

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hazal OVAT CAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ARALIK 2017

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hazal OVAT CAN

(131080106)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd.Doç. Dr. Sukhwinder Kaur BHULLAR

Eş Danışman: Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ

ARALIK 2017

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131080106 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hazal OVAT CAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AKILLI MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Sukhwinder Kaur BHULLAR**
Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Eş Danışman : **Doç .Dr. Hüseyin LEKESİZ**
Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mehmet ORHAN**
Uludağ Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği

Savunma Tarihi : 28 Aralık 2017

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi/...../.....

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: Hazal OVAT CAN

İmzası :

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması süresince, yaşadığım aksaklık ve gecikmelere rağmen ilgi ve alakasını eksiltmeyen danışman hocam Sukhwinder Kaur BHULLAR'a ve eş danışmanım Hüseyin LEKESİZ'e, sonlu elemanlar analizlerinde donanımıyla destek olan iş arkadaşım Onur EROL'a, dönem arkadaşım ve laboratuvar çalışmalarında desteğini esirgemeyen Ahmet Abdullah KARACA'ya, manevi anlamda her zaman yanımda olan eşim İsmail CAN'a, anneme, babama ve elbette ki bu süreçte aramıza katılan küçük kızım Doğa İlke CAN'a sabırlarından dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Aralık 2017

Hazal OVAT CAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SEMBOLLER	ix
KISALTMALAR	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ 1	
1.1 Tezin Amacı	2
2. LİTERATÜRÜN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ	15
2.1 Auxetic Malzemelerin Gelişim Süreci	15
2.2 Auxetic Malzeme Çeşitleri	16
2.2.1 Doğal auxetic malzemeler	16
2.2.2 İnsan yapımı auxetic malzemeler	17
2.2.2.1 Magnox nükleer reaktör	17
2.2.2.2 Auxetic hücreli petek yapılar	17
2.2.2.3 Auxetic polimer malzemeler	21
2.3 Auxetic Malzemelerin Mekanik Özellikleri	23
2.3.1 İndentasyon direnci	23
2.3.2 Sinklastik Davranış	23
2.3.3 Kırılma tokluğu	24
2.3.4 Kayma direnci	24
2.3.5 Ses emilimi	25
2.3.6 Geçirgenlik	25
3. MEKANİK TESTLER	26
3.1 Malzeme	26
3.2 Konvansiyonel Numuneler	26
3.2.1 Numunelerin teste hazırlanması	26
3.2.2 Konvansiyonel malzeme çekme testleri	29
3.3 Auxetic Malzeme Testleri	32
3.3.1 Auxetic numunelerin hazırlanması	32
3.3.2 Auxetic Numuneler için Çekme Test Uygulaması	33
4. AUXETİK YAPILARDA SINKLASTİK DAVRANIŞIN SONLU FARKLAR YÖNTEMİYLE GÖSTERİMİ	39
4.1 Eksplisit Analiz	39
4.2 Analizin Uygulama Adımları	39
4.2.1 Modelleme	39
4.2.2 Sınır şartları	39
4.2.3 Malzeme modeli	40

4.2.4 Modelin ağ ile örülmesi (Mesh).....	41
4.2.5 Analizin kurulması	41
4.2.6 Analiz sonuçları	42
5. SONUÇ.....	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	49

SEMBOLLER

E	: Elastisite Modülü
G	: Kayma Modülü
K	: Bulk Modülü
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poisson Oranı
ϵ	: Mühendislik Gerinimi
ϵ_A	: Akma Gerinimi
ϵ_T	: Gerçek Gerinim
ϵ_K	: Kopma Gerinimi
σ	: Mühendislik Gerilimi
σ_A	: Akma Gerilimi
σ_K	: Kopma Gerilimi
σ_T	: Gerçek Gerilim

KISALTMALAR

NPR	: Negatif Poisson Oranı
PR	: Poisson Oranı
PTFE	: Polytetrafluoroethylene
UHMWPE	: Ultra-high-molecular-weight polyethylene

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Konvansiyonel numunelerin max kuvvet-şekil değişim sonuçları.	30
Çizelge 3.2 : Konvansiyonel numunelerin mühendislik eğrisi sonuçları.	32
Çizelge 3.3 : Numunelere ait hücre boyut ölçüleri.	35
Çizelge 4.1 : Malzeme parametreleri.	41

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Seçilmiş bazı akıllı malzemelerin uyarıcı-cevap matrisi.....	1
Şekil 2.1 : Çekme kuvveti altında a) Geleneksel malzeme davranışı b) Auxetic malzeme davranışı.....	15
Şekil 2.2 : Doğal ve insan yapımı NPR özelliği gösteren bazı malzemelerin keşif yıllarını gösteren çizelge	16
Şekil 2.3 : Magnox nükleer reaktörün şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.4 : (a) 2 boyutlu petek yapıların tasarım parametreleri (b) $\theta > 0$ pozitif Poisson oranlı konvansiyonel petek yapı, (c) $\theta < 0$ negatif Poisson oranlı auxetic re-entrant petek yapısı [24].....	18
Şekil 2.5 : Açı değerinin değişmesiyle ortaya çıkan auxetic yapı	18
Şekil 2.6 : Tek yönlü uygulanan kuvvetler altında (a) hegzagonal petek yapısının pozitif Poisson oranlı konvansiyonel malzeme davranışı, (b) re-entrant petek yapısının negatif Poisson oranlı auxetic davranışı [25]	18
Şekil 2.7 : (a) Deforme olmamış (b) Deforme olmuş haldeki dönen kare geometrisi [26].....	19
Şekil 2.8 : Auxetic yapıdaki dönen üçgensel hücresel geometrisinin farklı açılara geçişteki deformasyon görünümü [26]	19
Şekil 2.9 : Auxetic yapıdaki dönen dikdörtgen hücresel geometrisinin farklı açılara geçişteki deformasyon görünümü [27]	20
Şekil 2.10 : (a) Yapısı bozulmamış pozitif Poisson oranlı geometrik model, (b) bozulmamış yapıdan rib eksilterek elde edilen Kayıp rib geometrik modeli [28].....	20
Şekil 2.11 : Kayıp rib geometrik modelin deformasyona uğramış görünümü [29]...	21
Şekil 2.12 : (a) 6 kırıktan oluşan auxetic chiral yapı, (b) basma kuvveti altında chiral yapının auxetic davranışından dolayı daralarak küçülmesi [30-31]	21
Şekil 2.13 : (a) Konvansiyonel polimer köpük, (b) re-entrant polimer köpük yapılar [9].....	22
Şekil 2.14 : Auxetic polimerlerin şematik gösterimi (a) deformasyon öncesi, (b) deformasyon sonrası [32].....	22
Şekil 2.15 : a) Auxetic olmayan, b) Auxetic koltuklar [34]	23
Şekil 2.16 : (a) Antiklastik davranış, (b) sinklastik davranış [35].....	23
Şekil 2.17 : Sinklastik davranışlı auxetic yapıların kask ve dizlik uygulamaları [36]	24
Şekil 2.18 : Geçirgenliğin deformasyonla değişimi [46].....	25
Şekil 3.1 : Konvansiyonel numune boyutları	26
Şekil 3.2 : SHIMADZU Test Cihazı.....	27

Şekil 3.3 : (a) Lateks Sünger ile bantlanan numune ve (b) çekme sırasında yaşanan kayma	28
Şekil 3.4 : Metal ve kaçuk yüzeyleri birleştirme bantları	28
Şekil 3.5 : a) Mukavva karton ölçüleri, b) Memo Loc marka yapıştırıcı	29
Şekil 3.6 : a) Numunelerin çekilme yönü (b) Çekme testi sonrası numunenin kopmuş hali	29
Şekil 3.7 : 3 numuneye ait kuvvet (N)-yer değiştirme (mm) grafiği	30
Şekil 3.8 : Her bir numuneye ait gerilim-gerinim grafikleri ve ortalama gerilim-gerinim grafiği.....	31
Şekil 3.9 : Mühendislik ve gerçek gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması.....	32
Şekil 3.10 : Femtosecond lazer kesim şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.11 : a) Deneyde kullanılan kurulum, b) Lazer kesimle oluşan geometri.....	33
Şekil 3.12 : a) %40 Büyütülmüş, b) Orijinal büyüklük, (c) %40 Küçültülmüş boyutlardaki re-entrant motifli auxetic numuneler	34
Şekil 3.13 : a) Numunenin hazırlanmış, b) çekme cihazında yerleştirilmiş, c) ve d) testin tamamlandığındaki halleri	34
Şekil 3.14 : Hücre boyutlarının şematik gösterimi	34
Şekil 3.15 : 0.025 mm kalınlığında olan orijinal hücre boyutundaki 3 numuneye ait kuvvet-şekil değişimi grafiği	35
Şekil 3.16 : Orijinal hücre boyutlu numunelerin test süresince aldığı görünümeler	35
Şekil 3.17 : %40 küçültülmüş hücre boyutundaki 3 numuneye ait Kuvvet-Şekil Değişim grafiği.....	36
Şekil 3.18 : %40 küçültülmüş hücre boyutlu numunelerin test süresince aldığı görünümeler	36
Şekil 3.19 : %40 büyütülmüş hücre boyutundaki 3 numuneye ait kuvvet-şekil değişim grafiği	36
Şekil 3.20 : %40 büyütülmüş hücre boyutlu numunelerin test süresince aldığı görünümeler	37
Şekil 3.21 : Auxetic numunelerin ortalama kuvvet-şekil değişim grafikleri.....	37
Şekil 4.1 : Analiz numunesi.....	39
Şekil 4.2 : Sınır şartları ve yer değiştirmenin tanımlanması.....	40
Şekil 4.3 : Üçgen ağ modeli.....	41
Şekil 4.4 : a) Auxetic numunenin küreyi sarma eğilimi, b) re-entrant hücrelerin deformasyonu	42
Şekil 4.5 : Kürenin yer değiştirmesinin sonucunda auxetic numunede ilerleyişi.....	42

AKILLI MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Akıllı malzemeler, dış uyaranlar (örneğin stres, sıcaklık, elektrik, manyetik alan) etkisi ile özelliklerini değiştirerek tepki verme yetisine sahip olan malzemelerdir. Aynı zamanda; havacılık, otomotiv, biyomedikal, elektronik gibi birçok uygulama alanında yer almaktadırlar. Akıllı malzemeler hem yeni bir ürün geliştirilmesiyle hem de konvansiyonel malzemelere geometrik özellikler kazandırılmasıyla oluşabilir. Bu bağlamda bu çalışma içerisinde, konvansiyonel malzemelere geometrik özellik katarak elde edilmiş ve farklı mekanik özelliklerinden dolayı merak konusu olan auxeticlerden bahsedilmiştir. Malzeme olarak konvansiyonel kabul edilen ve biyomedikal alanda sıkça kullanılan folyo (çok ince) yapıdaki 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Femtosecond lazer kesim yöntemi ile konvansiyonel malzemeye farklı hücre boyutlarına sahip geometrik şekil işlenerek, Negatif Poisson Oranlı auxetic malzeme elde edilmiştir. Mekanik özelliklerin tespiti için dikdörtgen kesitli numuneler üzerinde çekme testi uygulanmış, aynı şartlarda testleri yapılan konvansiyonel numuneler ile kuvvet-şekil değişimi ve gerinim-gerilim grafikleri sayesinde, hücre boyutu, kalınlık ve elastisite modülü parametreleri karşılaştırılıp, sonuçlarıyla beraber kullanım alanına göre tercih seçenekleri sunmuştur. Bu karşılaştırmalar sonucunda, folyo yapıdaki konvansiyonel malzemelerin elastisite modülü, normal elastisite değerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Auxeticlerin gözenekli yapılarından dolayı konvansiyonel malzemelere göre daha düşük kuvvetler altında deforme olduğu fakat daha fazla şekil değişimine uğradığı görülmüştür. Aynı zamanda auxeticlerin farklı büyüklükteki hücre boyutları ve kalınlıkları arasında kıyas yapıldığında, hücre boyutu küçülüp kalınlık arttıkça, auxetic etkinin daha fazla sürdüğü anlaşılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle de eğme kuvveti ile ortaya çıkan sinklastik davranışının auxetic numunedeki aldığı görsel incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Akıllı malzemeler, Negatif Poisson Oranı, Auxetic

MECHANICAL PROPERTIES OF SMART METATERIALS

SUMMARY

Smart materials have the ability to change more than one of its properties with external stimulus (e.g. stress, temperature, electric, magnetic field). These materials have wide range of applications in aerospace, automotive, medical, electronics and more. Thus its significance is rising for the next generations. Smart materials can be obtained either as entirely new developed product or by adding novel features to conventional materials. In this study, auxetic materials were mentioned, which were obtained by adding geometric features to conventional materials and which has an interest due to their different mechanical properties. 316L stainless steel is used in foil (very thin) structure which is accepted as conventional material which is used frequently in biomedical field. By using the femtosecond laser cutting method, a geometric shape with different cell sizes is processed from conventional material and a negative Poisson Ratio auxetic material is obtained. In order to determine the mechanical properties, tensile tests were applied on rectangular samples and the effect of cell size, thickness and elasticity modulus parameters on mechanical behavior is investigated. As a result of these tests, it has been found that the modulus of elasticity of the conventional materials in foil structure is lower than the steels known elastic modulus obtained from bulk samples. Due to the porous structure of auxetics, it has lower modulus of elasticity than conventional materials but it can bear more deformation prior to failure and show a completely different failure pattern. At the same time, when compared to the size of cells and thicknesses of auxetics, it is understood that the auxetic effect is longer as the cell size is decreased and the thickness is increased.

