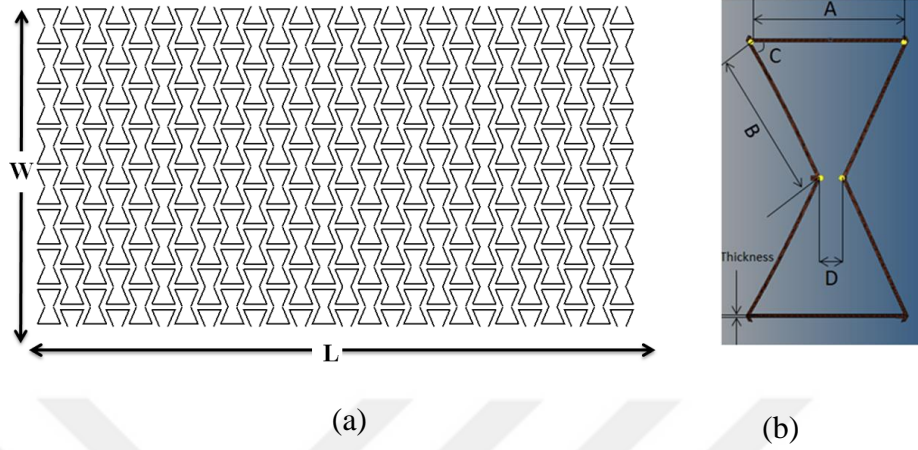
**Çizelge 2.2** Paslanmaz çelik 316L nin mekanik özellikleri [34]

Grade	Kopma Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama	Sertlik
316L	485 (MPa)	170 MPa	%40	95 HRB MAX

## 2.3. Üretimi

Her bir numune için şekil 2.2 de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 30mm boyunda ve 15 mm genişliğinde plaka üzerine çizelge 2.1 ve şekil 2.1 deki verilen ölçülerdeki

auxetic yapılar Femtosecond lazer kesim mikro işleme sistemi ile işlenmiştir. Her numune için kullanılan hücre ölçüleri çizelge 2.3 de detaylı olarak gösterilmiştir.



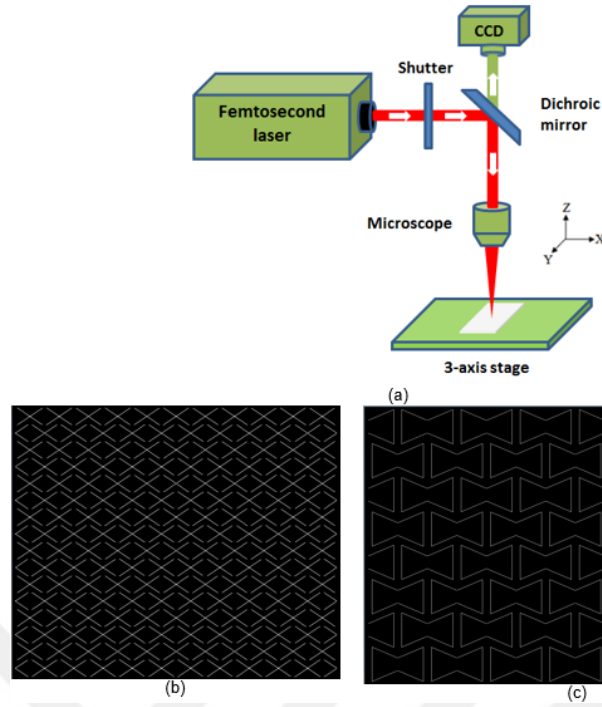
Şekil 2.2 (a) Auxetic desene sahip geometri (b) Birim hücrenin boyutlandırılması

Çizelge 2.3 Numunelerin femtosecond lazer de işlenilen ölçüleri

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
<b>A</b>	1,15	1,61	0,69	1,15	1,61	0,69
<b>B</b>	0,88	1,281	0,56	0,88	1,281	0,56
<b>C</b>	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35
<b>D</b>	0,44	0,582	0,24	0,44	0,582	0,24
<b>Eklem yerlerin kalınlığı</b>	0,27	0,38	0,16	0,27	0,38	0,16

### 2.3.1. Femtosecond lazer kesiminin işlem süreci

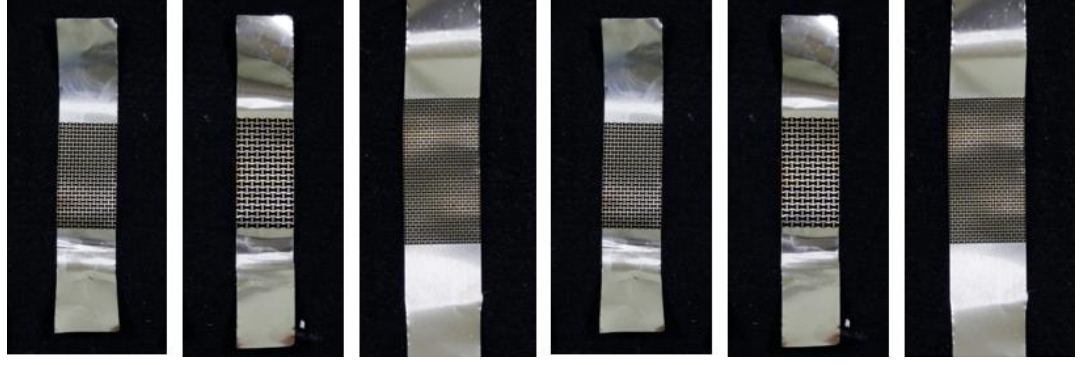
Paslanmaz çelik levha üzerine auxetic yapıların işlenme süreci şekil 2.3 deki şematik diyagramda gösterilmiştir. Femtosecond (Femtosaniye) lazer 120 fs atımlar yaparak 1 kHz tekrar oranıyla merkezi 800 nm olan dalgalar üreterek malzeme üzerine desenleri işler ve çıkartır. Lazer kesimin izlediği yol ve nihai ürün şekil 2.4 de gösterilmiştir.



**Şekil 2.3** (a) Deney setinin şematik görünümü (b) Femtosecond lazerin izlediği yolu (c) lazer kesimde nihai geometri

Lazer ışını mikroskop ve 20x odaklanmış 0,42 diyafram açıklığına sahip lens ile yönlendirilir. Işın çapını ince genişlikteki kesimlerde 3 mm'ye düşürmek için iris diyafram kullanılmıştır. Bilgisayar tarafından kontrol edilen istenilen bölgede ve zamanda kendini açıp kapatan elektronik bir perde kullanılmıştır. Yapı işlenirken ışınların femtosecond atımları, dichroic ayna üzerine yerleştirilen CCD kamera sayesinde incelenebilir. Lazer ışınlar numune üzerine yaklaşık 20  $\mu\text{m}$  odaklanmış durumdadır. Lazer kesim işlemi bittiğinde çelik plaka nispeten nihai üründen daha büyüktür (35 mm uzunluk 20 mm genişlik). Bu plaka düz cam bir başlığa sabitlenir ve 3 eksenli bilgisayar kontrollü plakaya aynı metot ile monte edilir. Numunelerin köşelerinde hassas kesimler elde etmek için 0,3 mm/s hızında işlenir. 0,5 mm/s den daha hızlı işlendiğinde pürüzlü kenarlar olduğu gözlenmiştir. Bu işlem sonrasında nihai ürün elde edilir.

Üretilmiş gripli ve gripsiz bütün numuneler şekil 2.4 de gösterilmiştir.



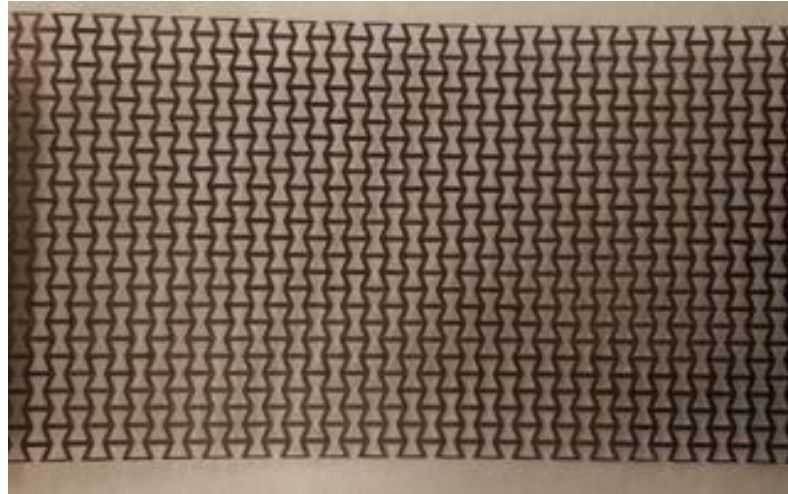
Numune 1 Numune 2 Numune 3 Numune 4 Numune 5 Numune 6



Numune 1 Numune 2 Numune 3 Numune 4 Numune 5 Numune 6

**Şekil 2.4** (a) Gripli numuneler (b) Gripsiz numuneler

İşlemden sonra numuneler kesilmiş kısımlardan ayrılırken herhangi bir deformasyona uğramaması için aseton ile ıslatılır ve sonikasyon cihazı ile temizlenir. Temizleme işleminin sonunda şekil 2.5 da görüldüğü gibi numune elde edilir. Bu gripsiz numunelerin elde edilmesi stent haline getirebilmek için önemlidir.



**Şekil 2.5** Temizleme işleminden sonra tamamlanmış numune

### **3. AUXETIC PLAKA MALZEMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESBİTİ VE ÇEKME DENEYİ SİMÜLASYONU**

Auxetic yapının davranışını incelemek ve simülasyonları gerçekleştirebilmek için plaka malzemesinin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi gereklidir. Testlerden elde edilen parametreler sayesinde auxetic plakaların sonlu elemanlar modeli oluşturulabilir ve bilgisayar ortamında farklı yükleme durumlarında analizleri yapılabilir. Tez kapsamında sonlu elemanlar analizi paket yazılımı HyperWorks® kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Test ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması için izlenen yol sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- Tek eksenli çekme testi yapılmıştır.
- Çekme testinden elde edilen parametreler kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş çekme testi simüle edilmiştir.
- Konvansiyonel malzemenin analiz sonuçları ve test sonuçları karşılaştırılmıştır.

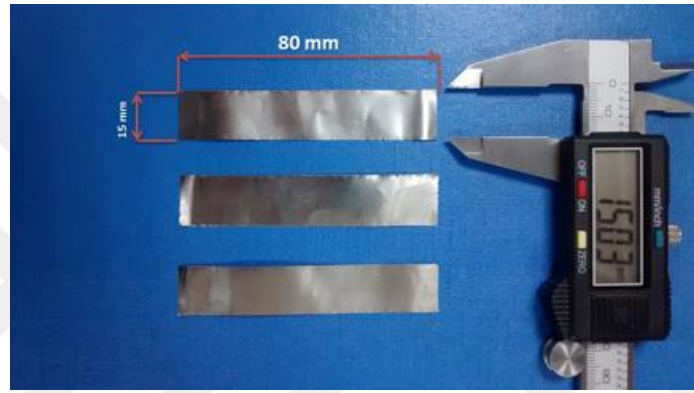
#### **3.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi**

Tek eksenli çekme deneyi, malzeme parametrelerinin belirlenmesi için en yaygın olarak kullanılan temel deneylerden birisidir. Bu deneyle, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, yüzde uzama, yüzde kesit daralması ve Young Modülü gibi önemli ve malzeme seçimi için kritik olan parametreler belirlenir. Auxetic yapıların üzerinden kesildiği temel yapı malzemesinin parametrelerini belirlemek için, belirli bir hızda, malzeme hasar görene kadar eksenel çeki yükü uygulayarak, çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Testler, Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Shiamdzu Marka AGX Model universal çekme deneyi cihazıyla yapılmıştır. Çekme yükü ve uzama değerleri kaydedilmiş ve daha sonra birim şekil değiştirme ve gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Numuneler çok ince olduğundan, aşağıda belirtilen özel işlemler takip edilmiştir. Testler oda sıcaklığında yapılmış olup, tutucu çenelerden numunenin kaymasını önlemek için özel bir tutucu hazırlanmıştır.

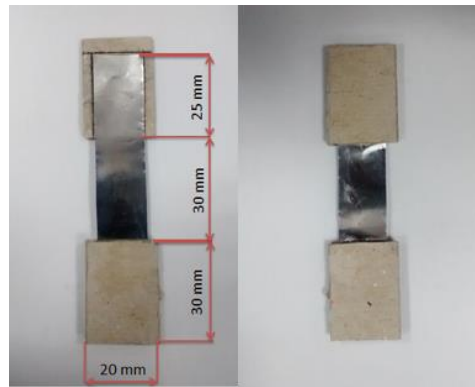
### 3.1.1. Numunelerin hazırlanması

İlk olarak, üç numune 0,025 mm kalınlığındaki örnekten şekil 3.1 de gösterildiği gibi dikdörtgen olarak kesilmiştir ve ölçüler şekilde belirtildiği gibidir.



Şekil 3.1 Çekme testi yapılacak konvansiyonel numuneler

Tutucu çenelerin numuneden kaymasını önlemek için, şekil 3.2 de gösterildiği gibi numunenin çenelere gelen kısmına kadar karton bir tutucu yapıştırılmıştır.



Şekil 3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanışı



Bu şekilde hazırlanan numuneler, şekil 3.3 (a) da gösterildiği gibi cihaza bağlanmıştır. Test hızı 3 mm/dakika olacak şekilde ayarlanmıştır. Üç kere testler tekrar edilmiştir ve hasara uğramış olan numuneler şekil 3.3 (b) de sunulmuştur.



(a)

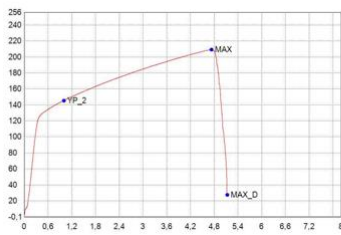


(b)

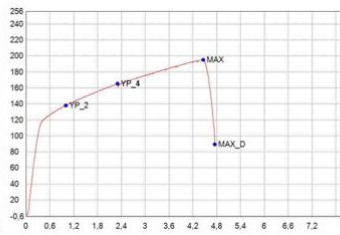
**Şekil 3.3** (a) Numunenin cihaza bağlanma şekli (b) Konvansiyonel malzemenin çekme testi sonucu hasar şekilleri

### 3.1.2. Gerilme gerinme eğrileri

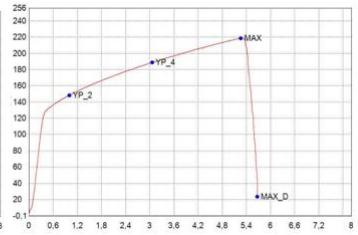
Testlerden elde edilen kuvvet ve uzama değerleri şekil 3.4 (a), (b) ve (c) de üç numune için gösterilmiştir. Daha iyi bir karşılaştırmaya imkan sağlamak için şekil 3.4 (d) de üç eğri bir arada sunulmuştur. Şekil 3.4 (d) de ayrıca üç numunenin ortalama eğrisi çizilmiştir.



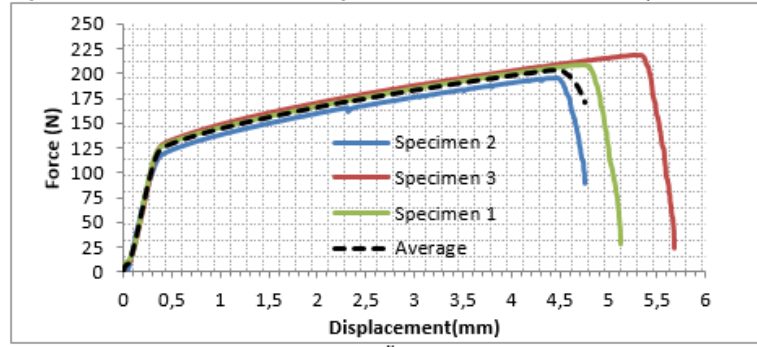
a) Numune 1



b) Numune 2



c) Numune 3



d)

**Şekil 3.4** (a)-(c) Numune 1, 2 ve 3 için kuvvet-uzama grafikleri (d) Üç numunenin karşılaştırılması ve ortalama grafiği

Şekil 3.4 (d) de görüldüğü gibi, üç numunede benzer değerlere sahiptir. Bu deneylerin tekrarlanabilirliğini göstermektedir dolayısıyla güvenilirliğini ispatlamaktadır. Bu sebeple, ortalama eğri, daha ileriki sonlu elemanlar analizlerinde rahatlıkla kullanılabilir. Doğrusal sonlu elemanlar analizleri için, sadece Young Modülü ve Poisson Oranına ihtiyaç duyulacaktır. Bu parametreler, eğrilerin doğrusal kısmından kolayca hesaplanabilir. Bu amaçla, yük ve uzama değerlerinin gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerine aşağıda verilen formüllerle çevrilmesi gerekmektedir:

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{ve} \quad \sigma_e = \frac{P}{tW} \quad (3.1)$$

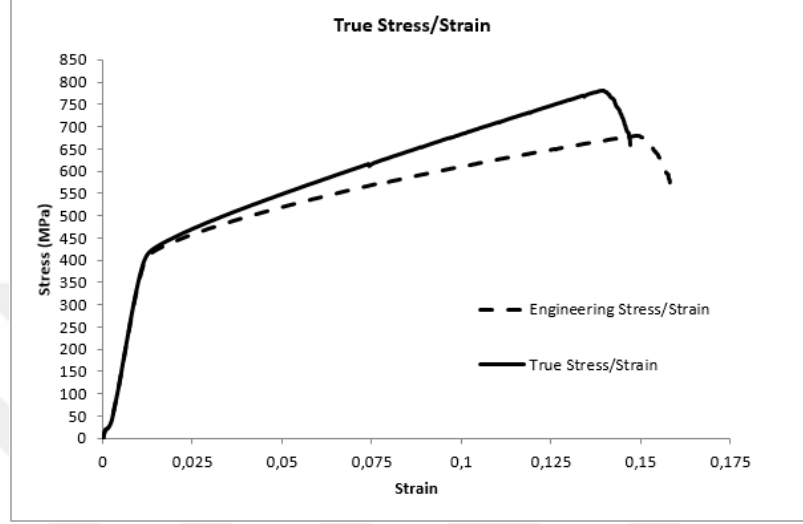
Burada  $l_0 = 30$  mm,  $t = 0,025$  mm ve  $W = 15$  mm olarak hazırlanan numunelerin boyutlarını temsil etmektedir.

$\varepsilon_e$  , mühendislik birim şekil değiştirmesi ve  $\sigma_e$  mühendislik gerilmesi değerleridir. Ancak doğrusal olmayan analizler için gerçek gerilme, birim şekil değiştirme değerlerine ihtiyaç duyulacaktır. Ayrıca plastik bölge de hesaba girecektir. Bu amaçla, aşağıda verilen ilişkiden yararlanarak, mühendislik eğrileri, gerçek eğrilere dönüştürülmelidir.



$$\varepsilon_{tr} = \ln(1 + \varepsilon_e), \quad \sigma_{tr} = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (3.2)$$

Aşağıda verilen şekil 3.5 de, mühendislik ve gerçek eğrilerin karşılaştırması sunulmuştur.



**Şekil 3.5** Mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Test sonucunda konvansiyonel malzeme için elde edilen Young modülü (25 GPa) çeliğin bilinen Young modülü (210 GPa civarı) değerinden farklıdır. Bunun sebebi çeliğin folyo formunda ve dikdörtgen şekilde bir numuneyle test edilmesidir. Dolayısıyla dumbbell veya dog-bone gibi bulk halindeki numunelerden farklı bir davranış gösterecektir [44]. Örneğin, dumbbell numunedeki gibi kap-külah (cup-cone) yapısını oluşturacak kadar alan olmayacaktır. Yada dog-bone numunedeki gibi 45 derecelik doğrultuda mikro boşlukların birleşmesi söz konusu olmayacaktır ve hasar daha çok yırtılma formunda olacaktır. Başka bir çalışmada [43] yine 316L paslanmaz çelik folyo için benzer sonuçlar gözlenmiştir. Söz konusu çalışmada sunulan gerilme- gerinim eğrilerinden yaklaşık olarak hesaplanan Young Modülü değerleri 50 GPa civarında olup yine 210 GPa değerinden çok farklıdır.

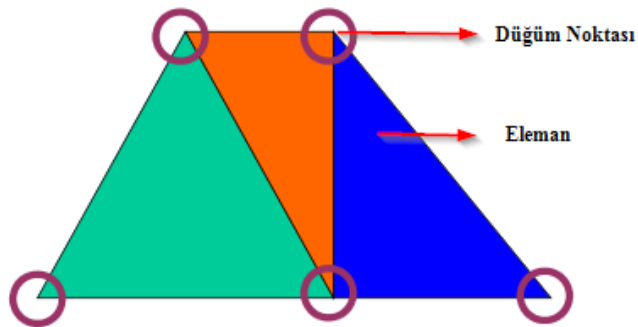
Elastisite modülündeki bu farklılığın yapılan ölçümle ilgili bir hata sonucu oluşması çok düşük bir ihtimaldir. Örneğin, testlerde clip gage ekstansiyometre

kullanılmamıştır ve yerdeğıştirmeler çenelerden ölçülmüştür. Bunun ölçümde bir hata oluşturması beklenmez çünkü testlerde ulaşılan maksimum kuvvet seviyeleri 200 N civarındadır ve bu değerlerde test cihazının esnemesi mümkün değildir.

### 3.2. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözümlenmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metottur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarı ile kullanılabilceğı anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi olmuştur. Metodun değışik mühendislik alanlarında bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değıştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir [35].

Sonlu elemanlar metodundaki temel mantık, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüme götürmektir. Bu metotta çözüm bölgesi, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağılı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Yani kısacası birbirine çok sayıda düğüm noktalarıyla (Şekil 3.6) bağlanmış parçalara ayrılan problemin çözümü kolay bir şekilde yapılabilmektedir [36].



Şekil 3.6 Sonlu elemanlar modeli örneğı [37]

Sonlu elemanlar yönteminde modellenecek tasarım temel olarak aşağıdaki matris formuna dönüştürülür.

$$[K]. [D] = [R] \quad (3.3)$$

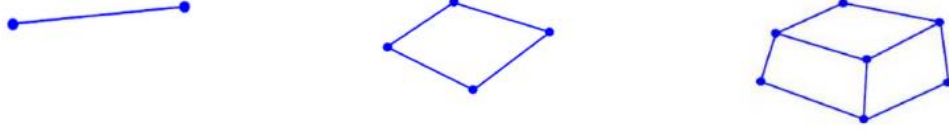
Burada  $[D]$  büyüklük alanının düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerleri temsil eden vektör,  $[R]$  bilinen yük vektörü ve  $[K]$  ise bilinen sabitler matrisidir. Daha basite indirgersek R sınır şartlarını (dışarıdan etkiyen yükler vs.), K sistemin yapısını temsil eder (katı, akışkan, gaz vs. özellikleri), D ise düğüm noktaları üzerinde elde edilmeye çalışılan değerlerdir. (gerilme, kuvvet vs)

Buradan anlaşılacağı üzere D matrisinin bulunabilmesi için sistemi temsil eden büyüklüklerin verilmesi (K matrisi) ayrıca dışarıdan etkiyen sınır şartlarının da bilinmesi gereklidir. (R matrisi) [38].

### 3.2.1. Sonlu elemanlar metodunda modelleme

Analizini gerçekleştirmek istediğiniz problemlerin sayısal çözümlerinin yapılabilmesi için ayrıklaştırılmalıdır. Örneğin, detaylı bir montaj modelinde, yapısal bir problem ile ilgilendiğimizi düşünelim. Fiziksel modelleri bütünüyle sonlu elemanlar analizine taşımamız çok zor ve karmaşık olacağından öncelikle geometrik model üzerinden, incelenmek istenmeyen veya sonuçlara daha az etkisi olduğu düşünülen parçalar modelden çıkartılarak sadeleştirme yapılmalıdır. Ardından parçalara ait ağ yapısı oluşturulmalıdır. Aynı zamanda, modeldeki civata, kaynak, perçin gibi bağlantı elemanlarının yerine bir boyutlu modeller, ağırlıklar yerine de noktasal kütleler tanımlanarak problem daha sade bir hale getirilebilir. Model ayrıklaştırılmasının temeli ise parçalar üzerinde ağ yapılarının oluşturulmasıdır. Ağ yapısı eleman ve düğüm noktalarından oluşmaktadır. Düğüm noktaları arasındaki boşluklar da elemanlar olarak tanımlanmaktadır [39].

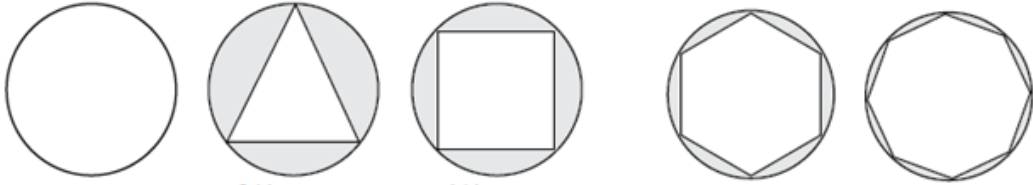
Genel bir ifade ile, sonlu elemanlar analizinde, problem çözümleri düğüm noktalarında gerçekleştirilmekte ve interpolasyon yardımıyla elemanlar üzerindeki sonuçlar elde edilmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan elemanlar, bir boyutlu çizgisel elemanlar, 2 boyutlu kabuk elemanlar ve 3 boyutlu katı elemanlar olarak tanımlanabilir



Şekil 3.7 Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri [40]

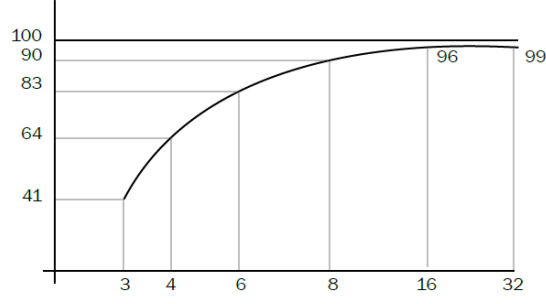
### 3.2.2. Uygun ağ yapısının oluşturulması

Sonlu elemanlar analizinde oluşturulan ağ yapısı, analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Temel amaç, geometriyi olabildiğince iyi bir şekilde temsil edebilecek bir ağ yapısının oluşturulmasıdır. Şekil 3.4’ te bir daire ve bu yapıyı temsil edecek farklı sayılardaki çizgiler ele alınmıştır. Burada çizgiler sonlu elemanlar olarak düşünülebilir. Resimlerden görüldüğü gibi çizgi sayısı arttıkça daire gerçeğe daha yakın olarak modellenebilmekte ve hata oranı düşmektedir.



Şekil 3.8 Bir daireyi temsil eden farklı sayıdaki çizgiler [40]

Verilen örnekte daire alanı 100 birimdir. 3 çizgi kullanıldığında bu alan 41, 4 çizgi kullanıldığında ise 64 birim olarak hesaplanmaktadır. Çizgi sayısı arttıkça gerçek değere yakınlık artacaktır. Bu durumda daire şeklinin mümkün olan en fazla sayıda çizgi ile temsil edilmesinin doğru bir yaklaşım olduğu düşünülebilir, ancak artan eleman sayısının çözüm süresini doğrudan etkilediği düşünülürse bu yaklaşım çok da uygun değildir. Şekil 3.9’ te yer alan grafikte artan çizgi sayısına bağlı olarak hesaplanan alan değerleri görülmektedir. Örneğin; dairenin 8 çizgi ile temsil edildiği durumda gerçek sonuca % 90 oranında bir yakınsama olduğu belirlenmiştir.

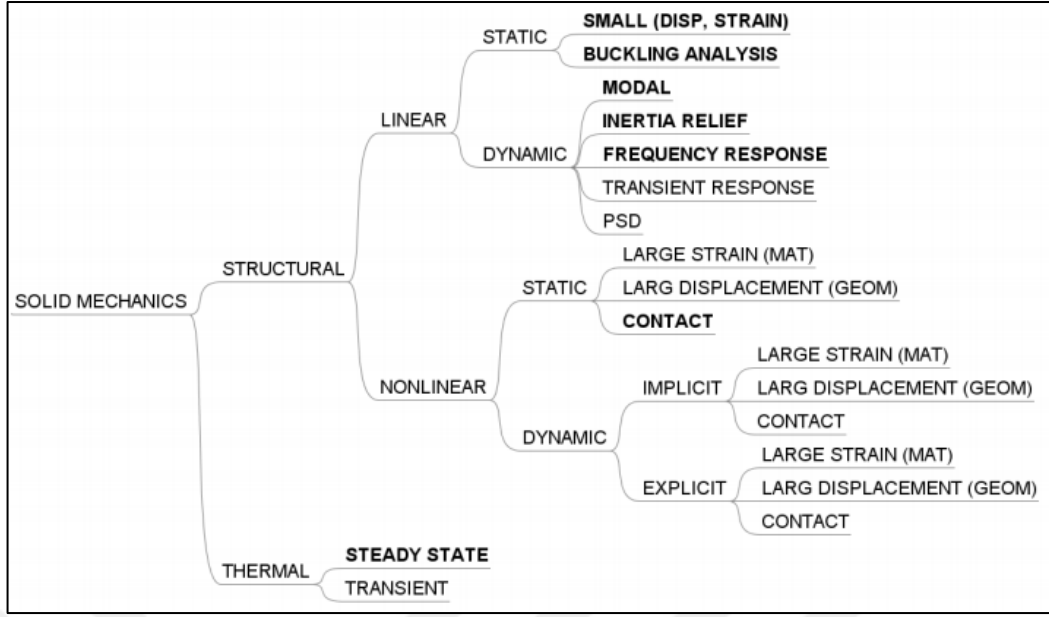


**Şekil 3.9** Çizgi sayısına bağlı olarak hesaplanan daire alanının değişimi [40]

Sonlu elemanlar metodunun bir yaklaşım olduğu düşünülürse, gerçekleştirilen analizin hassasiyeti ve çözüm için harcanacak ekstra zaman da dikkate alınarak bu oranın uygun bir yaklaşım olduğuna kanaat getirilebilir. Eleman sayısı ile kabul edilebilecek doğruluk arasında bir denge kurulmalı, buna uygun olarak optimum bir ağ yapısı seçilmelidir [39].

### 3.2.3. Sonlu elemanlar metodu yöntemlerinin sınıflandırılması

Hareket halindeki bir sistemi temsil eden adi diferansiyel denklemler lineer ise bu problemler analitik olarak çözülebilmektedir. Ancak gerçek fiziksel olaylar daima lineer olmayan durumlardır. Lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümü için nümerik yöntemler kullanılmaktadır. Bir analize başlamadan önce hangi yöntemin kullanılacağı belirlenmelidir. Bunun için şekil 3.10 da verilen tablodan yararlanılabilir.



**Şekil 3.10** Katı mekaniği için analiz çeşidini belirlemekte kullanılacak şema [42]

Linear olmayan sistemlerin zamana göre hareket denklemleri zaman integrasyonu yapılarak çözülebilmektedir. Zaman integrasyonu, açık (eksplisit) ve kapalı (implisit) olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

### **Kapalı (implisit) zaman integrasyonu**

Kapalı zaman integrasyonunda, sistemin hem şimdiki zaman adımında hem de bir sonraki zaman adımındaki denklemlerinin hesaplanması ile çözüm elde edilir. Bu yöntemde denge denklemleri kesin olarak elde edileceğinden zaman adımlarının nispeten geniş tutulabilmesi mümkündür, bu durum da çözüme daha kısa sürede ulaşabilmeye olanak sağlar. Ancak büyük deformasyonların olduğu ve kısa süre içerisinde yüksek hızlara ulaşılan problemlerde kapalı yöntemin kullanılması uygun değildir. Kapalı zaman integrasyonu daha çok statik yüklemeler, düşük hızlı davranışların incelendiği modeller ve deformasyonların küçük olduğu durumlarda kullanılır [39].

### **Açık (eksplisit) zaman integrasyonu**

Açık zaman integrasyonu, sistemin bir sonraki zaman adımındaki durumunun şimdiki zaman içerisinde hesaplandığı bir yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan zaman adımı

kapalı zaman integrasyonunda kullanılan zaman adımına göre oldukça küçüktür, bu sayede küçük zaman aralığında büyük deformasyonların gerçekleştiği çarpışma, patlama, yüksek hızlı deformasyon problemlerinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir [39].

Sistemin bilinen  $n$  anındaki hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Ma^n = F_{dış}^n - F_{iç}^n \quad (3.4)$$

Burada,  $M$  kütle matrisini,  $a^n$  ivme vektörünü,  $F_{dış}^n$  dış kuvvetleri,  $F_{iç}^n$  ise iç kuvvetleri temsil etmektedir. Burada ivmeyi yalnız bırakırsak:

$$a^n = M^{-1}(F_{dış}^n - F_{iç}^n) \quad (3.5)$$

elde edilir.  $n + 1$  anındaki yer değiştirmeyi bulmak için merkezi farklar yöntemi kullanılarak zaman integrasyonu yapılırsa:

$$V^{n+\frac{1}{2}} = V^{n-\frac{1}{2}} + a^n \Delta t^n \quad (3.6)$$

$$u^{n+1} = u^n + V^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

hesaplama yapılan düğüm noktasındaki hız ( $v$ ) ve yer değiştirme ( $u$ ) elde edilmiş olunur. Hesaplama yapılırken kullanılan zaman adımı aşağıdaki gibidir:

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} = \frac{(\Delta t^n + \Delta t^{n+1})}{2} \quad (3.6)$$

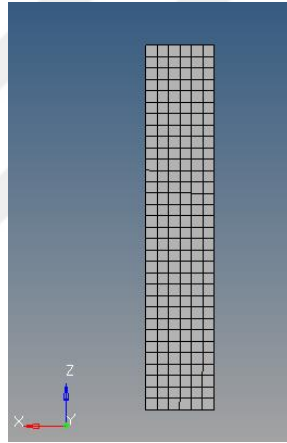
### 3.3. Tek Eksenli Çekme Deneyinin Simülasyonu ve Doğrulanması

Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerinin korelasyonu, kullanılan ağ yapısının uygunluğu ve yakınsama gibi hususları test etmek amacıyla, bir önceki bölümde (Bölüm 3.1) açıklanan çekme deneyinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Analizler ALTAIR HyperWorks® paket yazılımı altında yer alan programlar ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelini oluşturmak için HyperMesh programı, çözücü olarak Radioss yazılımı, analiz sonuçlarını değerlendirmek için ise HyperView ve HyperGraph programları kullanılmıştır.