By means of the finite elements, the synclastic behavior, which occurs with the bending forces, has been visually examined in the auxetic sample.

Keywords: Smart materials, Negative Poisson's Ratio, Auxetic

1. GİRİŞ

Akıllı malzemeler, hassas, çok işlevli, uyarlanabilir şeklindeki ifadelerle de tanımlanabilen çevre şartlarına göre özelliklerini değiştirebilme kabiliyeti olan sistemler olarak tanımlanır [1]. Başka bir deyişle bir enerji türünü başka bir enerji türüne dönüştürürler [2]. Günümüzde de bu özellikleri nedeniyle etkinlik alanları genişleyerek, geleneksel malzemelerin eksik kalan birçok noktasını tamamlar niteliğe gelmiştir. Başta biyomedikalden tekstile, havacılıktan savunma sanayiye, otomotivden ev aksesuarlarına kadar geniş bir yelpazede kullanılan ve merak konusu olmaya devam edilen malzemelerdir. Dönüşüme neden olan uyarıcı çevre şartları ve buna karşılık verilen cevap bazında düşünüldüğünde Şekil 1.1’de gördüğümüz gibi birden fazla akıllı malzeme bulunmaktadır.

CEVAP UYARICI ÇEVRE ŞARTI	ELEKTRİK	MANYETİK	TERMAL	MEKANİK
ELEKTRİK			Termoelektrik	Piezoelektrik ER Sıvıları MR Sıvıları
MANYETİK				Manyetostiriksiyon (Mıknatıssal Büzülme)
TERMAL				Şekil Hafızalı Alaşımlar
MEKANİK	Piezoelektrik Elektro sınırlayıcı	Manyetostiriksiyon		Negatif Poisson Oranı

Şekil 1.1 : Seçilmiş bazı akıllı malzemelerin uyarıcı-cevap matrisi

Literatürde de sıklıkla karşılaşılan akıllı malzemelerin birkaçını kısaca tanımlamak, davranış biçimlerini anlamada yardımcı olacaktır. Basınç yoluyla oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren piezoelektrik, ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren şekil hafızalı malzemeler, sahip olduğu manyetik alanı, mekanik bir dış uyaran sayesinde harekete çeviren MR sıvıları, geleneksel malzemelere geometrik özellik kazandırarak mekaniksel bir dış uyararı (çekme, basma, burma, eğme vb. gibi) yine mekanik bir harekete çeviren negatif Poisson oranlı malzemeler yani “auxetic” malzemeler bu tezde bahsedilecektir.

1.1 Tezin Amacı

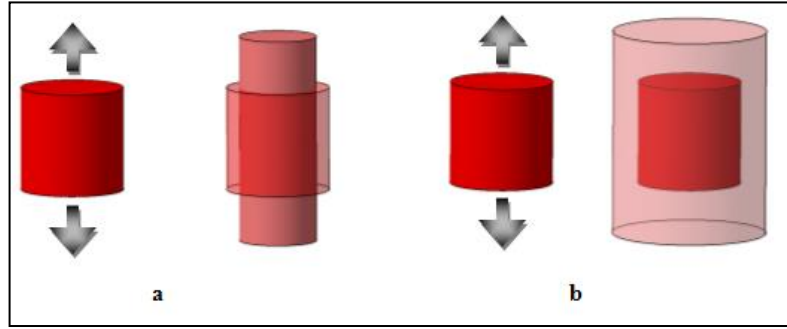
Bu tez çalışmasının amacı, konvansiyonel malzeme olan 316L paslanmaz çelik malzemeye, geometrik şekil özelliği katarak akıllı hale getirilen negatif Poisson oranlı auxetic numuneler üretmek; aynı malzemedeki işlenmemiş numuneler üretip çekme testi sonucu elde edilen mekanik değerlerin kıyaslanarak kazanılan özelliklerin tespit edilmesidir.

Aynı zamanda auxetic malzemelere ait mekanik özelliklerden olan sinklastik davranışın, sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyon çalışması yapıp, auxetic yapının eğilme kuvveti altında nasıl şekil değiştirdiği gözlemlenecektir.

2.LİTERATÜRÜN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ

2.1 Auxetic Malzemelerin Gelişim Süreci

Evans [4] tarafından 1991’ de yayınlanan makalede ilk defa genişleyebilen manasına gelen Yunanca “auxetos” kelimesinden türemiş “auxetic” ifadesi kullanılmıştır. Bu ifade geleneksel malzemelerin tersi yönde hareket eden malzemeler için kullanılır. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi geleneksel malzemeler çekme kuvveti altında incelerek uzarlar fakat auxetic malzemeler çekme kuvveti altında kalınlaşarak uzarlar. Aynı şekilde basma kuvveti altında ise auxetic malzemeler daralarak küçülürler.



Şekil 2.1 : Çekme kuvveti altında a) Geleneksel malzeme davranışı, b) Auxetic malzeme davranışı

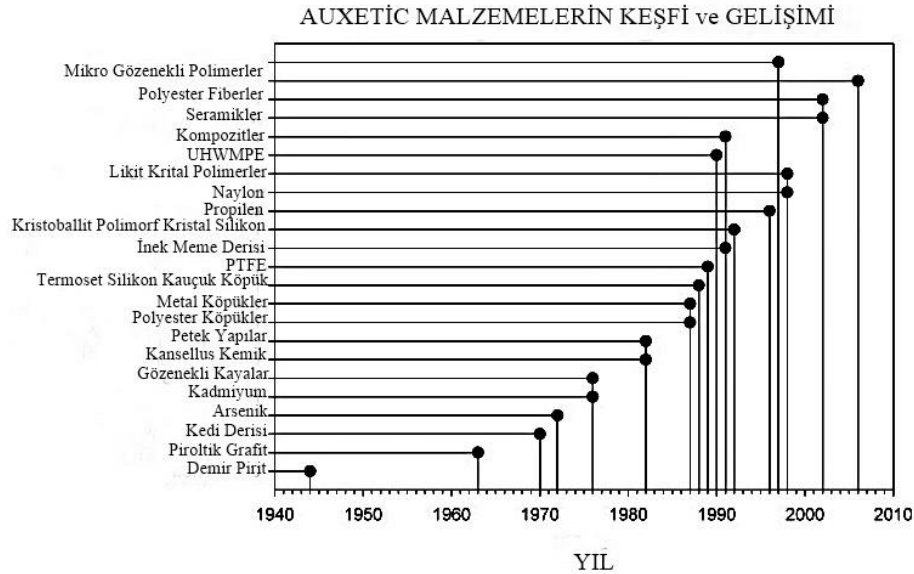
Auxetic malzemeler 100 yılı aşkın süredir bilinmektedirler ve bu auxetic davranışın anahtarı Poisson oranıyla ilgilidir. Poisson oranı elastisite teorisinin izin verdiği ölçülerde, isotropik yani bütün yönlerdeki özelliği aynı olan malzemelerde $-1 \leq \nu \leq 0,5$ değerleri arasında olur [5] ancak auxetic malzemelerde bu değer negatiftir.

1927’de A.E. H. Love [6] negatif Poisson oranına sahip bir materyali tarif etti ve $\nu = -0,14$ olan akübik kristal pirit (pyrite) örneğini sundu. 1982’ de Gibson [7] silikon kauçuk balpeteği formunda yer alan riblerin bükülmesiyle auxetic davranışın meydana geldiğini fark etti. Daha sonra 1985’ te Almgren [8] analitik açıklamalara dayanarak iki boyutlu re-entrant auxetic yapısını ifade etti ve 1987 de ilk defa Lakes tarafından auxetic köpük imalatı yapıldı [9]. Lakes ve Caddoc polimer formdaki auxetic yapıların üretimi ile devam etti [10-12]. Bu zamandan beridir de polimerler,

kompozitler, metal ve seramikleri kapsayan birçok alanda çok çeşitli malzemeler üretilerek birçok alanda yayılmaya ve gelişmeye devam etmektedir.

2.2 Auxetic Malzeme Çeşitleri

Auxetic malzemeler iki ana gruba ayrılır: doğal ve yapay yani insan yapımı auxetic malzemeler. Şekil 2.2’de bu iki gruba ait çeşitli auxetic yapıları malzemelerin keşif çizelgesi yer almaktadır.



Şekil 2.2 : Doğal ve insan yapımı NPR özelliği gösteren bazı malzemelerin keşif yıllarını gösteren çizelge

2.2.1 Doğal auxetic malzemeler

Doğal auxetic malzemeler moleküler auxetic malzemeler ve biyomalzeme olarak sınıflandırılırlar[13]. Doğal moleküler auxetic malzemelere örnek olarak demir piritler [6], arsenic, cadmium ve α - cristobalite silikat gibi tek kristalli malzemeler örnek olarak verilebilir [14-17]. Bütün bu malzemeler doğal olarak inorganik olduğundan ve kendilerine has moleküler yapıya sahip oldukları için, doğal moleküler auxetic materyaller olarak bilinirler.

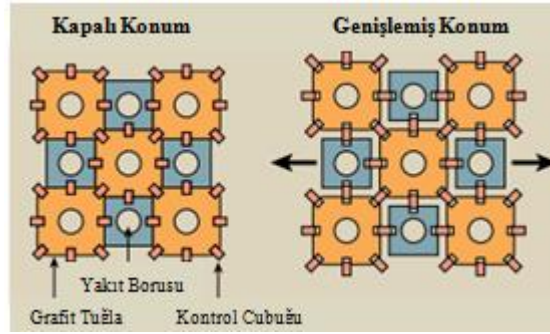
İnek meme derisi, kedi derisi, semender derisi gibi biyomalzeme olan auxetic yapılarda da negatif Poisson’s oranı görülmektedir [18-21]. Negatif Poisson oranının derilerindeki karmaşık mikro yapısal fibröz ağa bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

2.2.2 İnsan yapımı auxetic malzemeler

2.2.2.1 Magnox nükleer reaktör

Auxetic davranış biçimi pratikte ilk olarak Magnox nükleer reaktöründe kullanılmıştır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi yapısı grafit tuğlalardan, yakıt borusu ve kontrol çubuklarından oluşmaktadır. Yapısı, deprem sırasında oluşan yatay kuvvetlere dayanacak ve grafit tuğla ile kontrol çubukları arasındaki ısısal hareketleri gidermek için yapının serbestçe hareket etmesine izin verecek şekilde tasarlanmıştır [22].

Yapı çekme yüklemesi altında deforme olmaya başladığında bütün radyal yönlerde genişleyerek kare örgü yapısını muhafaza eder. Bu davranış biçimi de yapıyı auxetic hale getirmiştir.



Şekil 2.3 : Magnox nükleer reaktörün şematik gösterimi

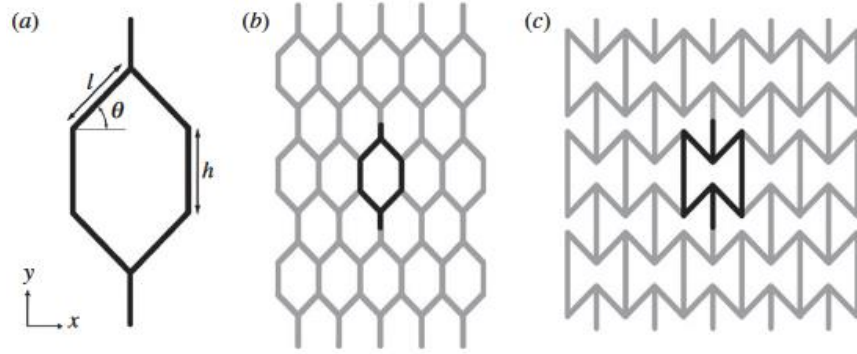
2.2.2.2 Auxetic hücresel petek yapılar

Re-entrant hücresel yapılar

En bilinen ve araştırılan hücresel yapı olan re-entrant petek yapısı ilk defa Gibson tarafından önerilmiştir [7] ve bu hücresel yapının 2 boyutlu olarak auxetic davranışı Master ve Evans tarafından incelenmiştir [23].