Tek Eksenli çekme deneyinin simülasyonu. ağ yapısının Oluşturulması, malzeme özelliklerinin modele uygulanması, sınır şartlarının uygulanması, analiz sonrası sonuçların değerlendirilmesi olmak üzere bu adımlardan oluşmaktadır.

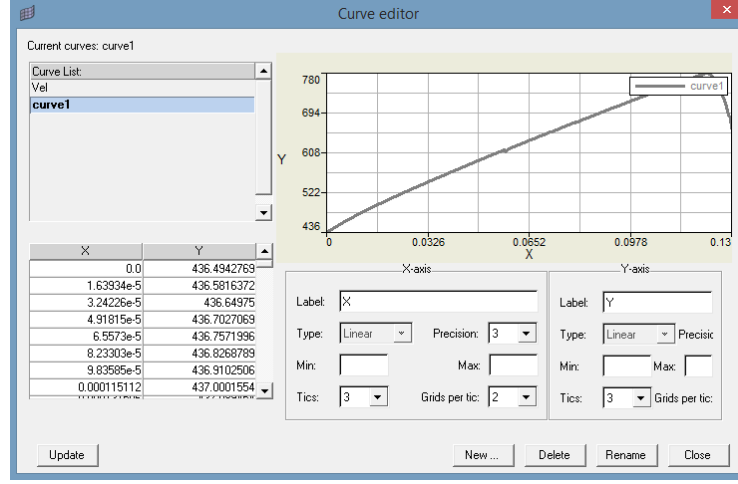
Bu adımlar doğrultusunda tek eksenli çekme deneyinde kullanılan numunelerin bilgisayar ortamında tasarımı yapılmış ve HyperMesh yazılımında dörtgen kabuk elemanlar kullanılarak ağ yapısı şekil 3.11 de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



**Şekil 3.11** Çekme Numunesinin Dörtgen-Kabuk Elemanlar ile Oluşturulan Ağ Yapısı

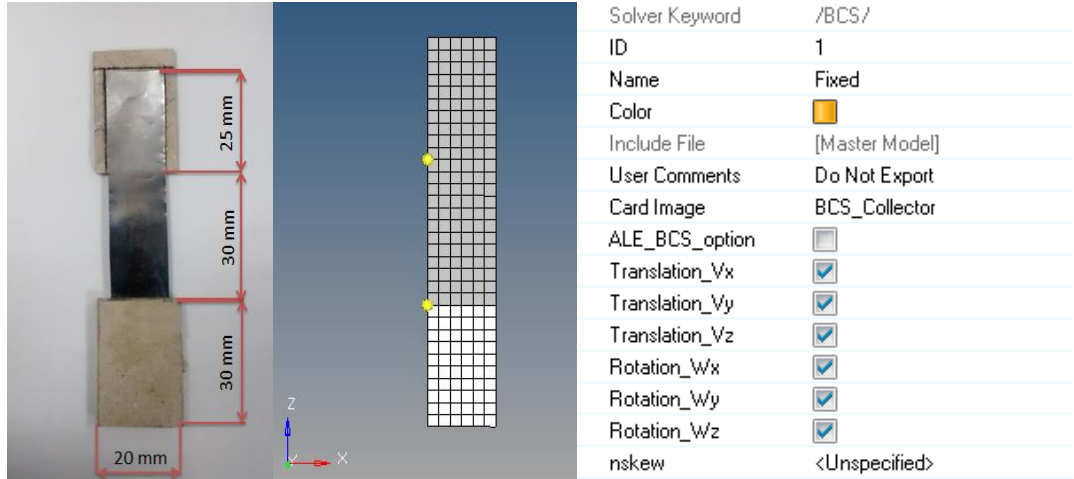
Malzeme modeli olarak, RADIOSS çözücüsü için tanımlanan Law 36 ile verilen parçalı doğrusal ve elasto-plastik malzeme tanımları kullanılmıştır. Bunun için Çekme Deneyinde elde edilen gerçek gerilme gerinme eğrisinin plastik bölgedeki değerleri programa tablo halinde girilmiştir. Bu malzeme modeli sertleşme davranışını import edilen plastik gerinmeler ve gerinme hızı sayesinde hesaplar. Law 36 malzeme modeli kırılma için Zhao kuralını kullanmaktadır. Sisteme alınan eğri şekil 3.12 de gösterilmiştir.



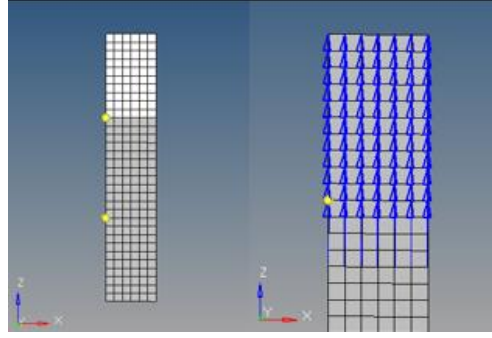


Şekil 3.12 Radioss çözücüsü için kullanılacak eğri ve veri girişi ekranı

Yapıya iki sınır koşulu tatbik edilmiştir. İlk olarak, alt çeneye denk gelen kısımda tüm doğrultularda sabitleme yapılmıştır. Bu alt çenenin numuneyi tutuşunu temsil etmektedir. (Şekil 3.13). İkinci olarak, üst kısma 3 mm/dakika'lık bir çekme hızı uygulanmıştır. Bu da gerçek testte üst çenenin hareketini temsil etmektedir. Ayrıca üst kısım eksen doğrultusunda öteleme hariç tüm doğrultularda sabitlenmiştir (Şekil 3.14).

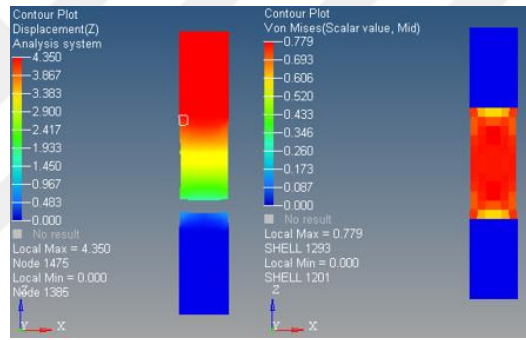


Şekil 3.13 Alt kısmın tüm doğrultularda sabitlenmesi (Beyaz kısım)



**Şekil 3.14** Üst kısma (beyazla belirtilmiş) çekme hızı uygulaması ve öteleme (z eksenini) harici doğrultularda sabitlenmesi

Analiz bu sınır şartlarında koşturulmuş, Von-Misses gerilme sonuçları ve şekil değiştirme sonuçları şekil 3.15 de gösterilmiştir.



(a)

(b)

**Şekil 3.15** Çekme deneyi simülasyonu sonucu oluşan (a) Z-doğrultusundaki yer değiştirmeler [mm] (b) Von-Misses Gerilmeleri [GPa]

Şekil 3.15 de gösterildiği gibi Z-doğrultusunda oluşan maksimum yer değiştirme 4,35 mm dir ve gerçek testlerde bu değer 4,5 mm'dir. Arada -%3,33'lük küçük bir fark vardır. Simülasyonda oluşan maksimum gerilme 779 MPa'dır ve gerçek testte oluşan kopma gerilmesi 773 MPa'dır (-%0,77 rölatif fark). Ayrıca simülasyonda ortaya çıkan kırılma şekli ve gerçekteki kırılma şekli aynıdır. Görüldüğü gibi, gerçek test ve simülasyon arasındaki farklar oldukça küçüktür ve bu farklar sonlu elemanlar yönteminde ortaya çıkan sayısal hatalardan kaynaklanmaktadır. Bu çok küçük fark, doğrusal olmayan sonlu eleman simülasyonlarını doğru olarak gerçekleştirebildiğimiz kanıtıdır. Bu analizi doğru olarak yapabilmek önemlidir, çünkü auxetic yapıların analizinde aynı malzeme modeli kullanılacaktır.

## 4. AUXETIC YAPILARIN ANALİZİ VE GELİŞTİRİLMESİ

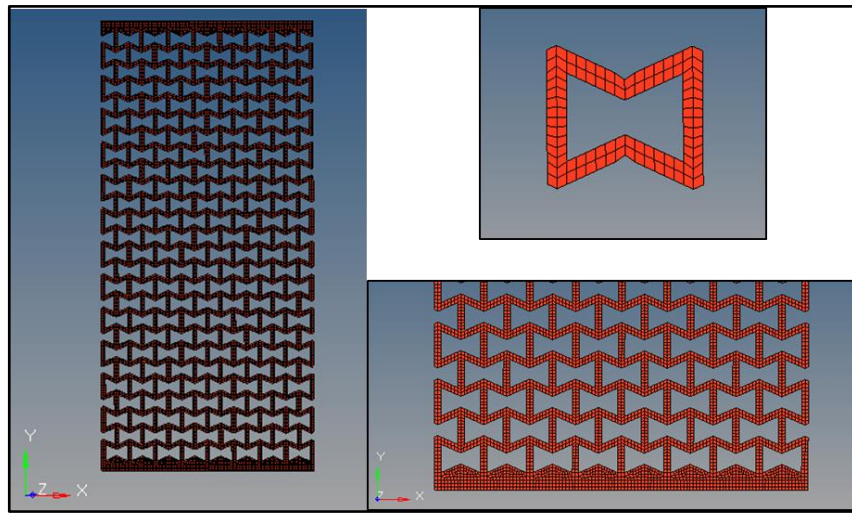
### 4.1. Ön Fikir İçin Doğrusal Statik Analizler

Auxetic yapıların mekanik davranışları hakkında hızlı ve genel bir bakış elde edebilmek amacıyla öncelikle doğrusal analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizler neticesinde eşdeğer Young Modülü ve Poisson Oranları hesaplanmıştır. Tekrarlı hücre yapısı çizimleri SolidWork'te çizildikten sonra HyperMesh'e aktarılmıştır. Auxetic yapıların boyutları için ikinci bölüme bakılabilir. Aşağıda sunulan şekillerde, malzeme tanımı, ağ yapısı ve sınır koşulları verilmiştir. Doğrusal malzeme parametreleri çizelge 4.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Malzeme Parametreleri

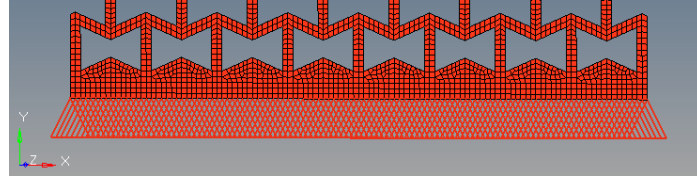
Young Modülü	25 GPa
Poisson Oranı	0,33
Yoğunluk	7,8 e-6 kg/mm <sup>3</sup>

Ağ yapısı, tüm numuneler için dikdörtgen-kabuk elemanlarla oluşturulmuştur. Eleman boyutu her bir hücre duvarına iki eleman düşecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.1 de ağ yapısı verilmiştir.

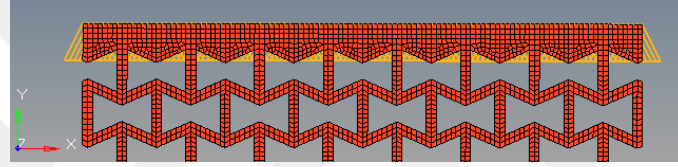


Şekil 4.1 Orjinal numune (num. 1) için kullanılan dikdörtgen kabuk eleman yapısı

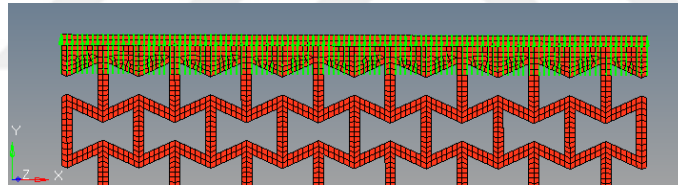
Tüm numunelere uygulanan sınır koşulları şekil 4.2 (a)-(c) de gösterilmiştir. Şekil 4.2(a) da görüldüğü gibi, alt yüzeyde tüm dönmeler ve ötelenmeler sabitlenmiştir. Şekil 4.2 (b) de görüldüğü üzere, üst yüzeyde Y-doğrultusundaki öteleme hariç tüm hareketler kısıtlanmıştır. Ayrıca şekil 4.2 (c) de görüldüğü gibi üst yüzeydeki nodlara Y doğrultusunda belirli bir yayılı yük tatbik edilmiştir.



(a)



(b)



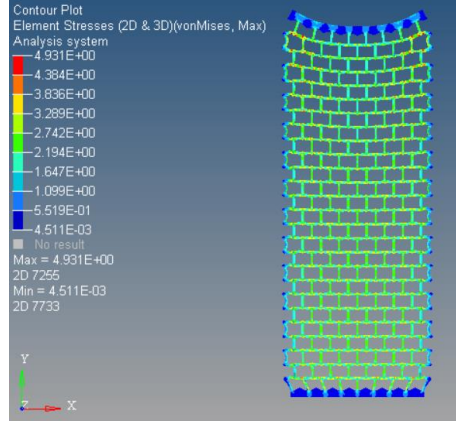
(c)

**Şekil 4.2** Auxetic numunelere uygulanan sınır koşulları (a) Alt yüzey tüm doğrultularda sabitlenmiş (b) Üst yüzey y dışında bütün doğrultularda sabitlenmiş (c) Üst yüzey Y doğrultusunda yayılı yük uygulanmış

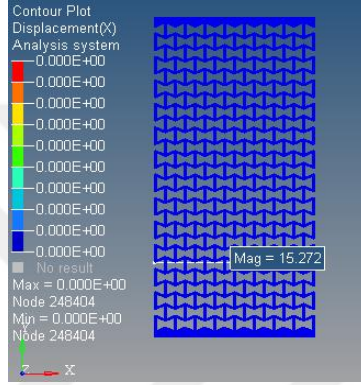
Analizler ALTAIR OptiStruct çözücüsünde koşturulduktan sonra elde edilen sonuçlar aşağıda tüm numuneler için verilmiştir.

#### 4.1.1. Numune 1 (orijinal boyut, 0,025 mm kalınlık)

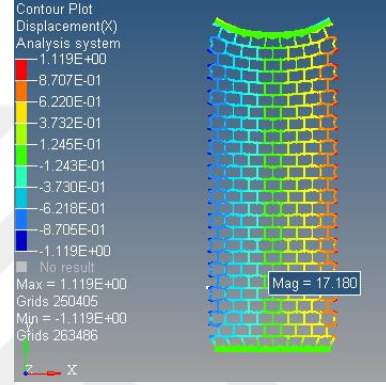
Numune 1 için yapılan statik analiz:



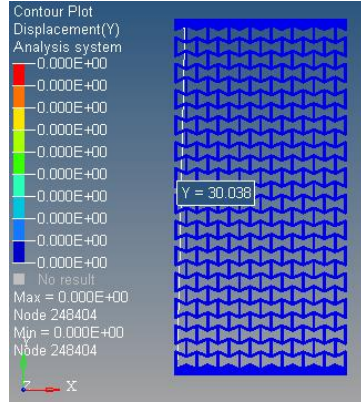
(a)



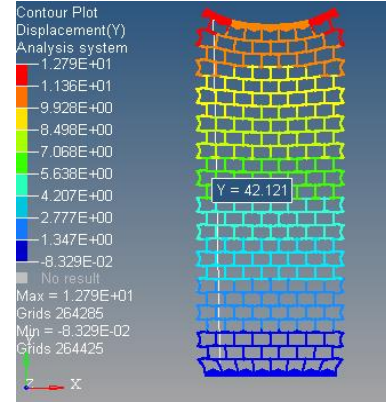
(b)



(c)



(d)



(e)

**Şekil 4.3** 300 MPa yayılı yük altında (a) Eleman Gerilmeleri (b) X doğrultusundaki orijinal boyutlar (c) Yük tatbik edildikten sonra X doğrultusundaki boyutlar (d) Y doğrultusundaki orijinal boyutlar (e) Yük tatbik edildikten sonra Y doğrultusundaki boyutlar

Şekil 4.3 (a) da görüldüğü üzere, maksimum gerilme 4,9 GPa değerine ulaşmıştır ve bu çekirdek malzemenin akma dayanımının çok üstündedir. Bu sebeple oluşan maksimum gerilmeyi doğrusal gerilme sınırı olan 400 MPa civarına çekmek için, uygulanan yayılı yük değeri 24,4 MPa a düşürülmüştür.