Geometrik özellikleri kullanılarak konvansiyonel hegzagonal petek yapısının nasıl auxetic hale getirilip "yeniden girintili" manasında tanımlanabilen re-entrant yapıya çevrildiği Şekil 2.4 ve 2.5'te yer almaktadır. Şekil 2.4 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi dışa doğru çıkıntı yapan açılı ribler, (c)'de olduğu gibi iç kısma doğru yönlendirilir. Buda Şekil 2.6'da ifade edildiği gibi çekme kuvveti altında hücrelerin içine doğru yönlendirilmiş riblerin açılıp kuvvete dikey yönde genişlemesine, basma kuvveti

altında ise içe geçmiş rib uçlarının birbirine daha da yaklaşmasıyla küçülerek auxetic bir davranış ortaya çıkarmasını sağlar.

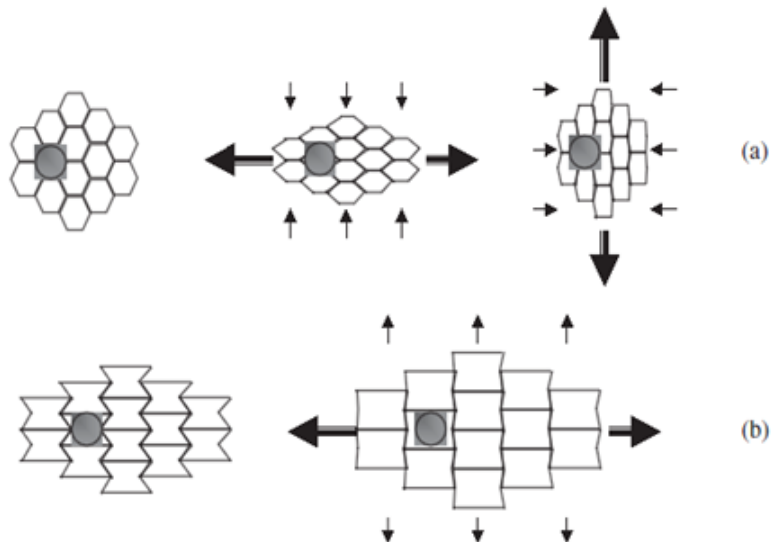


Şekil 2.4 : (a) 2 boyutlu petek yapıların tasarım parametreleri (b) $\theta > 0$ pozitif Poisson oranlı konvansiyonel petek yapı, (c) $\theta < 0$ negatif Poisson oranlı auxetic re-entrant petek yapısı [24]



Şekil 2.5 : Açılı değerinin değişmesiyle ortaya çıkan auxetic yapı

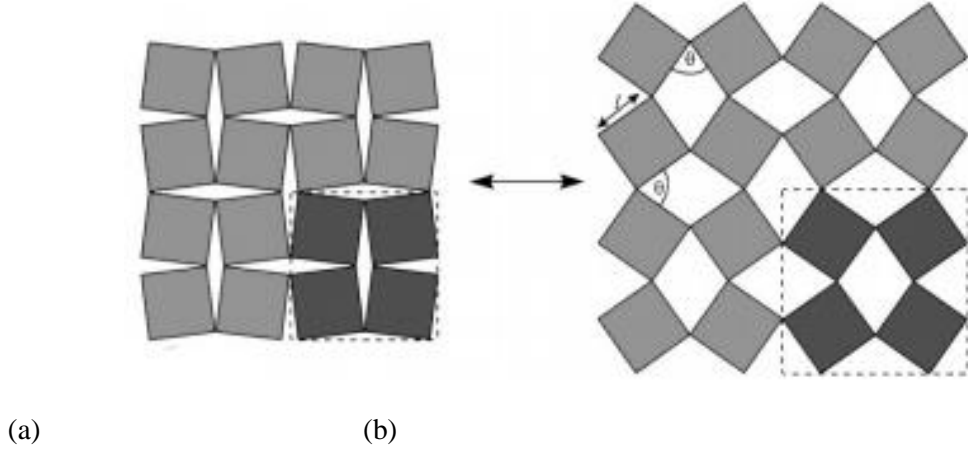
Auxetic davranış, dik yöndeki rib uzunluğuna (h), açılı duran rib uzunluğuna (l), rib kalınlığına ve θ açısına bağlı olarak değişkenlik gösterir.



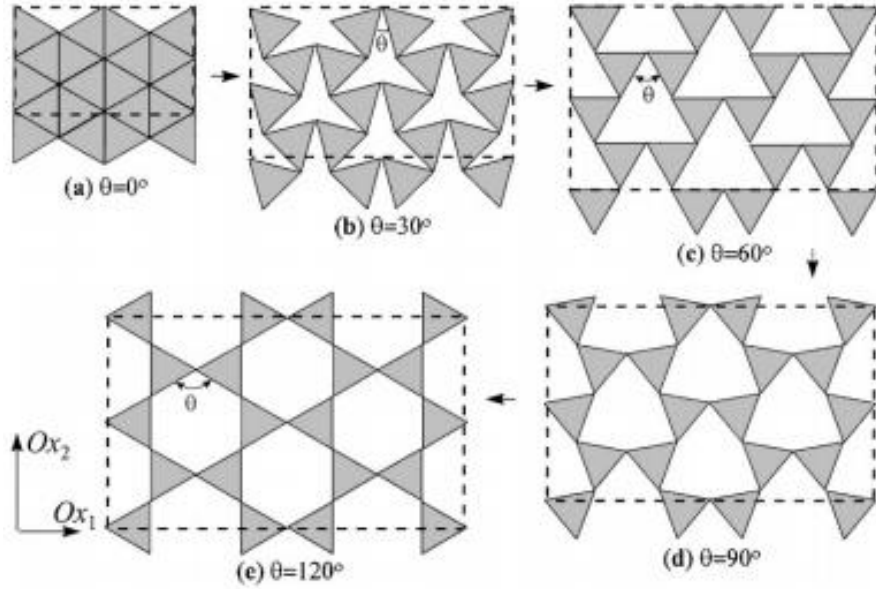
Şekil 2.6 : Tek yönlü uygulanan kuvvetler altında (a) hegzagonal petek yapısının pozitif Poisson oranlı konvansiyonel malzeme davranışı, (b) re-entrant petek yapısının negatif Poisson oranlı auxetic davranışı [25]

Dönen hücresel yapılar

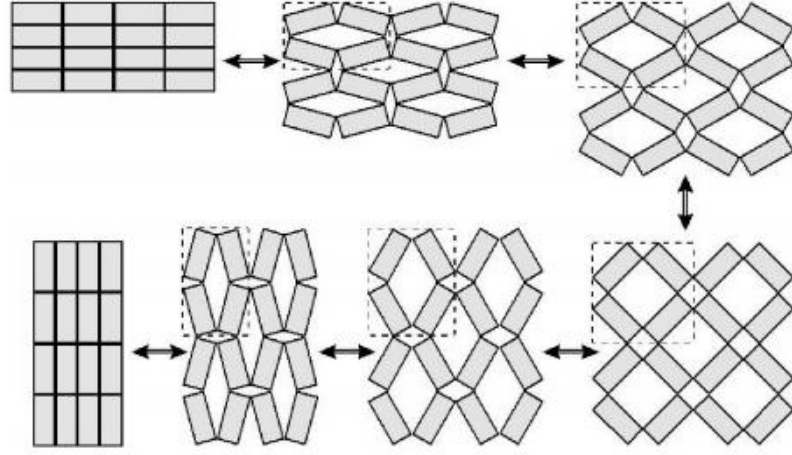
2000 yılında Grima ve Evans tarafından negatif Poisson Oranına sahip yeni bir mekanizma tanımlanmıştır. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de gösterilen bu yapıların özellikleri var olan rijit kare ya da üçgen şekillerin bir birbirleriyle köşelerden temas edip menteşe bağlantısı gibi dönmesine dayanır. Bu tipteki geometriler yaygın olarak inorganik kristalli malzemelerde bulunmaktadır [26].



Şekil 2.7 : (a) Deforme olmamış (b) Deforme olmuş haldeki dönen kare geometrisi [26]



Şekil 2.8 : Auxetic yapıdaki dönen üçgensel hücresel geometrisinin farklı açılara geçişteki deformasyon görünümü [26]

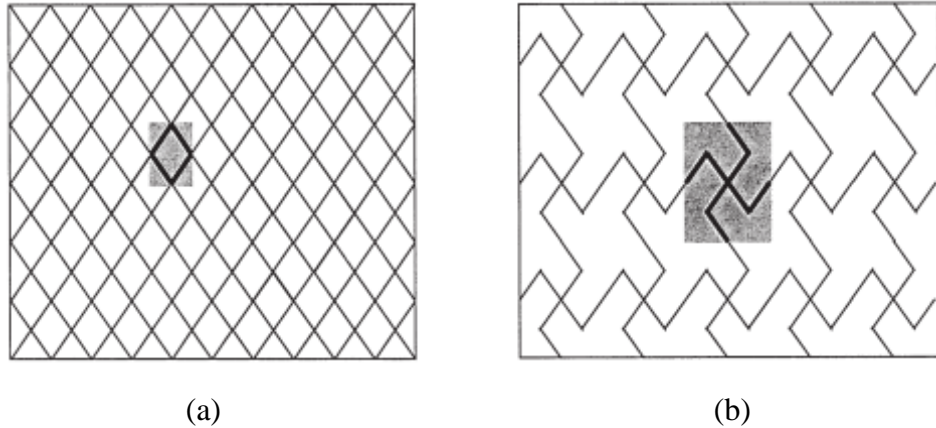


Şekil 2.9 : Auxetic yapıdaki dönen dikdörtgen hücresel geometrisinin farklı açılara geçişteki deformasyon görünümü [27]

Dönen hücresel yapılarda, Şekil 2.9’da görülen dikdörtgen modellerde açığa ve uygulanan kuvvetin yönüne göre negatif ya da pozitif Poisson oranına sahip olabildiği, sadece dönen kare geometride NPR olduğu belirtilmiştir [26].

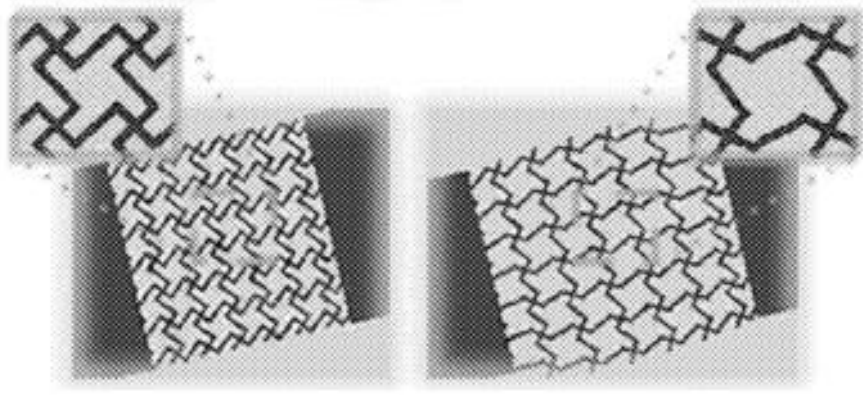
Kayıp rib yapılar

Kayıp rib geometrik modeli, Şekil 2.10 (a)’da görüldüğü gibi şekle sahip olan yapıdan riblerden herhangi birinin (iç açılarında herhangi bir değişiklik yapmadan) çıkarılması şeklinde tanımlanır. Şekil 2.10 (b)’de ortadan kaldırılmış rib ile meydana gelen genel görüntü yer almaktadır [28].



Şekil 2.10 : (a) Yapısı bozulmamış pozitif Poisson oranlı geometrik model, (b) bozulmamış yapıdan rib eksilterek elde edilen Kayıp rib geometrik modeli [28]

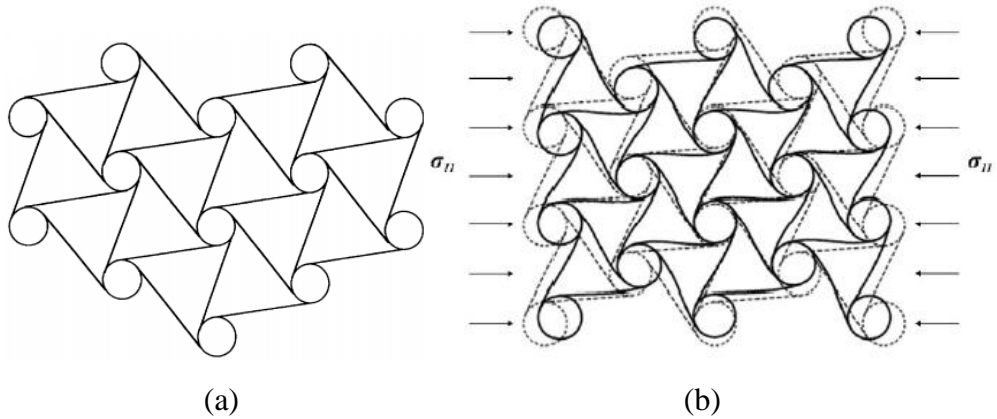
Auxetic kayıp rib modelinin çekme kuvveti altında deformasyona uğramış hali Şekil 2.11’de yer almaktadır.