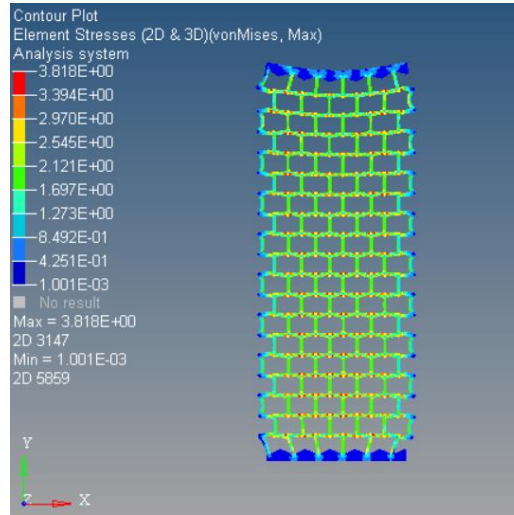
Y doğrultusunda eşdeğer Young Modülü ve Poisson Oranı hesaplamaları için, aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

$$E_y = -\frac{\sigma_y}{\varepsilon_y}, \nu_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (4.1)$$

24,4 MPa yayılı yük için, aşağıda hesaplanan değerler bulunmuştur.

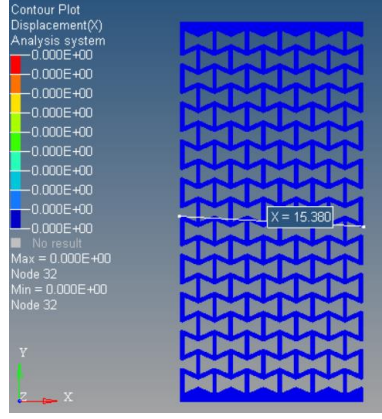
$$E_y = \frac{24,39759}{0,032925} = 741 \text{ MPa}, \nu_{yx} = -\frac{0,010149}{0,032925} = -0,3083 \quad (4.2)$$

#### 4.1.2. Numune 2 (orijinal boyut %40 arttırılmış, 0,025 mm kalınlık)

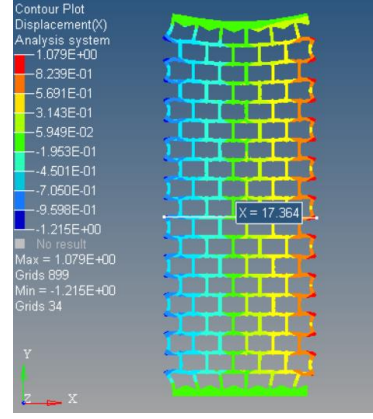


(a)

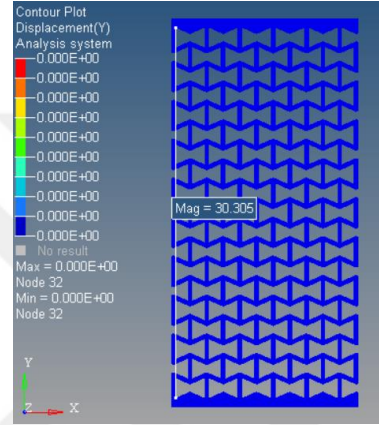




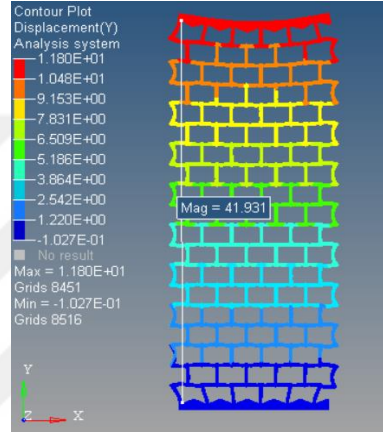
(b)



(c)



(d)



(e)

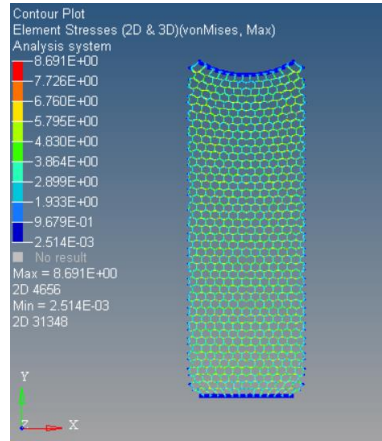
**Şekil 4.4** 24,85 MPa yayılı yük altında (a) Eleman Gerilmeleri (b) X doğrultusundaki orijinal boyutlar (c) Yük tatbik edildikten sonra X doğrultusundaki boyutlar (d) Y doğrultusundaki orijinal boyutlar (e) Yük tatbik edildikten sonra Y doğrultusundaki boyutlar

400 MPa maksimum Von-Misses gerilmesi oluşturan, 24,85 MPa'lık yayılı yük altında oluşan, eşdeğer Young Modülü ve Poisson Oranı değerleri

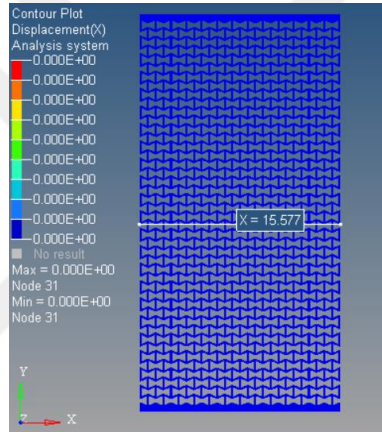
$$E_y = \frac{24,85}{0,0402} = 618 \text{ MPa} , \nu_{yx} = -\frac{0,0135}{0,0402} = -0,33 \quad (4.3)$$

olarak hesaplanır.

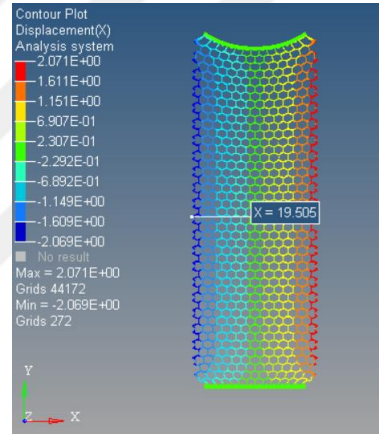
#### 4.1.3. Numune 3 (orijinal boyut %40 azaltılmış, 0,025 mm kalınlık)



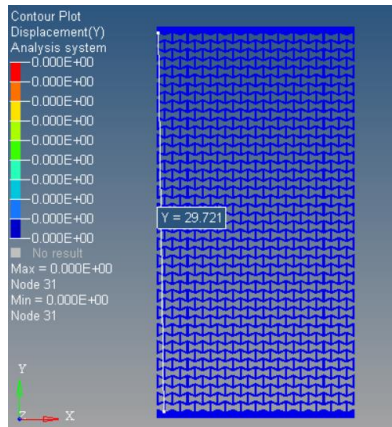
(a)



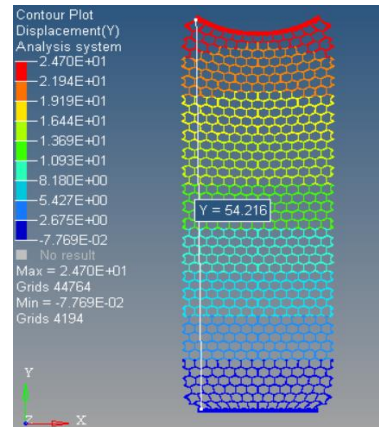
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.5 21,85 MPa yayılı yük altında (a) Eleman Gerilmeleri (b) X doğrultusundaki orijinal boyutlar (c) Yük tatbik edildikten sonra X doğrultusundaki boyutlar (d) Y doğrultusundaki orijinal boyutlar (e) Yük tatbik edildikten sonra Y doğrultusundaki boyutlar



Eşdeğer Young Modülü ve Poisson Oranı değerleri

$$E_y = \frac{21,85}{0,0379} = 576 \text{ MPa} , \nu_{yx} = -\frac{0,0115}{0,0379} = -0,303 \quad (4.4)$$

olarak bulunur.

Numune 4,5 ve 6 için analizlerin tekrar yapılmasına gerek duyulmadı çünkü farklı kalınlıklarda doğrusal bölgede max gerilme değerlerine ulaşacak sınır şartlarında analiler yapılmıştır. Bu yüzden sırasıyla numune 1,2 ve 3 ün analiz sonuçlarıyla aynı sonuçlar elde edilecektir.

#### 4.1.4. Doğrusal statik analizlerin karşılaştırılması

Tüm numuneler için doğrusal sonlu elemanlar analizi neticesinde hesaplanan değerler aşağıdaki çizelge 4.2 de özet olarak verilmiştir

**Çizelge 4.2** Doğrusal Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları ve Hesaplanan Eşdeğer Young Modülü ve Poisson Oranı Değerleri

	NUMUNE 1	NUMUNE 2	NUMUNE 3
Uygulanan Yayılı Yük (MPa)	24,4	24,85	21,85
Maksimum Gerilme (MPa)	400	400	400
X-doğrultusundaki maksimum yer değiştirme	0,15	0,208	0,18
Y-doğrultusundaki maksimum yer değiştirme	0,989	1,22	1,27
X eksenindeki genişlemiş boyut	15,427	15,588	15,757
Y eksenindeki genişlemiş boyut	31,027	31,525	30,848
Orijinal Boy	15,27x30,038	15,38x30,305	15,57x29,271

X teki yüzde artım (%)	1,01	1,35	1,15
Y deki yüzde artım (%)	3,29	4,02	3,79
Eşdeğer Young Modülü, $E_y$	741	618	576
Poisson Oranı, $\nu_{xy}$	-0,30	-0,33	-0,3047

Hesaplanan negatif eşdeğer Poisson oranı değerleri, yapıların auxetic karakterini doğrulamaktadır. Ancak, doğrusal analizler sadece bir ön fikir sağlamaktadır ve gerçek test sonuçlarıyla tam olarak uyuşmamaktadır. Çünkü auxetic yapıların esneklikleri, konvansiyonel malzemenin esnekliğinden oldukça fazladır (Örneğin,  $E=25,000$  MPa a karşı  $E_y=741$  MPa) ve bu nedenle şekil değiştirmeler oldukça büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu sebep zamana bağlı malzeme davranışına yol açar ve malzemenin doğrusal olmayan davranışını da hesaba katmak gerekmektedir. Bundan sonraki analizlere açık zaman integrasyonu (eksplisit) analizleri ile devam edilecektir.

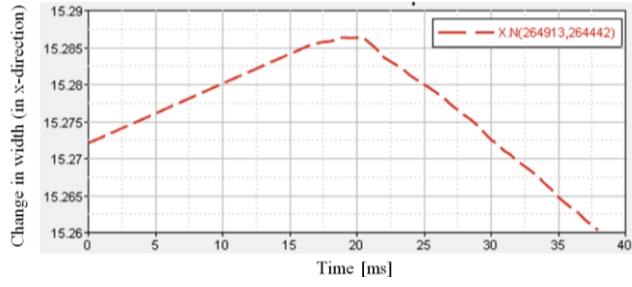
#### 4.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Açık Zaman İntegrasyonu Analizleri

Doğrusal olmayan analiz için, ALTAIR RADIOSS çözücüsünden yararlanılmıştır. Doğrusal analizlerde kullanılan ağ yapısı aynen korunmuş ve sınır koşulları da aynı kalmıştır. Sadece üst yüzeye kuvvet yerine belirli bir hızda yer değiştirme tatbik edilmiştir. Bu hız çekme testine benzer olarak 3 mm/dak olarak girilmiştir.

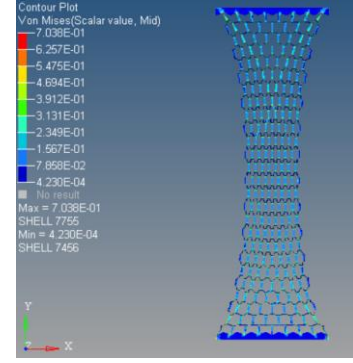
Malzeme karakterizasyonu için konvansiyonel numunenin bölüm 3.3 de gerçekleştirilen doğrulama sonucu elde edilen malzeme modeli kullanılmıştır. Her bir numune için analizler koşulduktan sonra aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir.

##### 4.2.1. Numune 1 (orijinal boyut, 0,025 mm kalınlık)

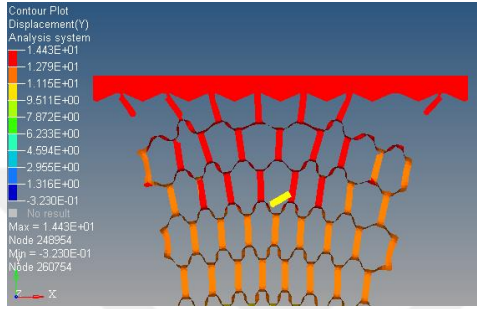
Numune 1 için doğrusal olmayan dinamik açık zaman integrasyonu (eksplisit) analizi



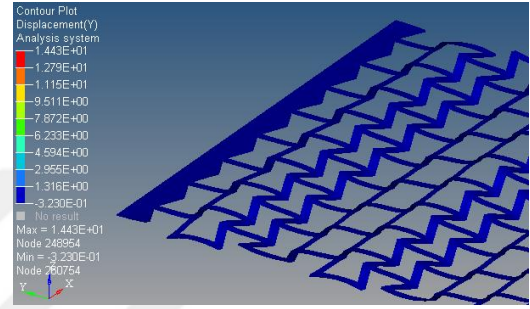
(a)



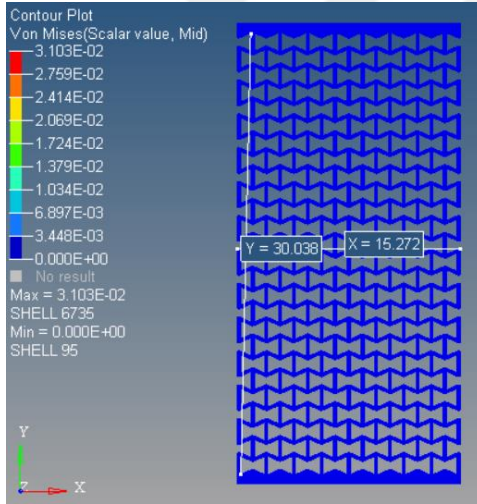
(b)



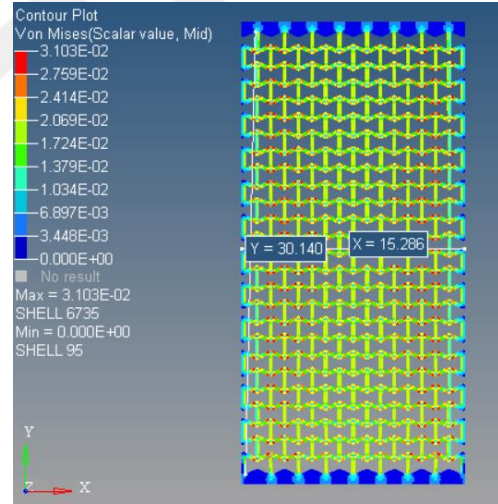
(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 4.6** Numune 1 eksplisit analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki genişlemenin zamana bağlı değişimi. (b) Hasardan bir önceki zaman dilimindeki Von-Mises gerilmesi dağılımı. (c) Numunenin üst kısmındaki hasar başlangıcı (d) Auxetic etki kaybolduktan sonra oluşan kırışma hali (e) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (f) 20ms de oluşan şekil değişimi

Şekil 4.6 (a) da görüldüğü gibi, x doğrultusundaki boyut 20 ms ye kadar artmaktadır ve dolayısıyla auxetic etki görülmektedir. Ancak 20 ms den sonra, numune daralmaya başlamaktadır ve auxetic etki kaybolmaktadır. Şekil 4.6 (b) de daralma

çok bariz olarak görülebilmektedir. Hasar, şekil 4.6 (c) de görüldüğü gibi, alt ve üst kısımlarda hücre duvarlarının kopmasıyla başlamaktadır. Auxetic etkinin kopmadan önce neden kaybolduğunu anlamak için z doğrultusundaki şekil değişimlerine bakmak gereklidir ve şekil 4.6 (d) de z doğrultusundaki kırışmalar belirgin olarak görülmektedir. Bu kırışma etkisi, hücre duvarlarının burkulması neticesi meydana gelmektedir. Auxetic davranışın tespit edilebilmesi için şekil değişiminden önce ve 20. ms de oluşan deformasyonlar şekil 4.6 (e) ve (f) de sırasıyla verilmiştir.

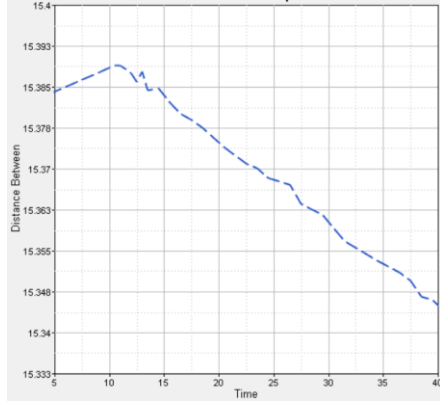
Konvansiyonel numunenin çekme mukavemeti 700 MPa civarındadır. Ancak 20 ms de ulaşılan Von-Misses gerilme değeri 31 MPa civarındadır ve bu malzemenin akma gerilmesi olan 400 MPa dan bile çok daha düşük bir gerilmedir. Bu durum göstermektedir ki plastik deformasyon oluşmadan önce hücre duvarının eğilmesi söz konusudur ve bu nedenle sadece çeki gerilmesi yapının mekanik davranışını açıklamak için yeterli değildir ve bu eğilme etkilerini doğrusal analizde görmemiz mümkün değildir. Bu sebeple, doğrusal olmayan analiz, yapı hakkında daha detaylı ve daha gerçekçi bilgi sunmaktadır.

Auxetic bölgedeki eşdeğer Poisson oranını hesaplamak için, Denklem (4.1) den faydalanılmıştır ve 20 ms de okunan şekil değiştirme değerleri baz alınmıştır. Buna göre, numune 1 için Poisson oranı şu şekilde bulunur:

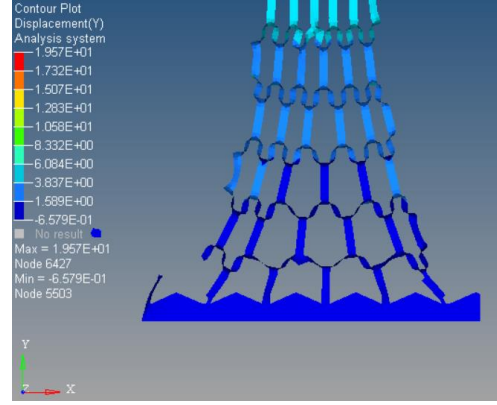
$$\nu_{yx} = -\frac{(15,286-15,272)/15272}{(30,140-30,038)/30038} = -0,270 \quad (4.5)$$

#### **4.2.2. Numune 2 (orijinal boyut %40 arttırılmış, 0,025 mm kalınlık)**

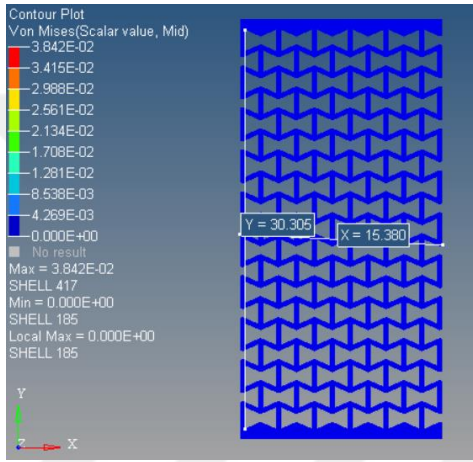
Numune 1 için kullanılan sınır koşulları, numune 2 için uygulanılmış ve aşağıda sunulan sonuçlar elde edilmiştir.



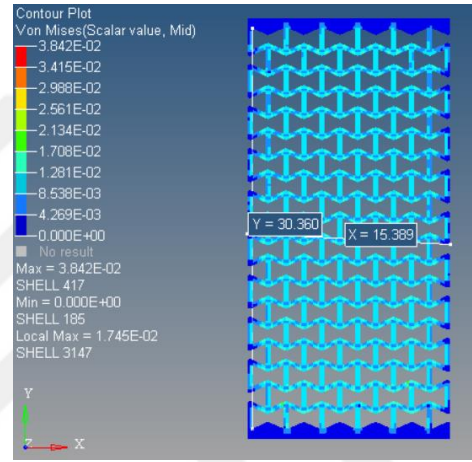
(a)



(b)



(c)



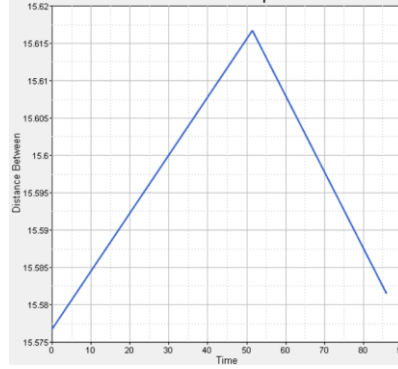
(d)

**Şekil 4.7** Numune 2 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin alt kısmındaki hasar başlangıcı (c) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (d) 11 ms de oluşan şekil değişimi

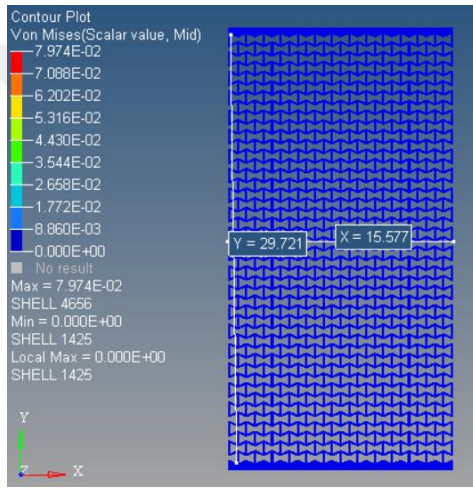
Numune 1'e kıyasla numune 2 çok daha önce auxetic davranışını kaybeder (11 ms civarında). Numune 2 17,45 MPa'a gerilmeye kadar kırışma olmadan dayanabilir. Poisson oranı şöyle bulunur:

$$\nu_{yx} = -\frac{(15,389-15,380)/15380}{(30,360-30,305)/30305} = -0,322 \quad (4.6)$$

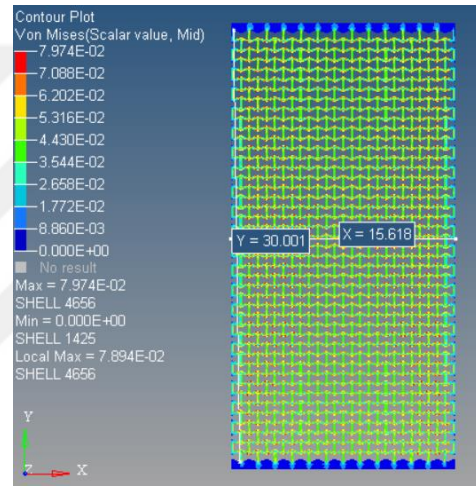
### 4.2.3. Numune 3 (orijinal boyut %40 azaltılmış, 0,025 mm kalınlık)



(a)



(b)



(c)

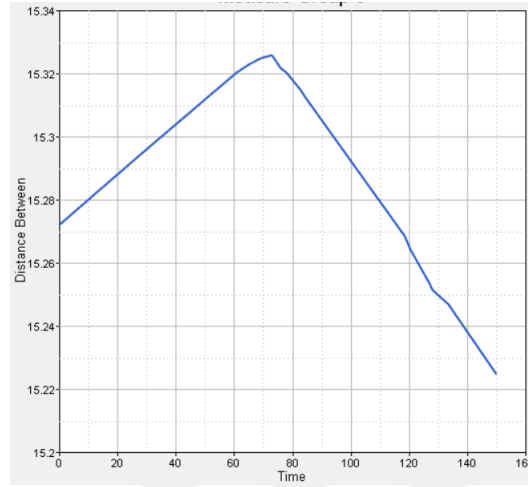
**Şekil 4.8** Numune 3 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin alt kısmındaki hasar başlangıcı (c) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (d) 51 ms de oluşan şekil değişimi

Numune 1'e kıyasla, Numune 3 auxetic davranışını çok daha uzun sürdürür ve buda çok daha geniş şekil değiştirme imkanı sunar. Ayrıca numune, maksimum 78,93 MPa 'a kadar gerilmeye kırışma olmadan dayanabilmektedir. Poisson oranı şöyle bulunur:

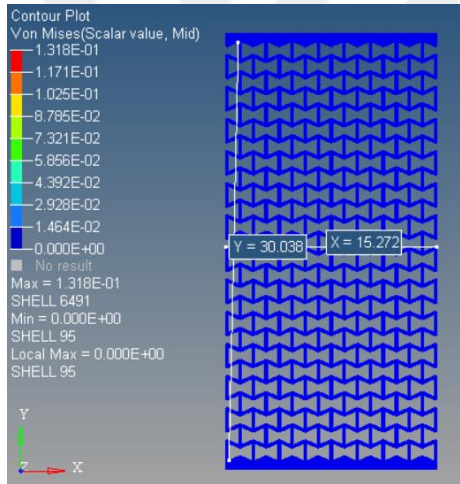
$$\nu_{yx} = -\frac{(15,618-15,577)/15,577}{(30,001-29,721)/29,721} = -0,279 \quad (4.7)$$



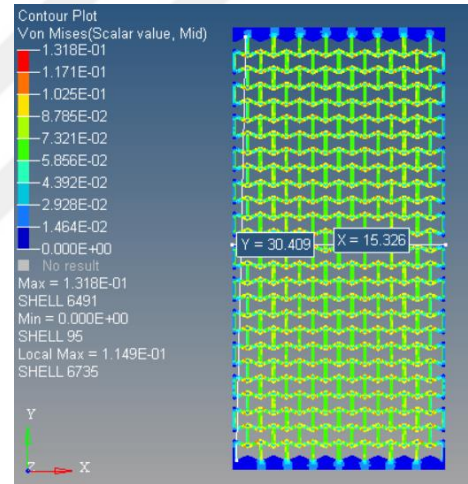
#### 4.2.4. Numune 4 (orijinal boyut, 0,05 mm kalınlık)



(a)



(b)



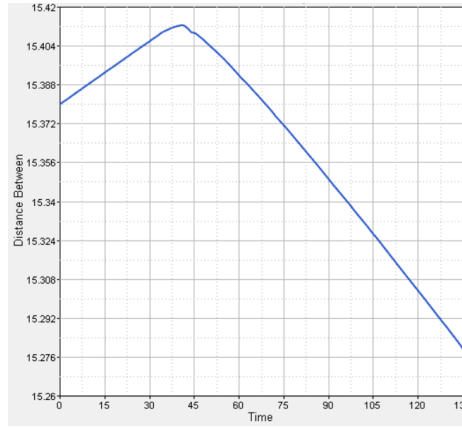
(c)

**Şekil 4.9** Numune 4 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (c) 73 ms de oluşan şekil değişimi

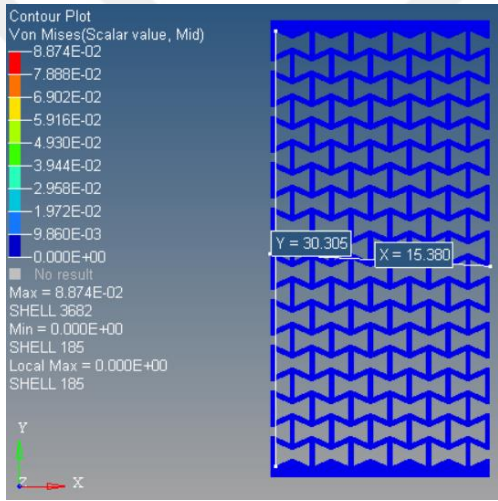
Şekil 4.9 (c) de görüldüğü gibi, Numune 4 maksimum 114,9 MPa gerilmeye kadar kırışıklığa uğramadan dayanabilmektedir. Poisson Oranı:

$$\nu_{yx} = -\frac{(15,326-15,272)/15,272}{(30,409-30,038)/30,038} = -0,286 \quad (4.8)$$

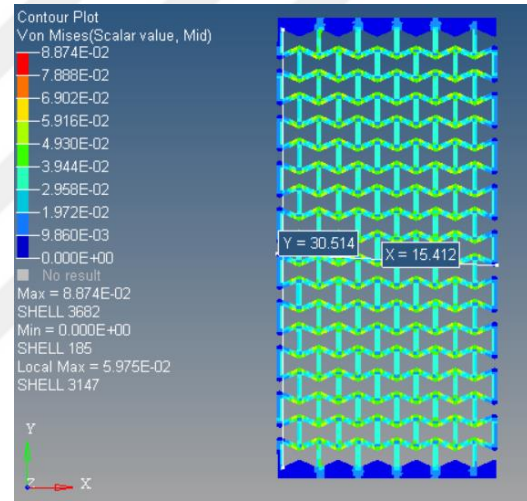
#### 4.2.5. Numune 5 (orijinal boyut %40 arttırılmış, 0,05 mm kalınlık)



(a)



(b)



(c)

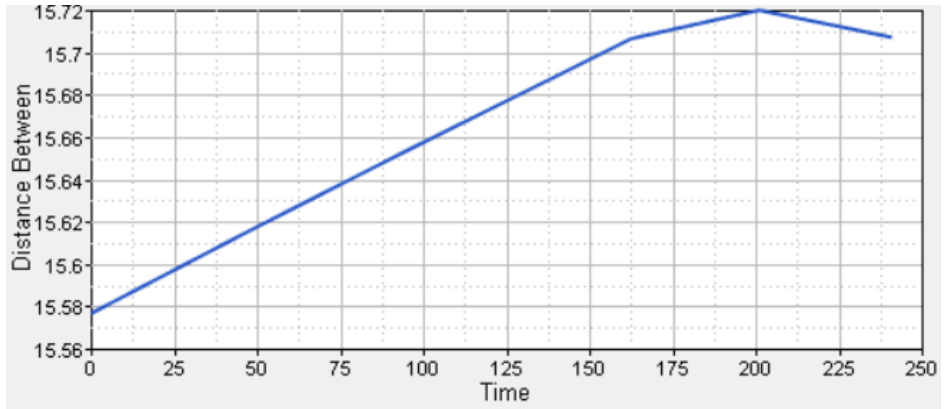
**Şekil 4.10** Numune 5 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (c) 38 ms de oluşan şekil değiştirme

Şekil 4.10 (c) de görüldüğü gibi, Numune 5 maksimum 59,75 MPa gerilmeye kadar kırışıklığa uğramadan dayanabilmektedir. Poisson Oranı:

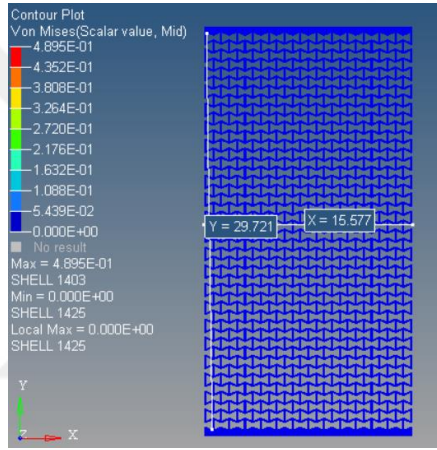
$$v_{yx} = -\frac{(15,412-15,380)/15380}{(30,514-30,305)/30305} = -0,302 \quad (4.9)$$



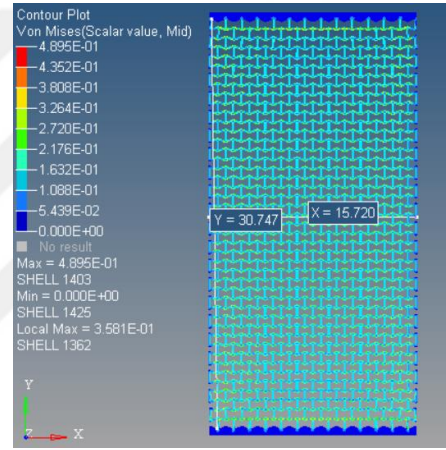
#### 4.2.6. Numune 6 (orijinal boyut %40 azaltılmış, 0,05 mm kalınlık)



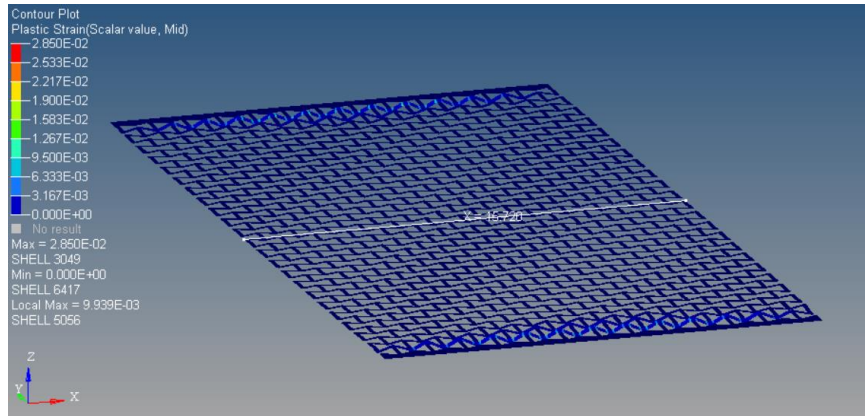
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.11 Numune 6 için geçişli hal sonlu elemanlar analizi sonuçları (a) X-doğrultusundaki boyut değişiminin zamana bağlı değişimi (b) Numunenin şekil değişime uğramadan önceki boyutları (c) 200 ms de oluşan şekil değişimi (d) 200 ms deki plastik şekil değişimleri

Şekil 4.11 (c) de görüldüğü gibi, Numune 6 maksimum 358,1 MPa gerilmeye kadar kırışıklığa uğramadan dayanabilmektedir. Poisson Oranı:

$$\nu_{yx} = -\frac{(15,720-15,577)/15577}{(30,747-29,721)/29721} = -0,266 \quad (4.10)$$

Numune 6 akma gerilmesine yakın bir gerilme değerine kadar dayanabilmektedir.

Şekil 4.11 (d) de görüldüğü gibi plastik birim şekil değiştirmeler numunenin tutturulan alt kısımlarında auxetic davranış kaybolmadan önce meydana gelmektedir.