Şekil 2.11 : Kayıp rib geometrik modelin deformasyona uğramış görünümü [29]

Chiral yapılar

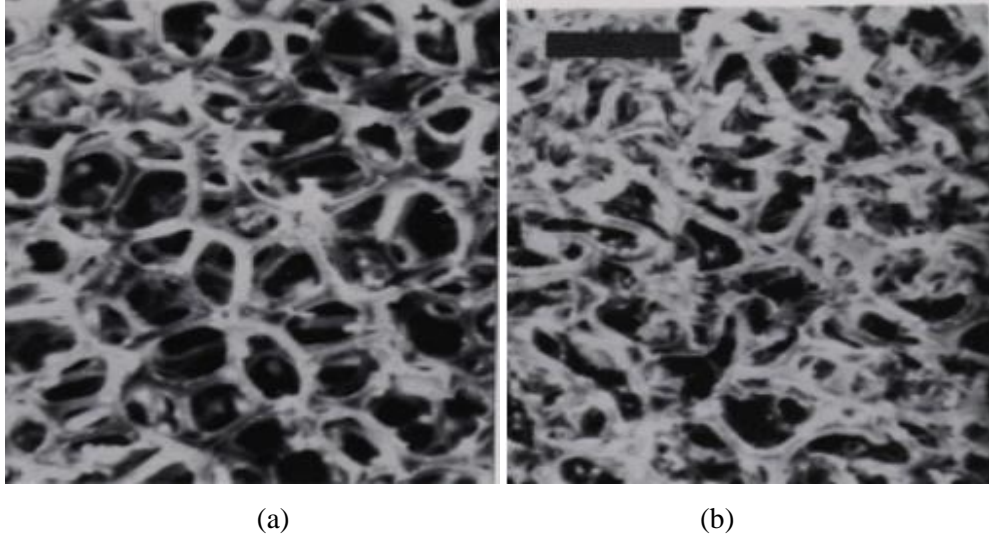
Bu model, Şekil 2.12’ de görüldüğü gibi bir rijit halka etrafına 6 adet kirişin teğet olarak yerleştirilmesi ve bu yapının tekrarıyla oluşan bir modeldir. Prall ve Lakes tarafından 2 boyutlu olarak teorik ve deneysel araştırmalar ile incelenmiştir. Halkalar çekme kuvveti altında saatin ilerleyiş yönünde kirişlerin açılmasıyla hareket eder. Dolayısıyla, halka dönüşü tüm şebekeyi büyütür ve böylece bir düzlem-içi (in-plane) auxetic özelliğe yol açar [30].



Şekil 2.12 : (a) 6 kirişten oluşan auxetic chiral yapı, (b) basma kuvveti altında chiral yapının auxetic davranışından dolayı daralarak küçülmesi [30-31]

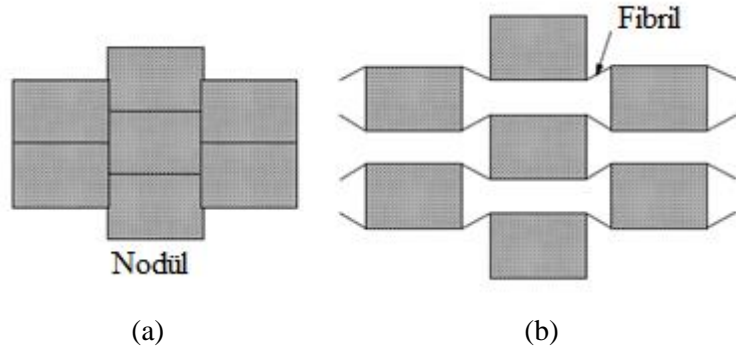
2.2.2.3 Auxetic polimer malzemeler

Re-entrant yapılar ilk olarak poliüretan (PU) köpük ile yaptığı çalışmada 1987’de Lakes tarafından üretilmiştir. Şekil 2.13 (a)’da görüldüğü gibi, 0.4 Poisson oranına sahip konvansiyonel polimer hücrelerin basınç altında tutulmasıyla ve daha sonra ısıtma işlemi uygulanmasıyla, Şekil 2.13 (b)’de görülen -0.7’lik Poisson oranına sahip bir malzeme ortaya çıkar [9].



Şekil 2.13 : (a) Konvansiyonel polimer köpük, (b) re-entrant polimer köpük yapılar [9]

Şekil 2.14'teki nodül-fibril yapısı ile politetraflorür (PTFE)'ün de auxetic davranışta bulunduğu gözlemiştir ve Caddock ve Evans bu yapının-12 Poisson Oranı sahip olduğunu göstermişlerdir [32]. Sonrasında Evans ve Alderson nodül-fibril mikro yapısına benzeyen ultra-yüksek molekül ağırlıklı polietilene (UHMWPE) geliştirdiler. Konvansiyonel polietilene (UHMWPE) kompaktlama ve sonrasında yapılan sinterleme işlemiyle auxetic davranış kazandırarak daha yüksek değerdeki bir Poisson Oranı (-19) elde edilmiştir [33].

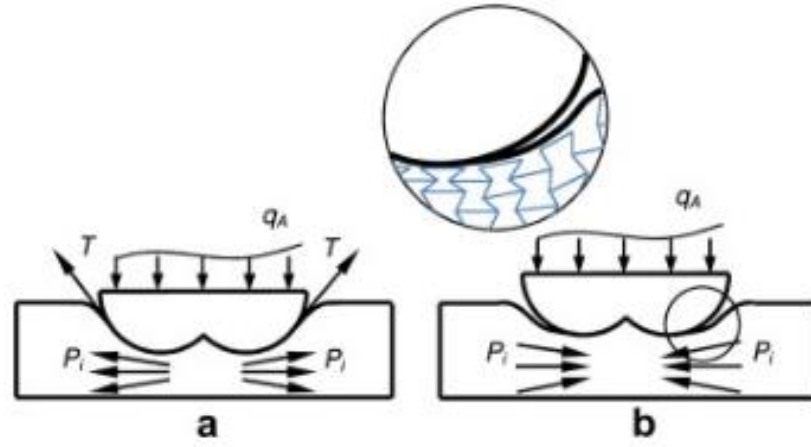


Şekil 2.14 : Auxetic polimerlerin şematik gösterimi (a) deformasyon öncesi, (b) deformasyon sonrası [32]

2.3 Auxetic Malzemelerin Mekanik Özellikleri

2.3.1 İndentasyon direnci

Auxetic olmayan yapılar darbe yüklemesine (impact loading) maruz kaldığında, basınç dağılımı darbeye dik yönde dışa doğru yönelecek şekilde ortaya çıkar. Şekil 2.15'te görülen auxetic yapılarda ise bu durum tam tersine basıncın içe doğru yönelmesine sebep olur. Ofis ve mobilya koltukları üzerinde indentasyon yani darbe emilim özelliğinden faydalanarak daha konforlu bir yapının mümkün olacağı gösterilmiştir [34].



Şekil 2.15 : a) Auxetic olmayan, b) Auxetic koltuklar [34]

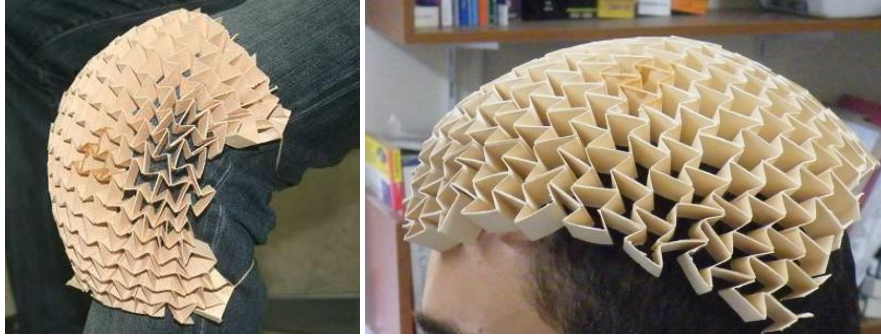
2.3.2 Sinklastik Davranış

Sinklastik davranış, Şekil 2.16 (a)'da gösterildiği gibi, auxetic malzemenin düzlem dışı eğilme momenti (out-of-plane) sayesinde eğilme yönüne doğru yön alarak kubbe şeklini (dome-shape) alması olarak tanımlanır. Şekil 2.16'(b) de yer aldığı haliyle bu durum auxetic olmayan malzemelerde antiklastik olarak adlandırılır.



Şekil 2.16 : (a) Antiklastik davranış, (b) sinklastik davranış [35]

Ortopedik uygulamalar için faydalı bir özellik olan bu davranış şekil 2.17’ de gösterildiği gibi bacak ve kollardaki eklem bölgesinin ve başın korunması için destek görevi görecek daha hafif koruyucu aparatların üretilmesinde olanak sağlar.



Şekil 2.17 : Sinklastik davranışlı auxetic yapıların kask ve dizlik uygulamaları [36]

2.3.3 Kırılma tokluğu

Kırılma tokluğu malzemenin bir özelliği olup çatlak hasarına karşı direncini ifade eder. Bir malzemenin kırılma tokluğu sıcaklık ile ilişkilidir, ayrıca stres değişimi ve çatlak uzunluğu kırılma tokluğunu etkiler [37]. Auxetic yapılar düşük çatlak ilerlemesine sahiptirler ve konvansiyonel malzemelere oranla çatlakın ilerlemesi için daha fazla enerji uygulamak gerekir [38-39]. Choi ve Lakes yaptıkları deneysel çalışmalarda daha yüksek hacimsel sıkıştırma değerleri için, auxetic re-entrant hücreli köpüklerin Poisson Oranı negatifleştikçe daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğunu ortaya koymuştur [40].

Bu durum aslında auxetic malzemelerin temel özelliğiyle tanımlanabilir. Bir çatlak oluştuğunda, hücrenin genişlemesi onu kapatma eğiliminde olmasına sebep olur.

2.3.4 Kayma direnci

Hooke kanununa göre kayma modülü (G) ile Poisson Oranı (ν) arasında bir ilişki tanımlıdır. Aşağıda denklem 2.1 ve 2.2’de de görüldüğü gibi (K =bulk modülü) Poisson Oranının -1 e doğru düşmesiyle kayma direnci bir hayli artmaktadır. Başka bir deyişle malzeme zor kayma gösterir ama bunun yanında hacimsel olarak kolay deforme olur [41].

$$G = \frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \quad (2.1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2)$$

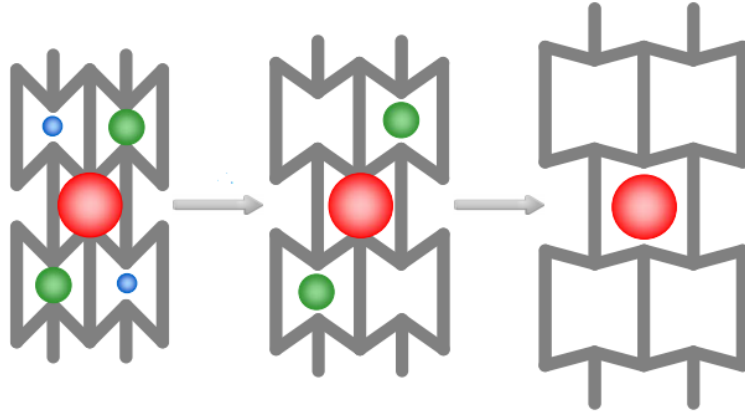
2.3.5 Ses emilimi

Gözenekli yapıdaki malzemeler, ortamda yayılım gösteren ses dalgalarını dağıtma yeteneklerinden dolayı, titreşim ve ses kontrolü istenen ortamlar için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Test edilen bütün auxetic köpükler için ortak özellik, konvansiyonel köpüğe kıyasla, daha düşük frekanslarda ses emiliminde önemli artışlar meydana gelmiştir [42-44].

2.3.6 Geçirgenlik

Negatif Poisson oranı olan gözenekli bir malzemeyi, uygulanan bir yükü veya basınç değişimi ile tane boyutunu değiştirerek filtrasyon ve geçirgenlik alanlarında karşılaşılan problemlere olası çözümler sunabilmektedir [45]. Şekil 2.18’de de görüldüğü gibi geçirgenliği arttırmak için hücrelerin deformasyonunu arttırmak gereklidir.



Şekil 2.18 : Geçirgenliğin deformasyonla değişimi [36]

Filtreleme özellikleri nedeniyle, ortamdaki istenmeyen partiküllerin geçişini engellemek için ağız maskelerinde kullanımı mümkündür [46-47].

3. MEKANİK TESTLER

Mekanik testler, folyo yapıdaki çok ince kalınlıktaki konvansiyonel numuneler ile aynı kalınlıktaki auxetic yapılı numuneler arasındaki mekanik farkları ortaya koymak ve gerinme-gerilme grafikleri sonuçları ile beraber değerlendirmek için yapılmıştır. Karşılaştırma yapılırken auxetic yapılı numuneler arasındaki farklı hücre boyutlarının sonuçlara ne yönde etkiğine de değerlendirilmiştir.

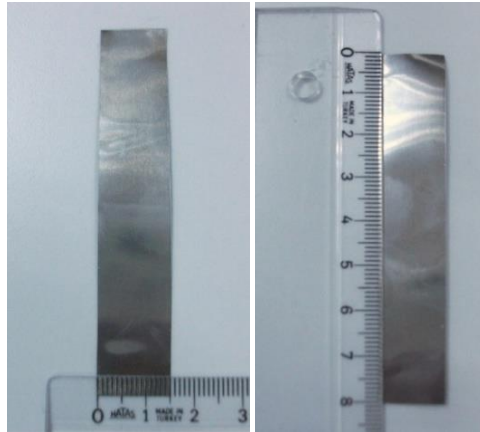
3.1 Malzeme

Bu çalışmada, korozyon direnci, form verilebilirliği ve mekanik özelliklerinin yüksek olması nedeniyle biyomedikal uygulamalarda stent ve implant olarak sıkça kullanılan 316L paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Kimyasal bileşenleri C %0.03, Fe (Balance), Cr %18, Ni %10, Mo %3 oranlarındaki elementlerinden oluşmuş olup, Goodfellow Limited tarafından Almanya'dan temin edilmiştir.

3.2 Konvansiyonel Numuneler

3.2.1 Numunelerin teste hazırlanması

Konvansiyonel numuneler için çekme testinin doğru ve geçerli olabilmesi için yapılan standart araştırmasında çok ince malzemelerin testleri için özel bir standart olmadığı görülmüştür. Bu yüzden testler metalik malzemelerin normal ortam sıcaklığında gerçekleştirilmesi için hazırlanmış ISO 6892-1: 2009 [48] standardı referans alınarak yapılmıştır. 0.025 mm kalınlığında, yüksekliği ve genişliği 90x90 mm olan 316L paslanmaz çelik folyo levhasından, 3 adet 15x80 mm ölçülerinde dikdörtgen numuneler makas ile Şekil 3.1'de görüldüğü gibi kesilmiştir.



Şekil 3.1 : Konvansiyonel numune boyutları

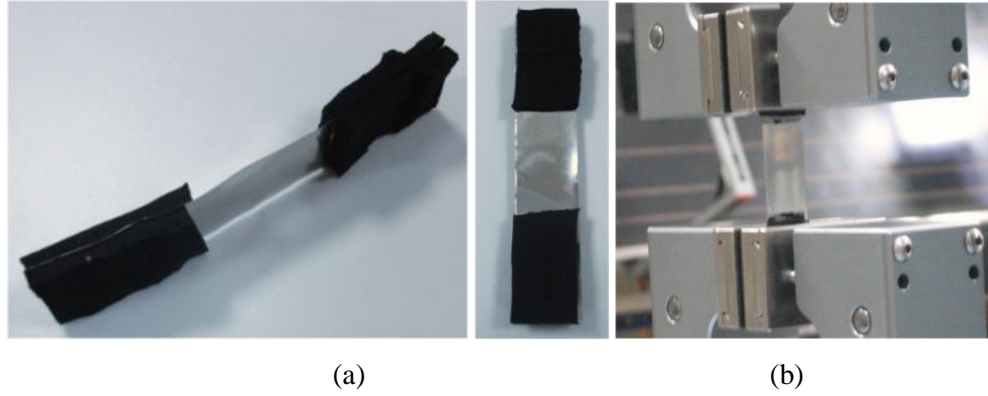
Çekme testleri, Bursa Teknik Üniversitesi mekanik laboratuvarında bulunan TRAPEZIUMX Türkçe bilgisayar yazılımına sahip Şekil 3.2'de yer alan SHIMADZU AGS-X 1 kN' luk tek eksenli çekme cihazıyla gerçekleştirilmiş, çekme hızı için ise aynı standardı kullanan farklı makalelerden referans alınarak 3 mm/dk olarak belirlenmiştir [49-50]. Cihaz geniş test hızı aralığına sahip olduğundan referans aldığımız ISO 6892:2009 standardına uygun olarak test yapabilme imkânı sağlamaktadır.



Şekil 3.2 : SHIMADZU Test Cihazı

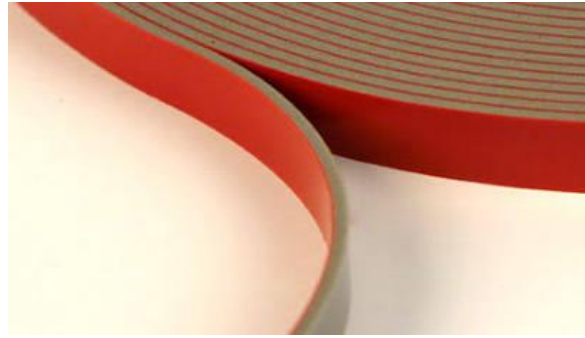
Çekme testi için numuneye uygun ve zarar vermeyecek şekilde çekme cihazına ait olan başlıklar arasından kauçuk yüzeyli başlıklar seçildi. Fakat numuneler çok ince olduğundan, test sırasında başlıklar arasından kayma başladı ve test grafiğine doğru veriler yansımadi. Belirli bir süreç, numunelerin başlıklar arasından kaymasını nasıl engelleneceği konusuna ayrıldı. Aşağıda bu süreçte yapılan olumlu ve olumsuz sonuçlu denemeler sırasıyla yer almaktadır:

- Çift taraflı bant yardımıyla karton kâğıtlar arasına yapıştırılan numuneler ile yapılan denemelerde gripler arasındaki kayma engellenemedi.
- Uhu 404 yardımıyla numunelerin her iki uç kısmına karton kağıt yapıştırarak 2 gün bekleyip kurumasıyla deneyler tekrar edildi. Sonuç başarısız oldu ve başlıklar arasında kayma devam etti.
- Kauçuk grip yüzeyleriyle sürtünmeyi arttıracaklarını düşündüğümüz Şekil 3.3'teki lateks sünger malzemeler yardımıyla çift taraflı bant ile numunemizi yapıştırıp testleri tekrarlığımızda sonuç aynı bile olsa kayma diğer iki denemeye oranla daha yüksek kuvvet değerinde gerçekleşmiştir.



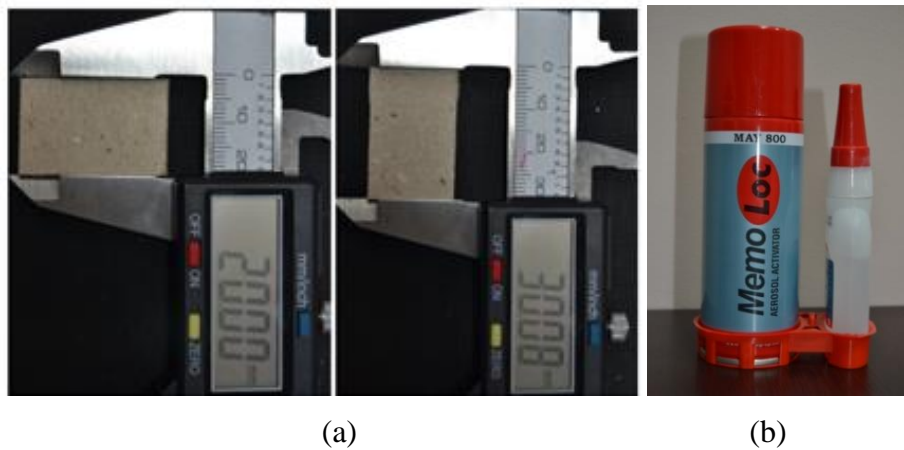
Şekil 3.3 : (a) Lateks Sünger ile bantlanan numune ve (b) çekme sırasında yaşanan kayma

- Olumsuz sonuçların devam etmesi üzerine kauçuk yüzeyi metal yüzeye yapıştıran şekil 3.4'teki gibi numune bantlarla yapıştırma işlemi için gerekli olan sıcaklık ve basınç proseslerinden dolayı sonuç değişmemiştir.



Şekil 3.4 : Metal ve kaçuk yüzeyleri birleştirme bantları

- Sonuç olarak 25x30 mm boyutlarında kestiğimiz mukavva kartonlar arasına yüksek yapışma hızına ve gücüne sahip olan Şekil 3.5'te görülen Memo Loc marka yapıştırıcı ile olumlu sonuç alınarak kayma problemi çözülmüştür.

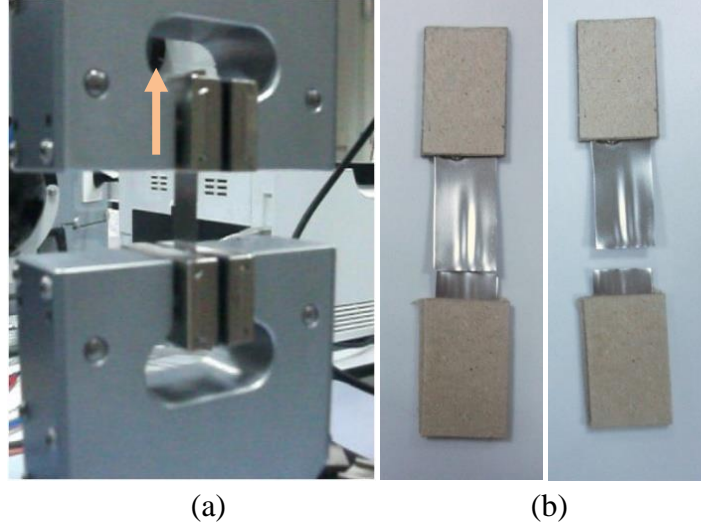


Şekil 3.5 : a) Mukavva karton ölçüleri, b) Memo Loc marka yapıştırıcı

3.2.2 Konvansiyonel malzeme çekme testleri

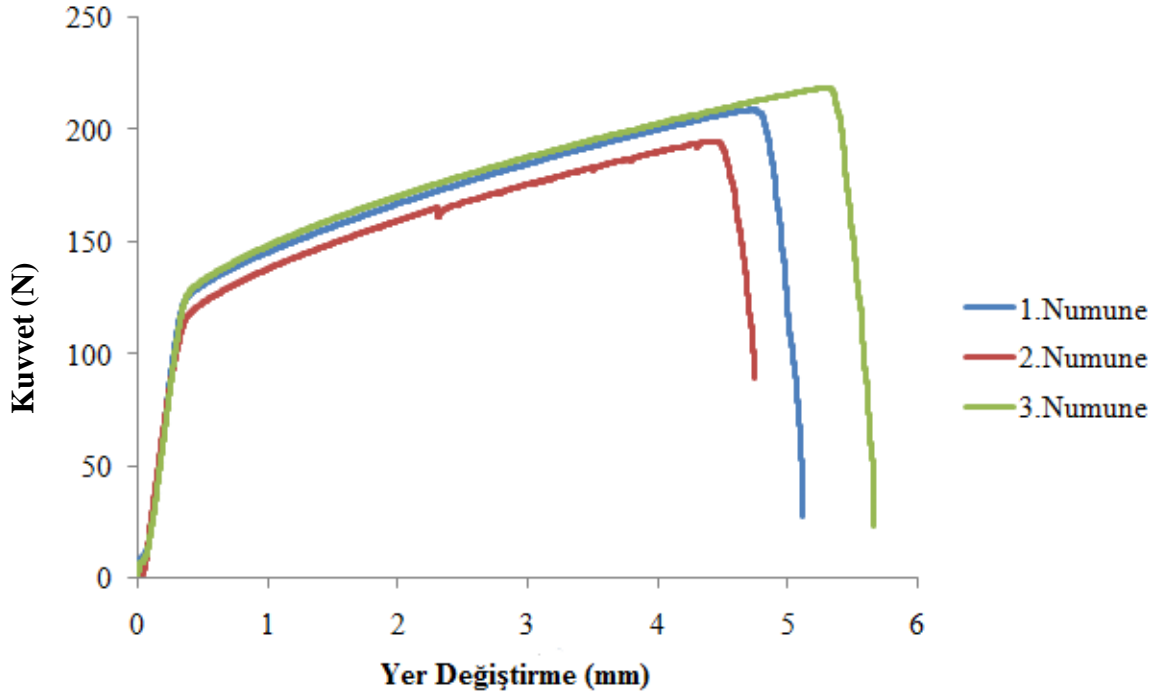
Kayma probleminin çözümü sonrasında, numuneler Şekil 3.6'da görüldüğü gibi başlıklar arası mesafe 30 mm olacak şekilde test cihazına yerleştirilerek çekme testi gerçekleştirildi.