#### 4.2.7. Doğrusal olmayan açık zaman integrasyonu analizlerinin karşılaştırılması

Doğrusal olmayan açık zaman integrasyonlu sonlu elemanlar analizleri daha geniş deformasyonları dikkate almaktadır, çünkü sistemin bir sonraki zaman adımdaki durumunun şimdiki zaman içerisinde hesaplandığı bir yöntemdir. Bu sebeple, hasarı ve şekil değişimlerini daha gerçekçi, bir biçimde görmek mümkün olmuştur. Bu analizde hücre duvarlarındaki eğilme hareketleri gözlemlenmiş ve bunun yol açtığı kırışma da simüle edilebilmiştir. Bu kırışma auxetic davranışın kaybolmasına yol açmıştır.

Tüm numuneler için doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi neticesinde hesaplanan değerler aşağıdaki çizelge 4.3 de özet olarak verilmiştir

**Çizelge 4.3** Tüm Numuneler için açık zaman integrasyonu sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
Maksimum Gerilme (MPa)	31,03	38,42	79,74	131,8	88,74	489,5
x eksenindeki genişleşmiş boyut	15,286	15,389	15,618	15,326	15,412	15,720
y eksenindeki genişleşmiş	30,140	30,360	30,001	30,409	30,514	30,747

boyut						
x teki yüzde artım (%)	0,09	0,05	0,26	0,35	0,2	0,918
y deki yüzde artım (%)	0,3	0,181	0,94	1,23	0,69	3,45
Eşdeğer Poisson's Oranı, $\nu_{xy}$	-0,27	-0,322	-0,279	-0,286	-0,302	-0,266

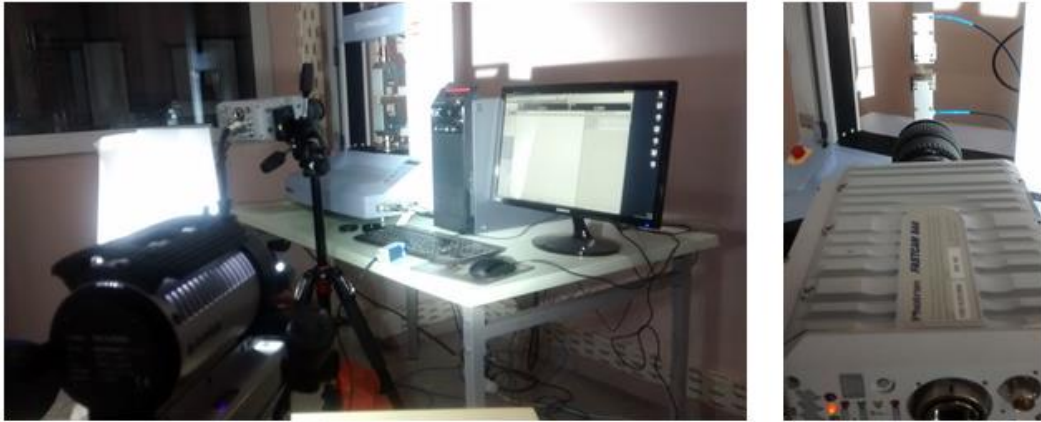
Doğrusal olmayan analizlerde -0,26 ile -0,32 arasında eşdeğer Poisson oranları tahmin edilmiştir. Numune 6 en geniş deformasyon kabiliyetine sahip numunedir. Numune 2 en büyük eşdeğer Poisson oranını sunmuştur ancak bu numune auxetic davranış sınırından önce daha az genişleme göstermiştir. Bu da kanıtlamaktadır ki auxetic yapılar için büyük bir şekil değişimi illa ki büyük bir Poisson oranı demek değildir.

## 5. AUXETIC YAPILARIN ÇEKME DENEYİ VE ANALİZLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde üretimi yapılan numelerin çekme deneyi gerçekleştirilmiş ve bölüm 4 de yapılan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler bölüm 3 de detaylı olarak gösterildiği gibi testler için ön hazırlık sürecinden geçmiştir.(Şekil 5.1) Analiz sonuçlarında auxetic davranışın çok kısa bir süre içinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple auxetic numunelerin çekme testi yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiş ve auxetic davranış yakalanmaya çalışılmıştır. Kameranın kayıt halindeyken fotoğrafı şekil 5.2 de sunulmuştur.



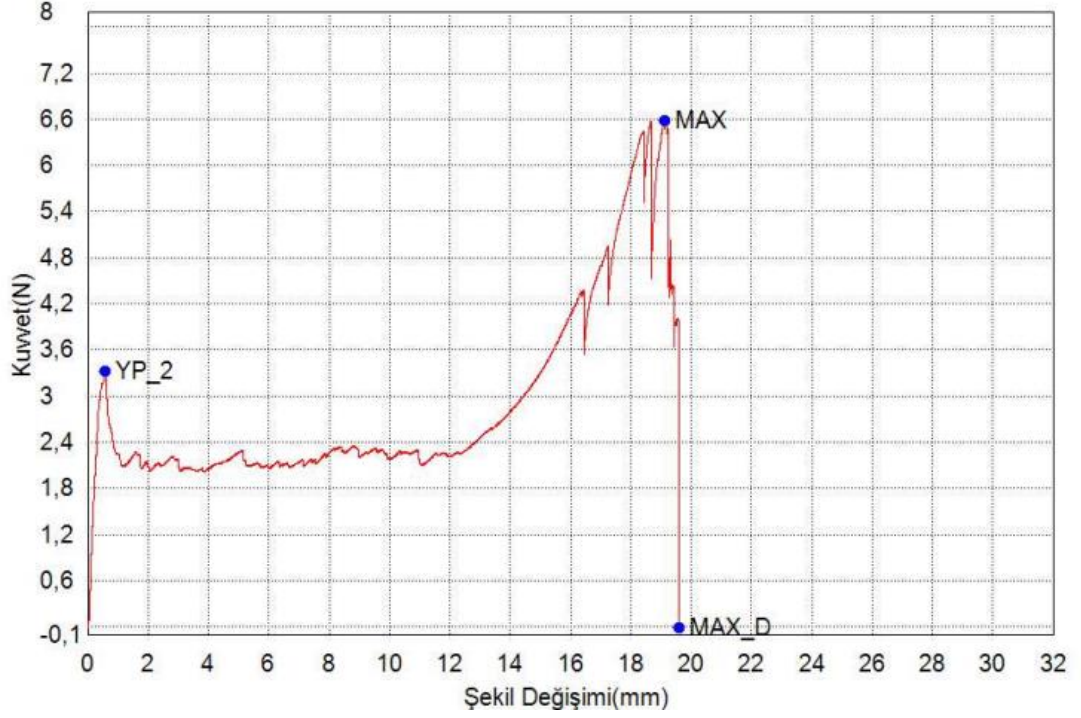
**Şekil 5.1:** Auxetic numunelerin çekme deneyi için hazırlanma sürecinden bir fotoğraf



**Şekil 5.2** Auxetic numunelerin çekme deneyi esnasında kamera ile kaydedilmesi

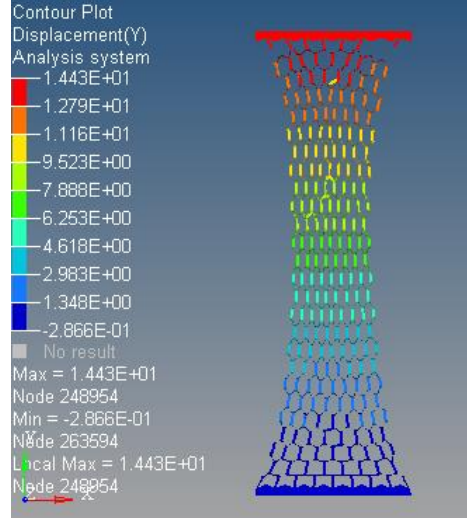
### 5.1. Numune 1 İçin ekme Deneyi ve Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

Orijinal numune olarak adlandırdığımız hücre lleri Şekil 2.1 de verilen 1.numunenin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet Şekil değiştirme grafiği Şekil 5.3 de gösterilmiştir.



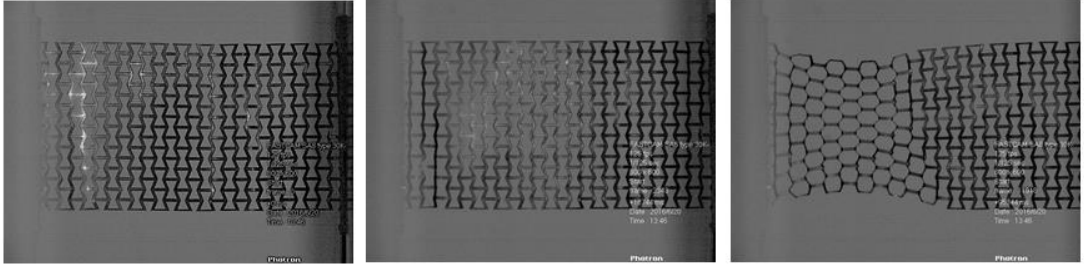
Şekil 5.3 Numune 1 in çekme deneyi sonucu kuvvet yer değiştirme grafiği

Test cihazından sadece tek eksendeki yer değiştirme değerleri okunmuştur. Numune bu eksen de kopmaya kadar 16 mm uzamaktadır. Analizler zamana bağlı yapıldığı için karşılaştırılma kopma olduğu andağı yer değiştirme üzerinden yapılacaktır. Çekme yönündeki eksen de (y eksen de) Şekil 5.4 de gösterildiği gibi max 14,5 mm uzama yaptıktan sonra numunenin koptuğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.4** Numune 1 in çekme deneyi simülasyonunda kopmadan hemen önceki uzama değeri

Numunenin genişlemesi ise şekil 5.5 de gösterilen video kaydı esnasında çekilen fotoğraflardan incelenmiştir.



**Şekil 5.5** Numune 1 in çekme deneyi esnasındaki belli aralıklarla görüntüleri

Çekme doğrultusunda, malzemenin hasara uğramadan hemen önceki uzama değerleri testte 16 mm analizde ise 14,5mm olarak gözlemlenmiştir. Bu da demek oluyor ki analiz sonuçları ile test sonuçları arasında %10 gibi bir fark vardır.

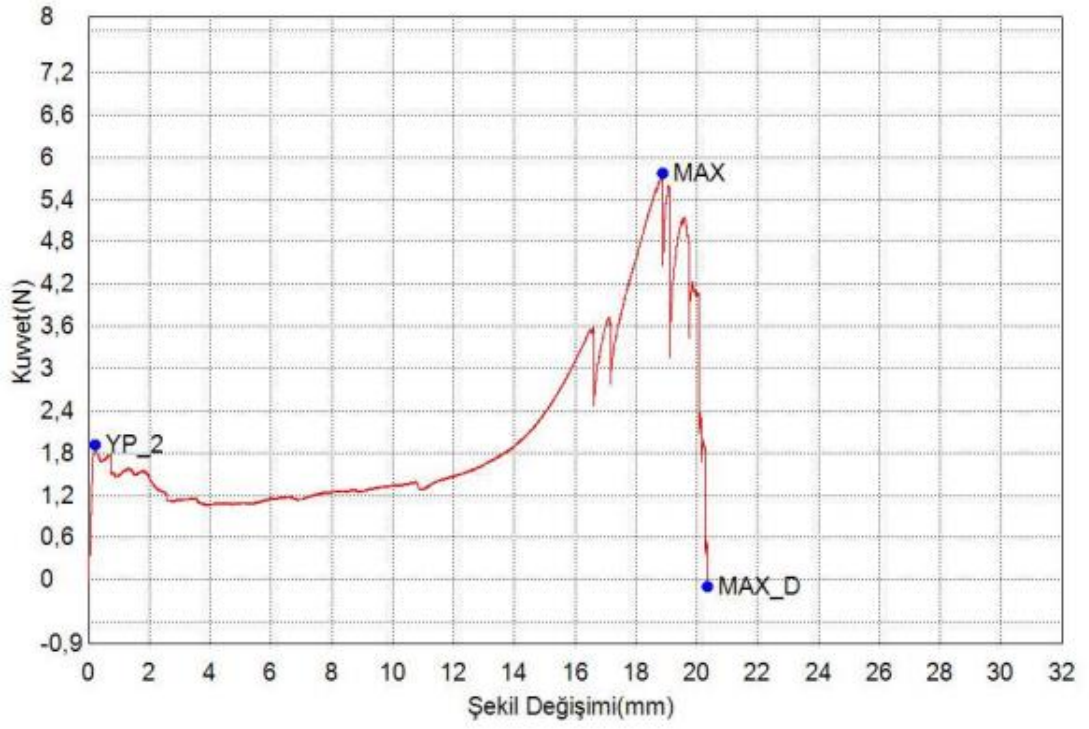
Çekme doğrultusuna dik yönde, malzemenin kırılmaya uğramadan hemen önceki genişlemesi analizde %0,09 olarak bulunmuştur fakat test sonuçlarında numunelerin genişlemesi gözlenememiştir. Bunun sebebi analizde 0,014 mm lik genişleme olduğu tesbit edilmesine rağmen ekran alıntılarında bu kadar hassas sonuç



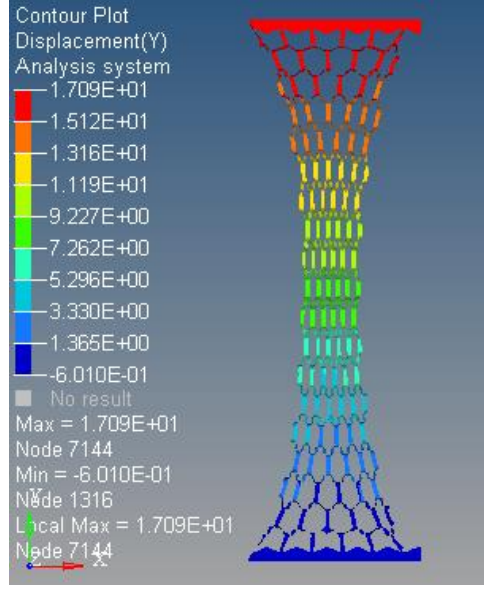
okuyamadığımızdır. Fakat çekme eksenindeki analiz ve test sonuçları %10 farkla doğrulandığı için analiz sonuçlarını doğru olarak kabul edilebilir.

## 5.2. Numune 2 İçin Çekme Deneyi ve Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

İkinci numunenin çekme deneyinden elde edilen kuvvet şekil değiştirme grafiği şekil 5.6 da verilmiştir. Bu grafikten numunenin 16,5 mm civarında hasara uğradığı görülmektedir. Analiz sonuçlarında ise aynı eksende şekil 5.7 de gösterildiği gibi 17,1 mm de hasara uğradığı tespit edilmiştir

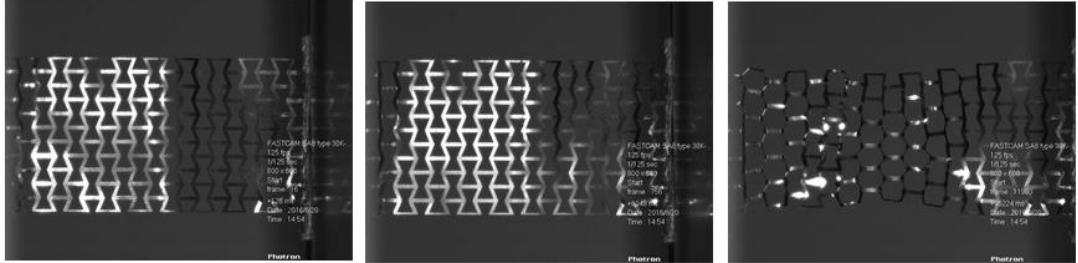


Şekil 5.6 Numune 2 nin çekme deneyi sonucu kuvvet şekil değiştirme grafiği



**Şekil 5.7** Numune 2 nin çekme deneyi simülasyonunda kopmadan hemen önceki uzama değeri

Numunenin genişlemesi ise şekil 5.8 de gösterilen video kaydı esnasında çekilen fotoğraflardan incelenmiştir.



**Şekil 5.8:** Numune 2 nin çekme deneyi esnasındaki belli aralıklarla görüntüleri

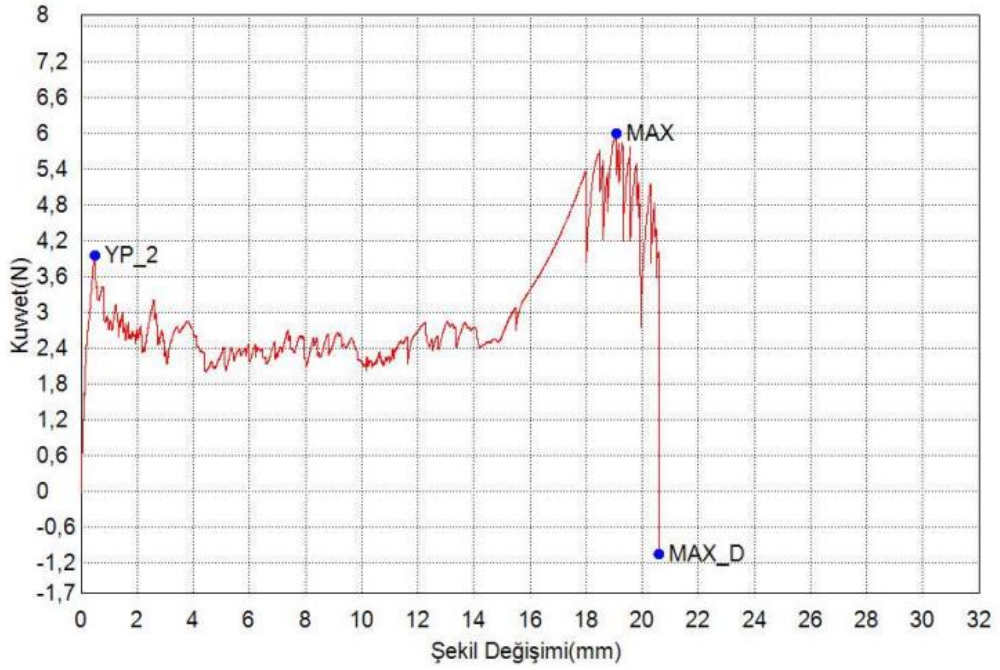
Çekme doğrultusunda, malzemenin hasara uğramadan hemen önceki uzama değerleri testte 16,5 mm analizde ise 17,1 mm olarak gözlemlenmiştir. Bu da demek oluyor ki analiz sonuçları ile test sonuçları arasında %3 gibi bir fark vardır.