Çekme testlerinde boydaki uzamanın ölçülmesi için ekstansometre önerilir. Fakat boydaki uzama için bu test çalışmasında başlıklar arasındaki mesafe değişimi göz önüne alınmıştır. Çünkü numuneler çok ince olduğundan klipsli ekstansometre numuneye temas halinde olacağından zarar verecektir. Aynı şekilde video ekstansometre ile görüş açısı yetmeyeceğinden dolayı, numunenin başlıklar arasında kalan uzunluğu ölçülemeyecektir.



Şekil 3.6 : a) Numunelerin çekilme yönü (b) Çekme testi sonrası numunenin kopmuş hali

Testler sonunda 0.025 mm kalınlığındaki 3 ayrı numuneye uygulanan kuvvet doğrultusundaki uzama miktarını veren kuvvet-yer değişim grafikleri Şekil 3.7'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Çizelge 3.1'de ise maksimum kuvvet ve maksimum uzama değerleri verilmiştir.



Şekil 3.7 : 3 numuneye ait kuvvet (N)-yer değiştirme (mm) grafiği

Çizelge 3.1 : Konvansiyonel numunelerin max kuvvet-şekil değişim sonuçları.

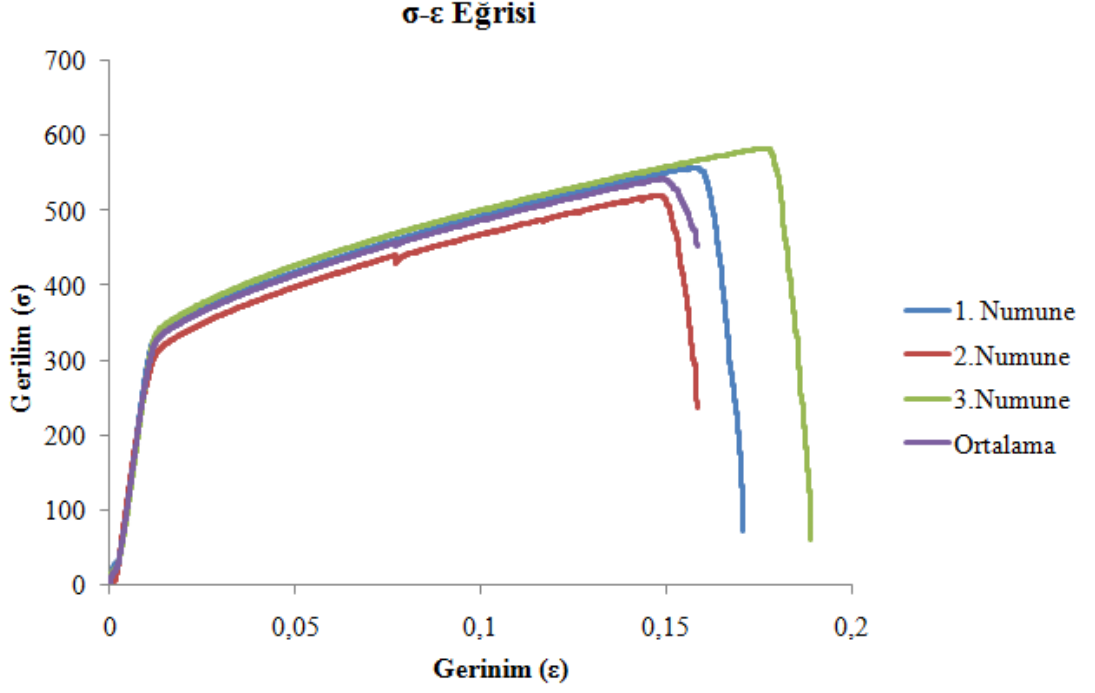
	Maks. Kuvvet (N)	Maks. Yerdeğiştirme (mm)
1. Numune	208,4746	5,123734
2. Numune	194,2207	4,7487
3. Numune	218,4974	5,670867

Kuvvet-şekil değişimi grafiklerindeki numune boyutlarının etkisini ortadan kaldırmak için gerinim-gerilme eğrileri (mühendislik eğrisi) elde edilmiştir. Denklem 3.1 ve 3.2'de ifade edildiği gibi kuvveti (F) ilk kesit alanına (A_0) bölerek gerilimi (σ), boydaki değişme farkını (ΔL) ilk boya (L_0) bölerek de gerinim değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma = F / A_0 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (3.2)$$

Test cihazının verdiği "csv" formatındaki veriler, Excel dosyasında düzenlenerek gerilim-gerinim grafikleri Şekil 3.8'deki gibi oluşturulmuştur.

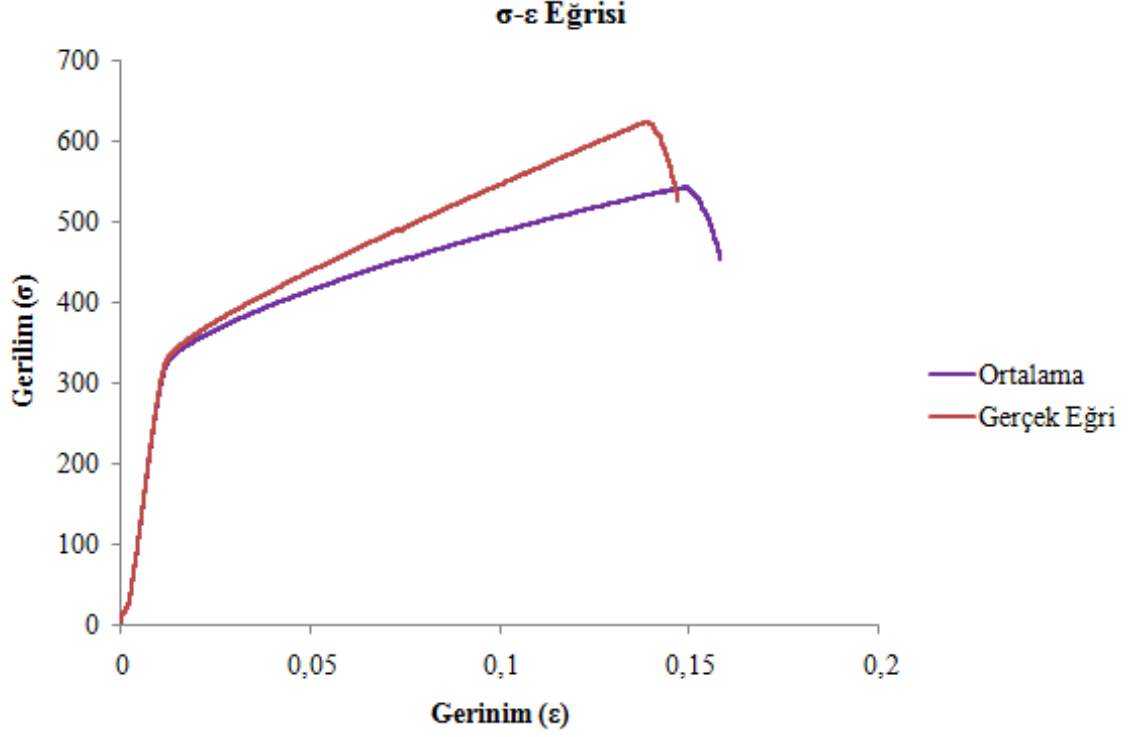


Şekil 3.8 : Her bir numuneye ait gerilim-gerinim grafikleri ve ortalama gerilim-gerinim grafiği

Mühendislik gerilim-gerinme eğrisi hesaplanırken, numunenin ilk andaki kesit alanı formüle aktarılır ve test boyunca aynı kesit alanı üzerinden hesaplama yapılır. Fakat gerçek durumda çekme kuvveti altındaki kesitte anlık daralmalar oluşur ve bu bölgede stres değeri sürekli artar. Bu yüzden gerçek gerilim-gerinme eğrisi lineer olmayan çözümler için gerekli olan bir grafikdir ve denklem 3.3 ve 3.4'e göre hesaplamalar yapılarak Şekil 3.19' a aktarılmıştır.

$$\sigma_T = \sigma \times (1 + \epsilon) \quad (3.3)$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon) \quad (3.4)$$



Şekil 3.9 : Mühendislik ve gerçek gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması

Mekanik testlerin gerçekleştirildiği konvansiyonel malzemelerin mekanik özellikleri, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan [51] simülasyon ile doğrulanmıştır.

Çizelge 3.2 : Konvansiyonel numunelerin mühendislik eğrisi sonuçları.

	Değerler
Elastisite Modülü (E)	25 GPa
Poisson Oranı (ν)	0,33
Yoğunluk (ρ)	7800 kg/m³
Akma Değeri	420 MPa

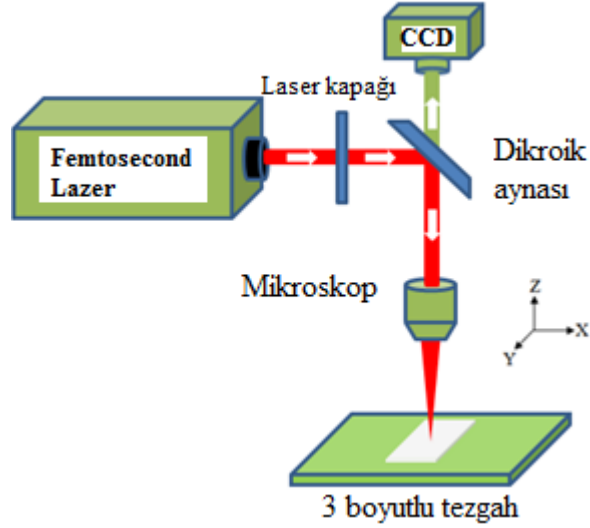
316L paslanmaz çeliğin elastisite modülü 25 GPa olup, dog-bone ve dumbell şekilli numunelerle ölçülen çeliğin bilinen değerinden (210 GPa) farklı olmuştur. Bu durumun, kullanılan numunelerin çok ince sacdan üretilmiş ve dikdörtgen biçiminde olmasına bağlı olduğu görülmüştür [52-53].

3.3 Auxetic Malzeme Testleri

3.3.1 Auxetic numunelerin hazırlanması

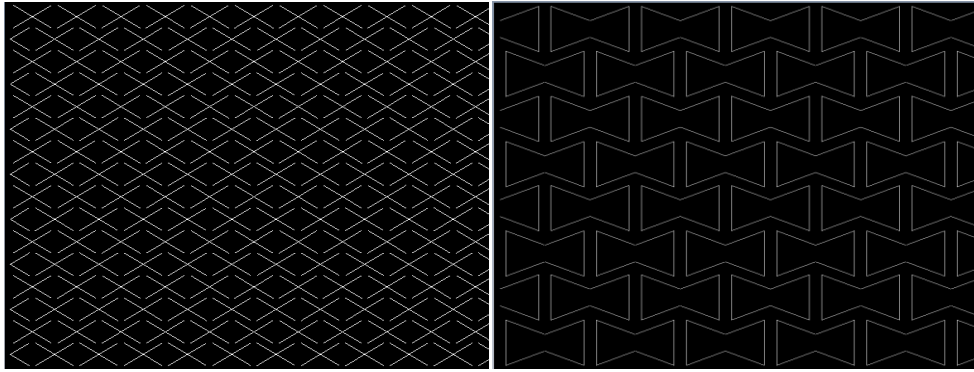
Auxetic numuneler Kanada da yer alan Victoria Üniversitesinde femtosecond lazer kesim yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Femtosecond lazerin dalga boyu 800 nm,

darbe süresi 120 fs ve tekrarlama frekansı 1000 Hz olup, 20× objektif lensler ile gözlenmiştir. Lazer kesim hızı daha düzgün yüzeyler elde edilebilmesi için 0.5 mm/s olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.10'da femtosecond lazer kesim şematığı gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Femtosecond lazer kesim şematik gösterimi

Femtosecond ile üretilen re-entrant kelebek modelinin şematik gösterimi Şekil 3.11'de yer almaktadır.