Çekme doğrultusuna dik yönde, malzemenin kırılmaya uğramadan hemen önceki genişlemesi analizde %0,05 yani 0,009 mm olarak bulunmuştur. Test sonuçlarında bu genişlemeyi göremesek de diğer eksendeki analiz ve test sonuçları %3 farkla doğrulandığı için analizdeki genişleme sonucunu doğru olarak kabul edebiliriz.

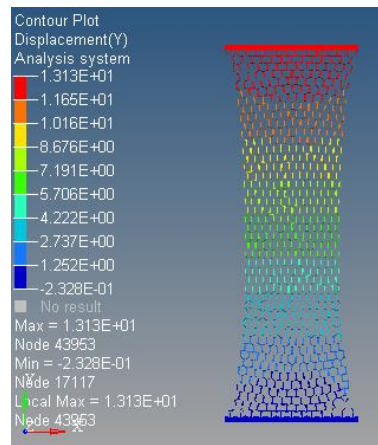


### 5.3. Numune 3 İçin ekme Deneyi ve Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

Üçüncü numunenin çekme deneyinden elde edilen kuvvet Şekil değiştirme grafiği Şekil 5.9 da verilmiştir. Bu grafikten numunenin 18 mm de hasara uğradığı görülmektedir. Analiz sonuçlarında ise aynı eksen de Şekil 5.10 da gösterildiği gibi 13,1 mm de hasara uğradığı tespit edilmiştir



Şekil 5.9 Numune 3 ün çekme deneyi sonucu kuvvet Şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.10 Numune 3 ün çekme deneyi simülasyonunda kopmadan hemen önceki uzama değeri

Numunenin genişlemesi ise şekil 5.11 de gösterilen video kaydı esnasında çekilen fotoğraflardan incelenmiştir.



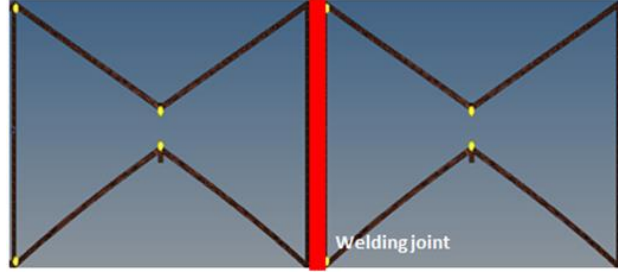
**Şekil 5.11** Numune 3 ün çekme deneyi esnasındaki belli aralıklarla görüntüleri

Çekme doğrultusunda, numunenin hasara uğramadan hemen önceki uzama değerleri testte 18 mm analizde ise 13,1 mm olarak gözlemlenmiştir. Bu da demek oluyor ki analiz sonuçları ile test sonuçları arasında %27 gibi bir fark vardır.

Çekme doğrultusuna dik yönde, malzemenin kırılmaya uğramadan hemen önceki genişlemesi analizde %0,26 yani 0,041 mm olarak bulunmuştur. Bu numunede diğer numunelere göre daha büyük bir fark olması, numunenin diğerlerine göre daha esnek yapıda olmasından kaynaklanabilir.

## 6. SONRAKİ ADIMLAR İÇİN YAPILAN ÖN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada elde edilen auxetic plakalar yuvarlanarak (şekil 6.1 de gösterildiği gibi) her iki ucundan spot lazer kaynağıyla kaynaklanacak ve gerçek stent şekli elde edilecektir.

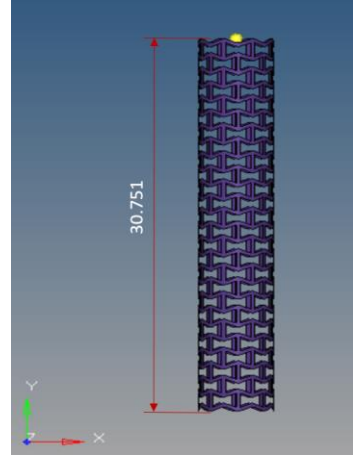
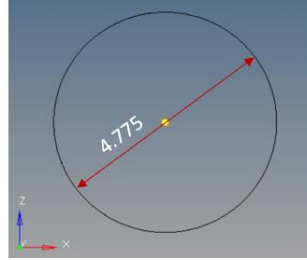
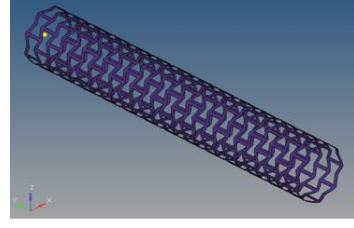


Şekil 6.1 Stent şekli için kaynak ekleme yerleri

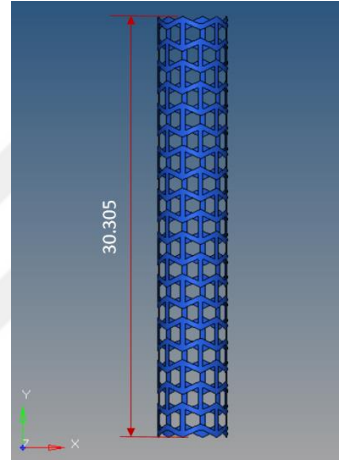
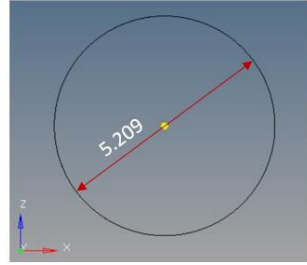
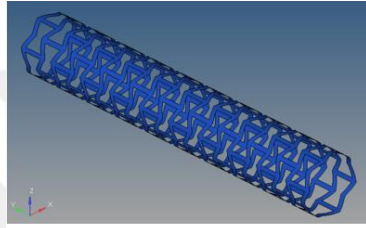
Tez çalışmasından elde ettiğimiz sonuçlar doğrultusunda auxetic yapıların boyutlarında ve kullanılan malzemenin kalınlığında değişiklik olabilir fakat bu boyutlar için tüp yapısındaki stentler tasarlanmış ve ön çalışmalar yapılmıştır. Tasarlanan stentlerin çapı, boyuna ve çevresine düşen hücre sayısı çizelge 6.1 de verilmiştir. Sadece Numune 2 ve Numune 5 de plaka halindeki tasarımdan farklı olarak stente uygun bir geometri olması amacıyla yarım hücre eklenmiştir. Tüp yapısındaki stentlerin detaylı görünümü şekil 6.2 de görülmektedir.

Çizelge 6.1 Stentlerin Ölçüleri

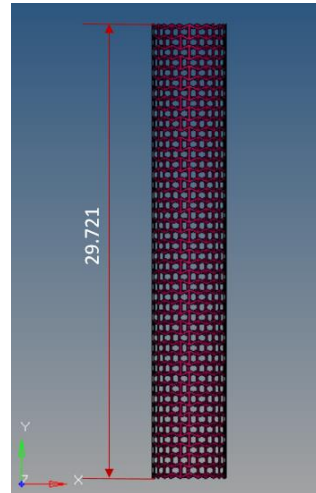
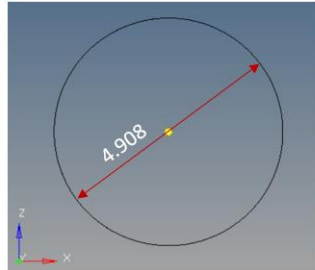
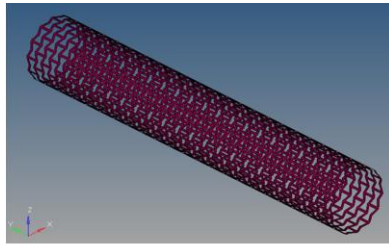
	Çap (mm)	Boyuna uzunluktaki Hücre Sayısı	Çevresinde ki Hücre Sayısı
Numune 1 (Orijinal)	4,775	26	8
Numune 2 (+%40)	5,209	19	6
Numune 3 (-%40)	4,908	44	13
Numune 4 (Orijinal)	4,775	26	8
Numune 5 (+%40)	5,209	19	6
Numune 6 (-%40)	4,908	44	13



(a)



(b)



(c)

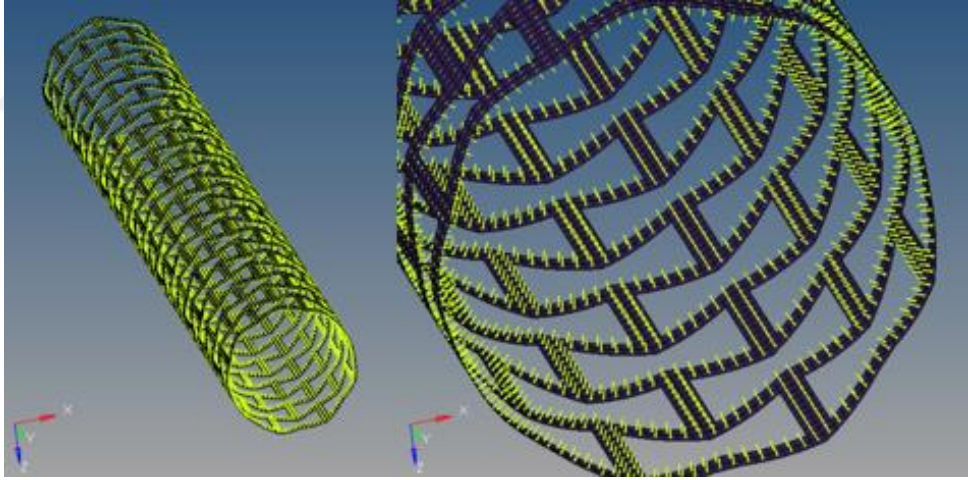
**Şekil 6.2** Stent geometrileri (a) (Orijinal) 0,025mm kalınlık (b) Orijinal +%40 0,025mm kalınlık (c) Orijinal +%40 0,025mm kalınlık

## 6.1. Ön Fikir İçin Stentlerin Doğrusal Analizleri

Stent yapısının modellenmesi ile ilgili kabiliyeti arttırmak amacıyla, ön bir doğrusal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

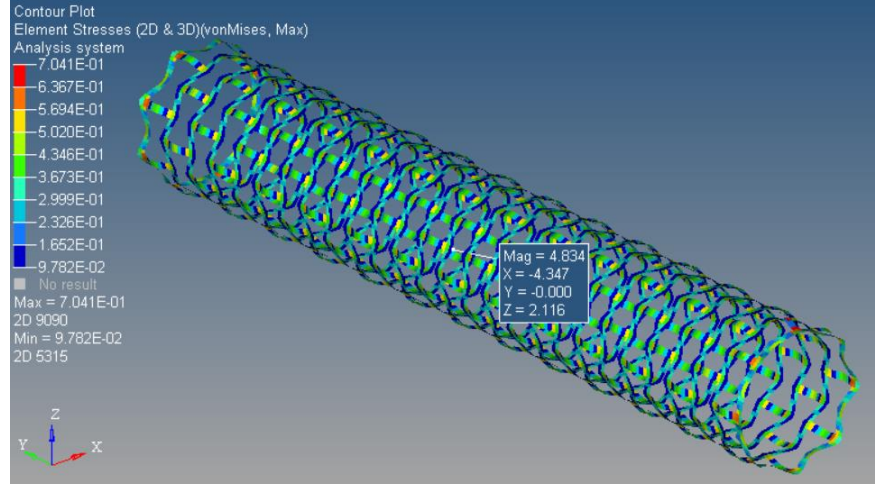
Stent geometrisi, katı bir silindirik tüpten önceki bölümde kullanılan hücre yapılarının kesilip çıkartılmasıyla oluşturulmuştur. Ağ yapısına benzer şekilde oluşturulmuş ve her bir hücre duvarı boyunca iki eleman olacak şekilde quad-kabuk eleman yapısıyla oluşturulmuştur. Bu yapı şekil 6.3 de görülebilir.

Yüklem olarak iç basınç uygulanmıştır ve sınır koşulu olarak herhangi sabitleme yapılmamıştır. Bunun yerine atalet boşalımı (inertia relief) modeli kullanılmıştır. Doğrusal analiz için bu metodun yeterli olacağı öngörülmüştür.



**Şekil 6.3** Stent yapısı için sınır koşulları ve yüklemeler

Şekil 6.4'de Numune 1 için 72,54 MPa lık bir iç basınç altında ortaya çıkan eleman gerilmeleri gösterilmiştir.



**Şekil 6.4** Numune 1 hücre yapısına sahip, 72,54 MPa'lık iç basınç altında olan stent için eleman gerilmeleri

Tüm diğer numune geometrilerinden elde edilen stentler için analiz sonuçları çizelge 6.2 de toplu olarak sunulmuştur.

**Çizelge 6.2** Stent Geometrisi İçin Doğrusal Sonlu Eleman Analizi Sonuçları

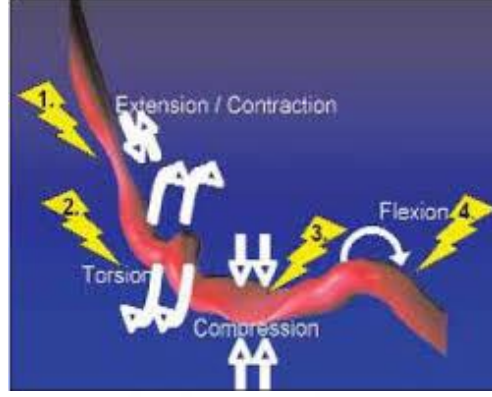
	Num, 1	Num, 2	Num, 3	Num,4	Num, 5	Num, 6
İlk Çap (mm)	4,775	5,209	4,908	4,775	5,209	4,908
Basınç (GPa)	5,18e-04	2,5 e-4	8,4e-3	1,6 e-03	1 e-03	2,1 e-03
Maksimum Gerilme (MPa)	417,2	404,1	417,5	418,1	442,2	408,9
Maksimum Çap	4,817	5,265	4,962	4,830	5,272	4,982
Çaptaki % Artış	0,88	1,075	1,1	1,15	1,21	1,508

## 6.2. Stentin Mekanik Özellikleri İçin Test ve Simülasyonları

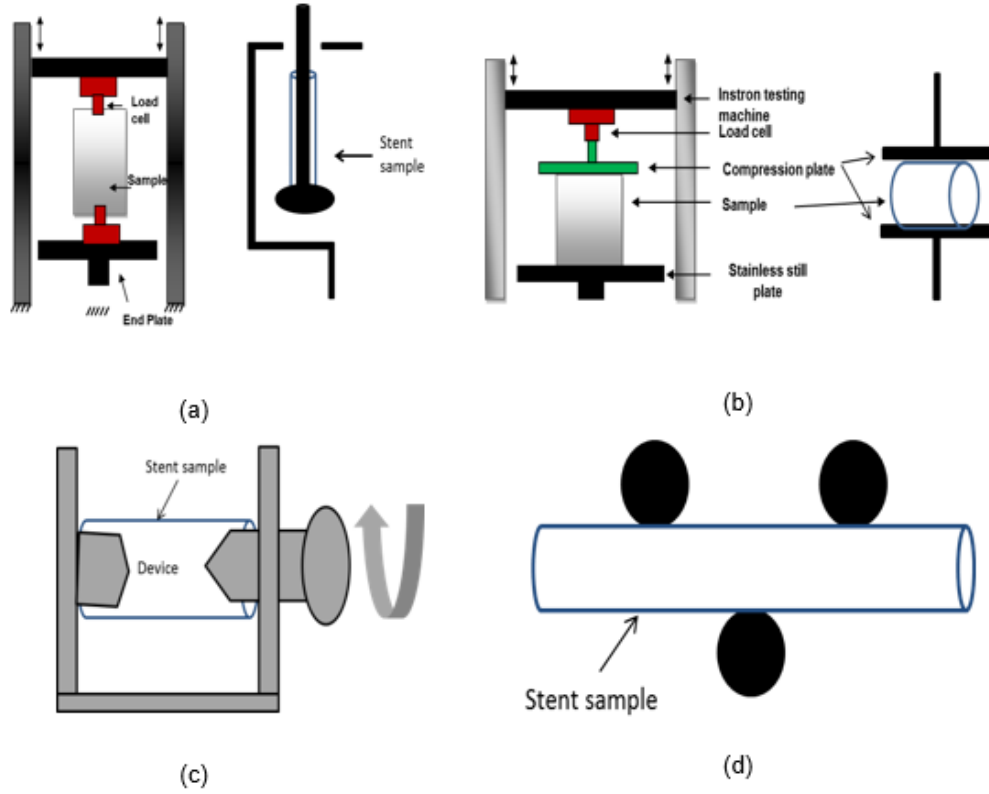
Stentin mekanik özelliklerinin ve implementasyonu için gerekli biyomekanik kuvvetlerin belirlenmesi gerekir. Ayrıca stent yerleştirildikten sonra damar içerisinde boyuna yönde çeki ve basıya, radyal yönde basıya, eğilmeye, yorulmaya ve burulmaya maruz kalır. (Şekil 6.5) Maruz kaldığı yüklem durumlarını test



edebilmek için kullanılacak test ekipmanlarının şematik görünümü şekil 6.6 daki gibidir.

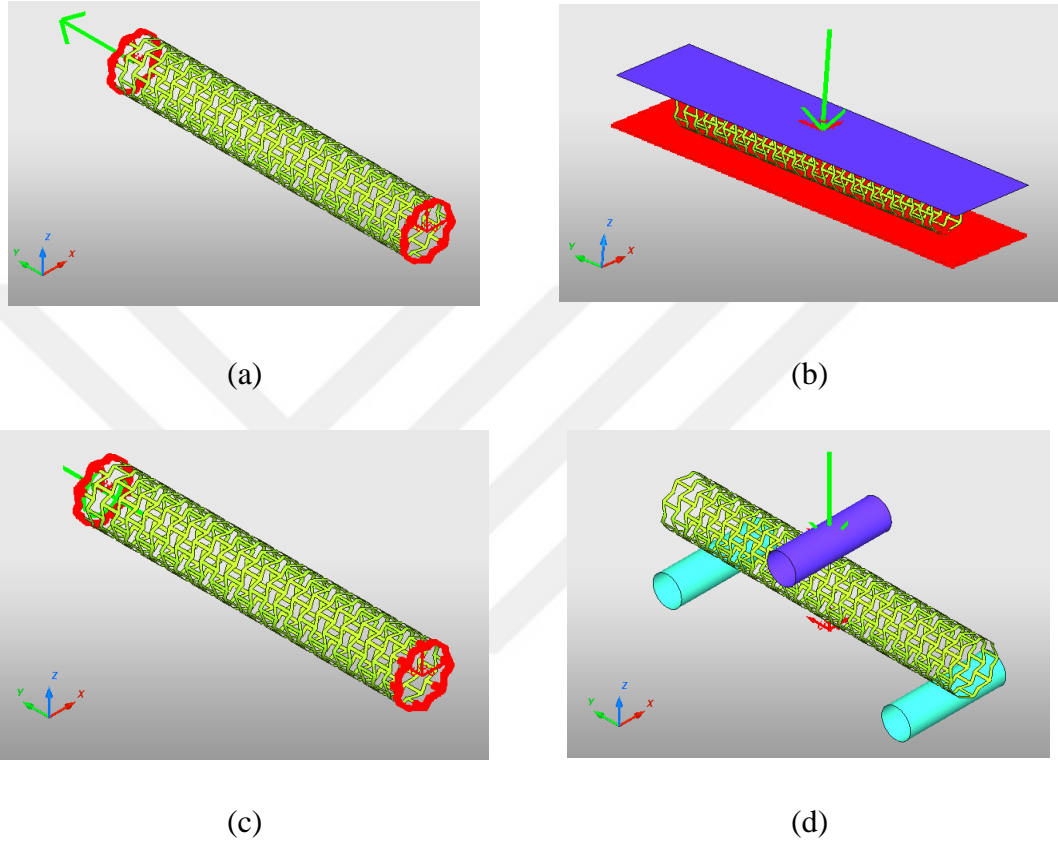


Şekil 6.5 Stentin damar içerisinde maruz kaldığı yüklemeler [41]



Şekil 6.6 Yükleme durumlarının şematik gösterimi (a) Boyuna yönde çekme (b) Basma testi ve stente uygulanan radyal basma testi (c) burulma testi (d) 3 nokta eğme testi

Ayrıca bu testlerin simülasyonu yapılacak sonlu elemanlar modeli sayesinde bilgisayar ortamında geometriye daha hâkim olunacaktır. Sonlu elemanlar analizi için ön çalışma yapılmış olup test ortamıyla aynı sınır şartlarında (Şekil 6.7) testlerin simülasyonları gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 6.7** Yükleme durumlarının şematik gösterimi (a) Boyuna yönde çekme (b) Stente uygulanan radyal basma simülasyonu (c) burulma simülasyonu (d) 3 nokta eğme simülasyonu



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında akıllı malzemelerden olan auxetic malzemeler incelenmiş ve bu konuda Türkçe hazırlanmış ilk tez çalışması olmuştur. Üretilmesi planlanan kalp damar stentinin dokusu için auxetic bir yapı elde edilmeye çalışılmıştır. Auxetic yapının geliştirilmesi için tasarlanan ilk auxetic yapının hücre ölçülerini %40 oranında büyütülerek ve küçülterek toplamda 3 farklı numune üretilmiş ve bu numunelerin iki katı kalınlığında 3 farklı numune daha üretilmiştir. Testlerin dışında Sonlu elemanlar analiz programlarından yararlanılmış ve karşılaştırılmaları yapılmıştır. Tez çalışmasından elde edilen temel çıkarımlar aşağıda sunulmuştur.

- Konvansiyonel malzeme için yapılan tek eksenli çekme deneyi, doğrusal olmayan açık (eksplisit) zaman integrasyonu ile simüle edildi ve gerçek deneyle simülasyon sonuçları çok büyük bir yaklaşıklıkla elde edebildi. Bu sayede auxetic numunelerde kullanılacak malzeme modeli doğrulandı.
- Doğrusal sonlu elemanlar analizleri ön sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmuştur. Bu analizlerde auxetic davranış gözlemlenmiş ve yaklaşık -0,3 civarında eşdeğer major Poisson oranı elde edilmiştir. Doğrusal analizde elde edilen eşdeğer Young Modülü, 570 MPa ile 740 MPa arasında değişmektedir ve bu değer konvansiyonel numunenin elastisite modülünden (25,000 MPa) çok daha küçüktür ve dolayısıyla auxetic yapı çok daha esnektir. Fakat oluşan deformasyonlar konvansiyonel numuneden çok daha geniştir ve bu nedenle doğrusal analiz tek başına yeterli değildir.
- Doğrusal olmayan açık zaman integrasyonu sonlu elemanlar analizleri daha geniş deformasyonları dikkate almaktadır, çünkü her zaman diliminde bir önceki zaman diliminde oluşan deformasyonlar dikkate alınmaktadır. Bu sebeple, hasarı ve şekil değişimlerini daha gerçekçi, bir biçimde görmek mümkün olmuştur. Bu analizde hücre duvarlarındaki eğilme hareketleri gözlemlenmiş ve bunun yol açtığı kırışma da simüle edilebilmiştir. Bu kırışma auxetic davranışın kaybolmasına yol açmıştır.

- Doğrusal olmayan analizlerde -0,26 ile -0,32 arasında eşdeğer Poisson oranları tahmin edilmiştir.
- İlk 3 auxetic numune için testler yapılmış ve analiz sonuçları tez sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sırasıyla %10, %3, %27 fark ile doğrulanmıştır. Bu karşılaştırma numunenin hasara başladığı anda çekme yönündeki maksimum uzama değerleri üzerinden yapılmıştır.
- Test sonucunda genişlemeyi gözlemek için yüksek hızlı kamera kullanılsa da istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Bunun sebebi olarak çok az genişme olması ve numunelerin çekme test cihazına istenilen düzlükte bağlanamaması olarak belirlenmiştir. Fakat çekme doğrultusundaki davranışı simülasyonda doğrulandığı için simülasyon sonuçları üzerinden değerlendirilmeye devam edilme kararı alınmıştır.
- Numune 6 en geniş deformasyon kabiliyetine sahip numunedir. O yüzden optimum stent geometrisi için en uygun adaydır. Numune 2 en büyük eşdeğer Poisson oranını sunmuştur ve bu da stent için istenen bir özelliktir ancak bu numune auxetic davranışını kaybetmeden önce daha az bir şekil değişimi göstermiştir. Bu da kanıtlamaktadır ki auxetic yapılar için büyük bir şekil değişimi illa ki büyük bir Poisson oranı demek değildir. Bu yüzden, ileriki çalışmalar nasıl kırılma olmadan daha büyük deformasyon kabiliyeti kazanılabilir ona odaklanacaktır.
- Kırıklığı engellemek için malzemenin kalınlığını arttırma ve hücre duvarları arasındaki mesafeyi azaltma kararı alınmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Lakes RS. Advances in negative Poisson's ratio materials. *Advanced Materials*. 1993, 5:293-296.
- [2] Scarpa F, Ciffo LG, Yates JR. Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam. *Smart Mater Struct* 2004,13(1),49
- [3] Alderson K, Evans KE. Microstructure and mechanical properties. *J. Appl. Phys.* 1989, 22(12),1877-1882.
- [4] Bhullar SK, Wegner JL, Mioduchowski A, Auxetic Behavior of Flat and Curved Indenters into a Half-Space, *Journal of Materials Science and Engineering A*, 2012, 2 (5), 436-441.
- [5] Williams JL, Lewis JL. Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis. *Trans. ASME, J Biomech Eng* 1982, 104: 50-56.
- [6] Lakes RS. Negative Poisson's ratio materials. *Science* 1987, 238:551.
- [7] Jin H, Lewis JL. Determination of Poisson's ratio of articular cartilage by indentation using different-sized indenters. *ASME Journal of Biomechanical Engineering*. 2005, 126:138-145.
- [8] Strek T, Maruszewski B, Narojczyk JW, Wojciechowski, KW. Finite element analysis of auxetic plate deformation, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008, 354(35-39), 4475-4480.
- [9] Li, W., Jiang, Z., Yang, Z., & Yu, H. Effective mechanical properties of self-healing cement matrices with microcapsules. *Materials & Design*, (2016), 95, 422-430.
- [10] Grima JN, Manicaro E, Attard D, Auxetic behaviour from connected different-sized squares and rectangles, *R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2010, 467(2126), 439-458.
- [11] Critchley, R., Corni, I., Wharton, J. A., Walsh, F. C., Wood, R. J., & Stokes, K. R. The Preparation of Auxetic Foams by Three-Dimensional Printing and Their Characteristics. *Advanced Engineering Materials*, (2013), 15(10), 980-985.
- [12] Evans KE Alderson A. Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking. *Advanced Materials*. 2000, 12 (9), 617-628.
- [13] Bhullar, S. K., Hewage, A. M., Alderson, A., Alderson, K., & Jun, M. B. Influence of negative Poisson's ratio on stent applications. *Advances in Materials*, (2013), 2, 42-47.
- [14] Alderson KL, Fitzgerald A, Evans KE. The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene, *Journal of Material Sciences*. 2000; 35, 4039-4047.
- [15] Evans KE, Alderson K. Auxetic materials: the positive side of being negative, *Eng. Sci. Educ. J*. 2000, 9, 148-154.
- [16] Evans K, Caddock B. Mechanisms and interpretation. *J. Phys.* 1989, 22:1883-1887.

- [17] Alderson KL, Alderson A, Smart G, et al. Auxetic polypropylene fibres: Part 1- manufacture and characterization. *Plast Rubber Compos* 2002, 31: 344–349.
- [18] Alderson KL, Webber RS, Kettle AP, Evans KE, Novel fabrication route for auxetic polyethylene. Part 1. Processing and microstructure, *Polymer Engineering and Science*, 2005, 45(4), 568-578.
- [19] Pickles AP, Webber RS, Alderson KL, Neale PJ, Evans KE, The effect of the processing parameters on the fabrication of auxetic polyethylene - Part I The effect of compaction conditions, *Journal of Materials Science*, 1995, 30(16),4059-4068.
- [20] Alderson K, Evans KE. Microstructure and mechanical properties. *J. Appl. Phys.* 1989; 22(12),1877-1882.
- [21] Bhullar, S. K., Three decades of auxetic polymers: a review. *e-Polymers*, (2015), 15(4), 205-215.
- [22] Liu Q. Literature Review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential, Applications to Aerospace and Defence. Air Vehicles Division Defence Science and Technology Organisation 2006; DSTO-GD-0472.
- [23] Scarpa F, Ciffo LG, Yates JR. Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam. *Smart Mater Struct* 2004,13(1),49. doi:10.1088/0964-1726/13/1/006.
- [24] Alderson A, Alderson KL, Samuel A, McDonald, Beth M, Shonali N, Philip JW, Yong TY. Piezomorphic Materials. *Macromo Mater Eng.* 2013, 298(3), 318-327.
- [25] Sigmund O, Torquato S, Aksay IA, On the design of 1-3 piezocomposites using topology optimization, *J. Mater. Res.*,1998, 13(4), 1038–1048.
- [26] Choi JB, Lakes RS. Nonlinear analysis of the Poisson's ratio of negative Poisson's ratio foams. *J. Compos Mater.* 1995, 29(1),113-128.
- [27] Branka AC, Heyes DM, Wojciechowski KW. Auxeticity of cubic materials, *Phys. Status Solidi B.* 2009, 246(9), 2063-2071.
- [28] Chan N, Evans KE. Indentation resilience of conventional and auxetic foams. *J Cell Plast.* 1998, 34(3), 231-260.
- [29] Grima JN, Alderson A, Evans KE. An alternative explanation for the negative Poisson's ratios in auxetic foams. *J. Phys. Soc. Jpn.* 2005, 74(4), 1341-1342.
- [30] [www.auxetic.info](http://www.auxetic.info) ,Mayis, 2016
- [31] Lakes RS. Advances in negative Poisson's ratio materials. *Advanced Materials.* 1993, 5, 293-296
- [32] Evans KE. Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour.* 1991,15(4), 170-174.
- [33] Ko, J., Bhullar, S., Cho, Y., Lee, P. C., & Jun, M. B. G., Design and fabrication of auxetic stretchable force sensor for hand rehabilitation. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(7), 075027.
- [34] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2382> , Mayis 2016.

- [35] <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10944.pdf> , Haziran 2016.
- [36] <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/sonlu-elemanlar-metodu-nedir-nerelerde-kullanilir/11661#ad-image-0> , Mart 2016.
- [37] [http://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA\\_Theory.pdf](http://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf), Mayıs 2016.
- [38] <http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/BilgisayarDestekliTasarim/BilgisayarDestekliTasarimVeAnaliz-1-hafta.pdf>, Mayıs 2016.
- [39] Kurtuluş E *Yeni Nesil Otokorkuluk Sistemlerinin Çarpışma Analizleri Ve Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri Kullanılarak Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2015
- [40] <http://analizsimulasyon.com/2014/12/28/sonlu-elemanlar-yontemi/>, Mayıs 2016.
- [41] <http://www.pcronline.com/Lectures/2006/Novel-technique-for-SFA-CTO-intervention2>, Mayıs 2016.
- [42] [http://www.altairhyperworks.com/\(S\(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd\)\)/hwhelp/Altair/hw11.0/help/hwsolvers/theory\\_element\\_lib.pdf](http://www.altairhyperworks.com/(S(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd))/hwhelp/Altair/hw11.0/help/hwsolvers/theory_element_lib.pdf) Haziran 2016
- [43] P. I. Hsu, M. Huang, Z. Xi, S. Wagner, Z. Suo, J. C. Sturm, Spherical deformation of compliant substrates with semiconductor device islands, *Journal Of Applied Physics*, 2003, 705-712.
- [44] J. R. Davis. *ASM Specialty Handbook® Stainless Steels*, Davis & Assotites, 39-40, ASM International, New York, 1994.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Ahmet Abdullah KARACA  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 24/05/1990, ANKARA  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : [ahmetabdullahkaraca@gmail.com](mailto:ahmetabdullahkaraca@gmail.com)

### ÖĞRENİM DURUMU

<u>Derece</u>	<u>Alan</u>	<u>Üniversite adı</u>	<u>Mezuniyet Yılı</u>
Lisans	Makine Mühendisliği	Uludağ Üniversitesi	2013

### İŞ TECRÜBESİ

<u>Yıl</u>	<u>Firma/Kurum</u>	<u>Görevi</u>
2014 - 2015	DTA Mühendislik	Teknik Destek ve Proje Mühendisi
2015 - Halen	Bursa Teknik Üniversitesi	TÜBİTAK projesinde Tam Zamanlı Bursiyer

### BİLİMSEL ÇALIŞMALARI

#### ▪ Bildiri

1. Caliskan, S., Lekesiz, H., Karaca, A.A., Yildiz A.R., (2016). Fatigue properties of ABS Thermoplastics used in exterior lighthing. 17th International Conference on Machine Design and Production. (UMTIK 2016)

#### ▪ Projede görev alma

1. Nanolifli İlaç Taşıma Sistemlerine Sahip Yenilikçi Bir Oksetik Kan Damarı Stenti Geliştirilmesi (Tam Zamanlı Bursiyer)