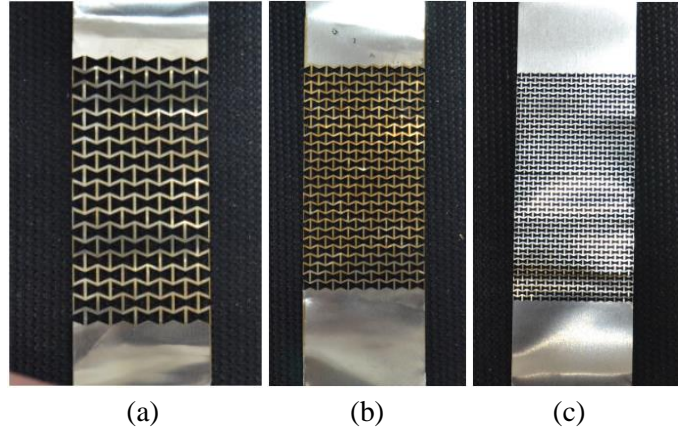
(a)

(b)

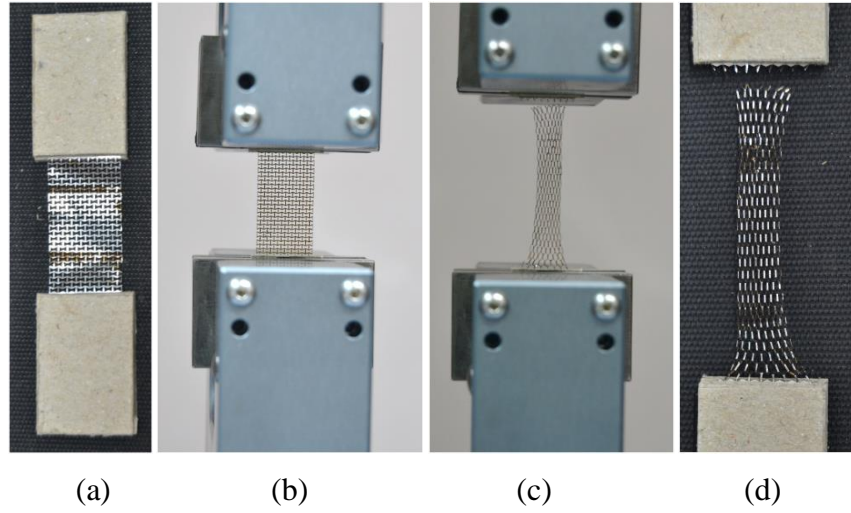
Şekil 3.11 : a) Deneyde kullanılan kurulum, b) Lazer kesimle oluşan geometri

3.3.2 Auxetic Numuneler için Çekme Test Uygulaması

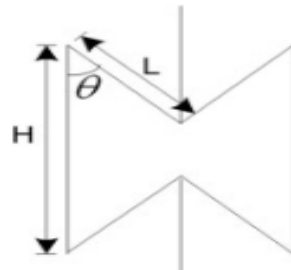
Konvansiyonel numuneler ile aynı kalınlıkta (0.025 mm), re-entart kelebek motifliyle auxetic hale getirilmiş numuneler Şekil 3.12'te görüldüğü gibi %40 büyütülmüş, orijinal ve %40 küçültülmüş olan hücresel boyutlar ile her birinden 3'er adet olmak üzere 9 adet numune ile çekme testi tekrarlanmıştır. Şekil 3.13'te numunelerin cihaza yerleştirilmiş ve çekme testi sırasındaki halleri verilmiştir.



Şekil 3.12 : a) %40 Büyütülmüş, b) Orijinal büyüklük, (c) %40 Küçültülmüş boyutlardaki re-entrant motifli auxetic numuneler



Şekil 3.13 : a) Numunenin hazırlanmış, b) çekme cihazında yerleştirilmiş, c) ve d) testin tamamlandığındaki halleri



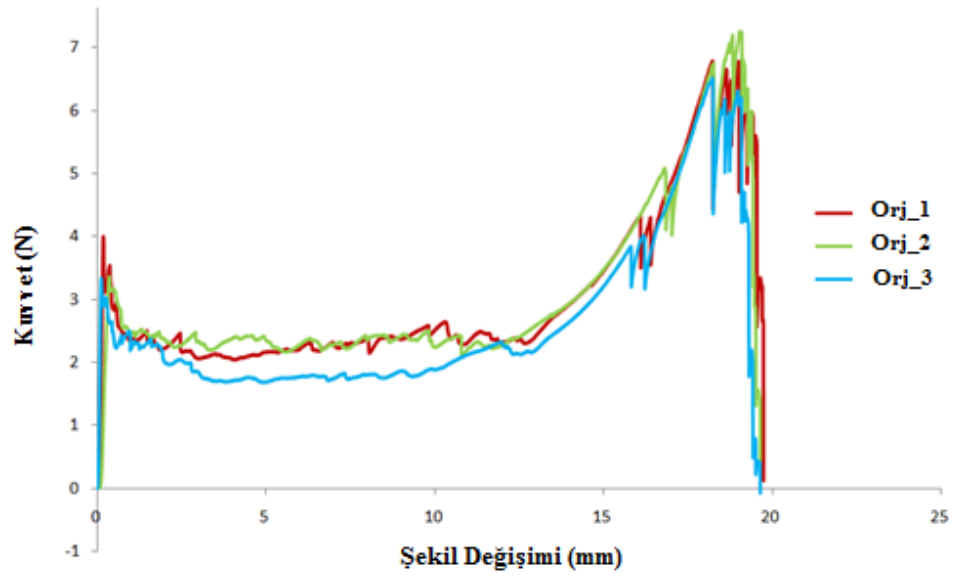
Şekil 3.14 : Hücre boyutlarının şematik gösterimi

Numunelere ait hücre boyutlarının şematik gösterimi Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Her bir hücreye ait ölçümler Çizelge 3.3'te yer almaktadır.

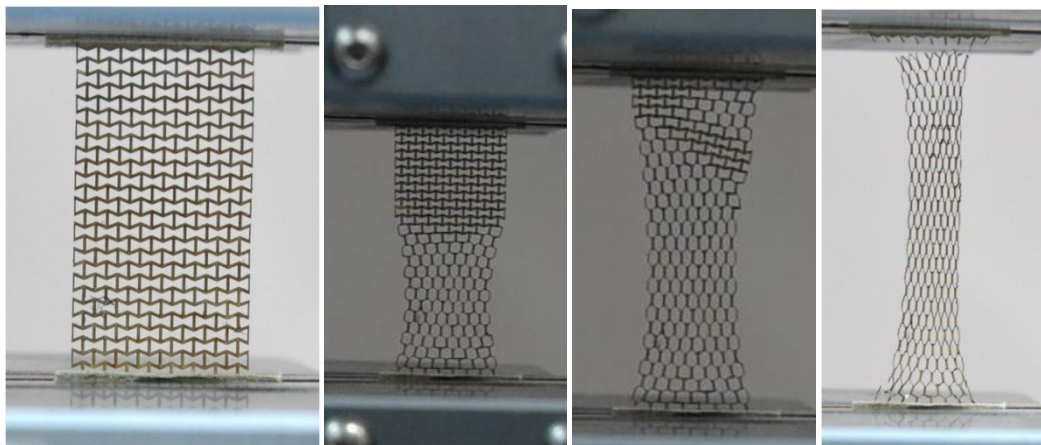
Çizelge 3.3 : Numunelere ait hücre boyut ölçüleri.

	H	L	θ
Orijinal Boyut	1.15	0.88	66.35°
+%40	1.61	1.281	66.35°
-%40	0.69	0.56	66.35°

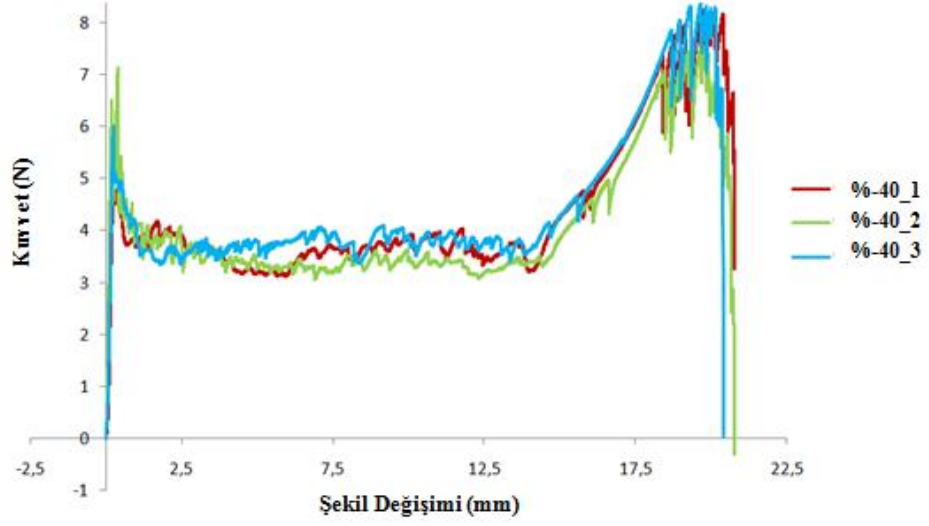
Çekme testi sonunda elde edilmiş Kuvvet-Şekil Değişim grafikleri ve numunelerin çekme testi sırasında aldığı görünümler her bir hücre boyutu için Şekil 3.15-3.16-3.17-3.18-3.19-3.20'de verilmiştir.



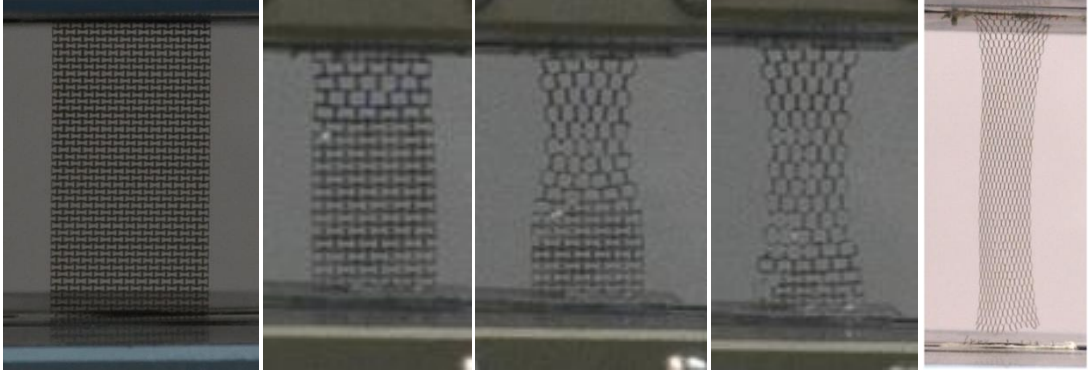
Şekil 3.15: 0.025 mm kalınlığında olan orijinal hücre boyutundaki 3 numuneye ait kuvvet-şekil değişimi grafiği



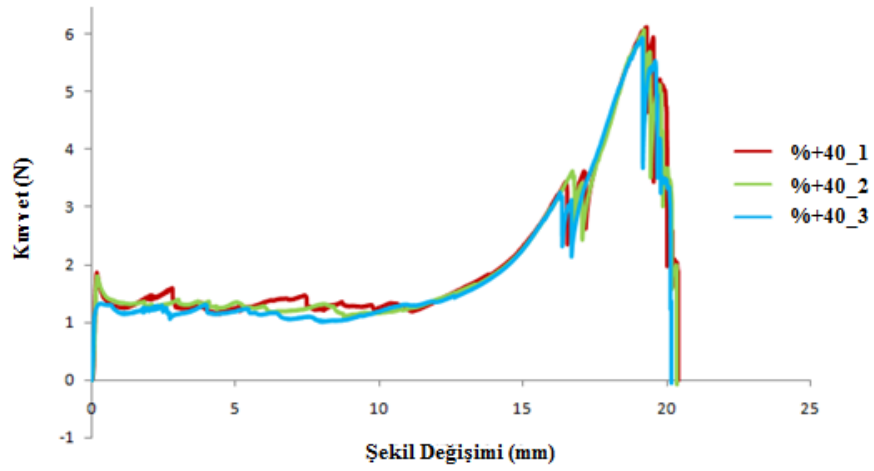
Şekil 3.16: Orijinal hücre boyutlu numunelerin test süresince aldığı görünümler



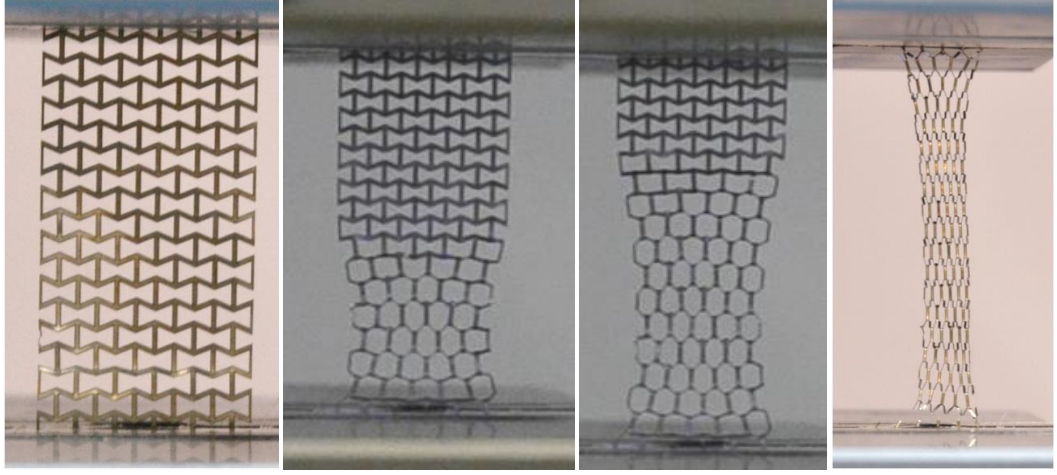
Şekil 3.17 : %40 küçültülmüş hücre boyutundaki 3 numuneye ait kuvvet-şekil değişim grafiği



Şekil 3.18 : %40 küçültülmüş hücre boyutlu numunelerin test süresince aldığı görünümler

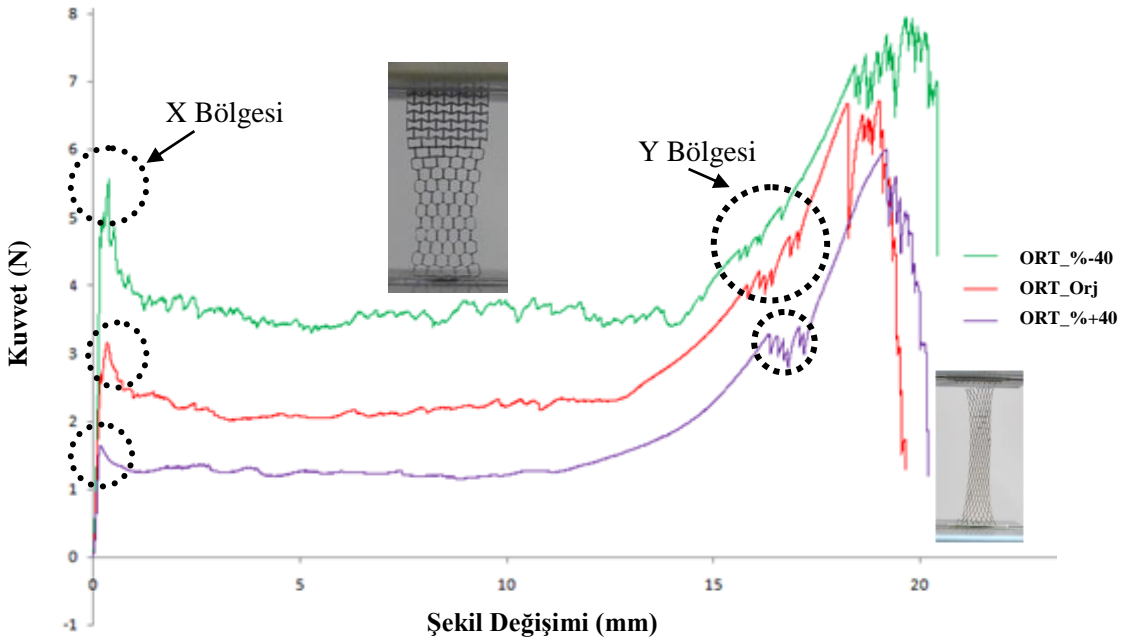


Şekil 3.19 : %40 büyütülmüş hücre boyutundaki 3 numuneye ait kuvvet-şekil değişim grafiği



Şekil 3.20 : %40 büyütülmüş hücre boyutlu numunelerin test süresince aldığı görünümler

Auxetic numunelere ait kuvvet şekil değişimi grafikleri her bir hücre boyutuna göre ortalaması alınarak hazırlanmıştır. Şekil 3.21'de ki grafik üzerinden farklar daha net görülmektedir.



Şekil 3.21 : Auxetic numunelerin ortalama kuvvet-şekil değişim grafikleri

Kuvvet-şekil değişim grafiğinde çok fazla deformasyon ve kesit alanı değişimi olduğundan, gerilme-gerinim dönüşümüne gerek görülmemiştir.

Görülmektedir ki konvansiyonel numunelere kıyasla auxetic numuneler daha düşük kuvvetler altında deforme olurlar. Bunun yanında auxeticlerin uzama miktarı, konvansiyonel malzemelere kıyasla yaklaşık 4 kat fazladır.

X noktası, testlerde auxeticliğin kaybolduğu noktayı temsil etmektedir. Hücre boyutu küçüldükçe auxeticliğin kaybolduğu yük değerinin arttığı görülmektedir. Y noktası, ilk olarak riblerin kopmaya başladığı noktayı temsil etmektedir. X-Y bölgesi arasında kalan bölgede re-entrant modeli deforme olup, hücrelerde açılmalar meydana gelir ve NPR özelliğini kaybederek Pozitif Poisson Oranlı petek formuna dönüşür. Y bölgesinde yukarıda belirtildiği gibi, hücrelerde kopmalar yaşanarak kuvvet düşümleri yaşandığı görülse de, test tamamlanana kadar sertleşme devam etmektedir.

0.025 mm ve 0.05 mm kalınlıklarının karşılaştırılması yapılan çalışmada [54], rib boyları küçültülen 0.05 mm olan auxetic numunelerde 0.025'e göre, yapının bükülmeye eğilimi azaldığından daha uzun süreli auxetic davranış gözlenmiştir.

4. AUXETİK YAPILARDA SİNKLASTİK DAVRANIŞIN SONLU FARKLAR YÖNTEMİYLE GÖSTERİMİ

Bu bölümde, 2.3.1 kısmında bahsedilen sinklastik davranışın merkezi fark zaman integrasyon yöntemiyle (CTDI) yani eksplisit çözüm ile görsel olarak sunulması amaçlanmış, analiz sonucunda nasıl şekil alacağı gözlenmiştir. Analiz için ANSYS 15.0 programı kullanılmıştır.

4.1 Eksplisit Analiz

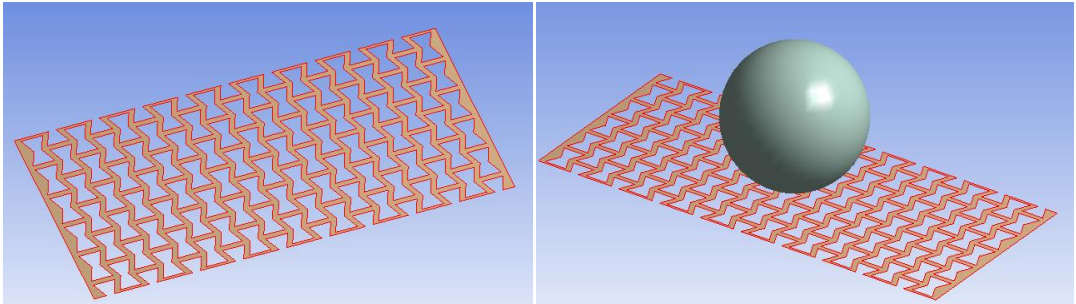
Explicit analizde en temel avantaj, lineer olmayan yapılar için kısa zaman aralıklarında oluşan yüksek deformasyonların görülebilmesidir. Bu yüzden, eksplisit yöntem patlama, düşme, çarpışma gibi durumlar için daha doğru bir alt yapı sunar.

4.2 Analizin Uygulama Adımları

4.2.1 Modelleme

%40 büyütülmüş hücre boyutuna sahip olan auxetic numune ve 10 mm çapındaki rijit küre Solidworks tasarım programında çizilmiştir (Şekil 4.1).

Küre, auxetic malzeme üzerine çevresini düzgünce sarabilmesini gözlemleyebilmek için, noktasal temas edecek şekilde tam orta kısma yerleştirilmiştir.

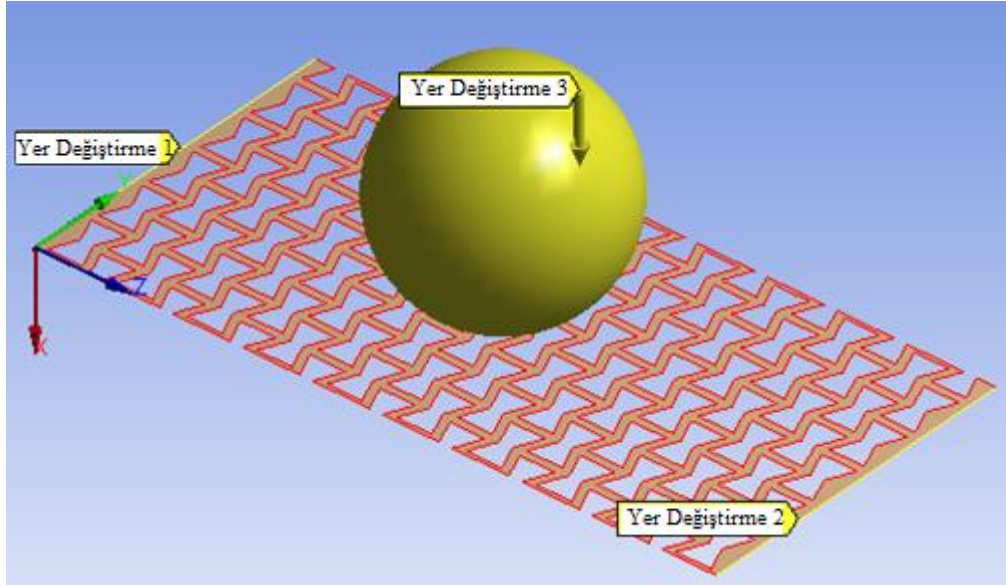


Şekil 4.1 : Analiz numunesi

4.2.2 Sınır şartları

Sınır şartlarını belirlemeden önce, gerçek durumlu bir ortam yaratmak için iki cisim arasına sürtünme kuvveti tanımlanmalıdır. Bu analizde programa 0.2 değeri

girilmiştir. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi auxetic numunenin iki ucundan X,Y,Z yönlerinde sabitlenmiş, küreye ise X ekseninde 5 mm’lik yer değiştirme değeri tanımlayarak, oluşan deformasyon gözlenmiştir.



Şekil 4.2 : Sınır şartları ve yer değiştirmenin tanımlanması

4.2.3 Malzeme modeli

Konvansiyonel numunelere ait çekme testleri sonuçlarından alınan Young modülü, Poisson Oranı ve yoğunluk değerleri program içerisine aktarılmıştır. Plastik deformasyon, analiz içine dahil edilip gerçekçi bir sonuç yakalanmak istenmiş ve “Bilinear isotropic hardening” plastisite modeli kullanılmıştır. Bu model ile birlikte gerçek gerilim-gerinme eğrisinden elde ettiğimiz akma dayanımı ve tanjant modülü için kopma dayanımı değerleri devreye girmiştir. Çizelge 4.1’de değerler yer almaktadır.

Tanjant modülünü hesaplamak için akma, kopma değerleri ve numunenin uzama miktarı gereklidir. Değerler, denklem 4.2’de yerine konularak, tanjant modülü hesaplanmıştır ve program analiz sonuçlanana kadar elde edilen eğim değerini referans alarak devam etmiştir.

$$TanjantModülü = \frac{\sigma_K - \sigma_A}{\epsilon_K - \epsilon_A} \quad (4.2)$$

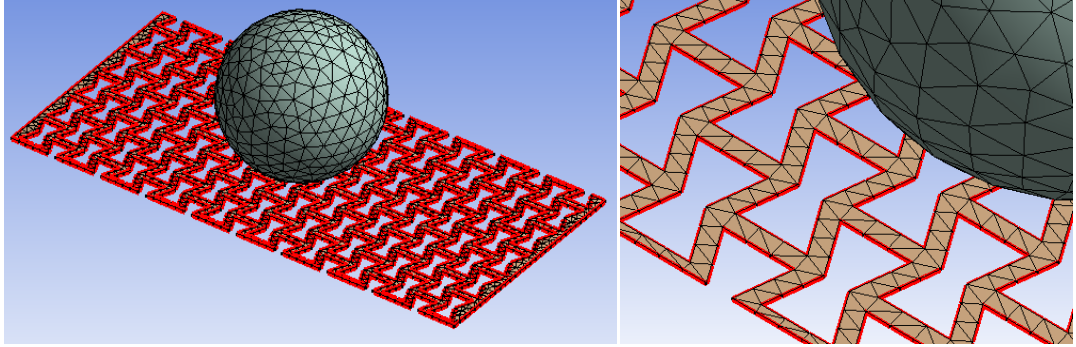
Çizelge 4.1 : Malzeme parametreleri.

Tanjant Modülü	1694,166 N/mm ³
σ_K	657,5176 N/mm ²
σ_A	436,5 N/mm ²
ε_K	0,146958 mm
ε_A	0,0165 mm

4.2.4 Modelin ağ ile örülmesi (Mesh)

Analizin hassasiyetinin gerektirdiği ölçülere göre ağ modelini oluşturmak önemlidir. Kullanılan ağ modelin çeşidi veya geometri üzerinde yer alan toplamdaki düğüm ve eleman sayıları sonucun doğruluğunda etkili olan faktörlerdir.

Analizde, re-entrant yapılı auxetic numunede de görüldüğü gibi karmaşık geometriler için daha kolay sonuç sağlayan üçgen ağ modeli uygulanmıştır (Şekil 4.3). Oluşan ağ modeliyle birlikte toplamda düğüm sayısı 2892, eleman sayısı ise 6068 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3 : Üçgen ağ modeli

4.2.5 Analizin kurulması

Bu bölüm, analizin çözülmeye başlanmadan önceki en önemli safhalardan biri olan analiz tipinin, bitiş süresinin ve diğer verilerin ayarlandığı bölümdür.

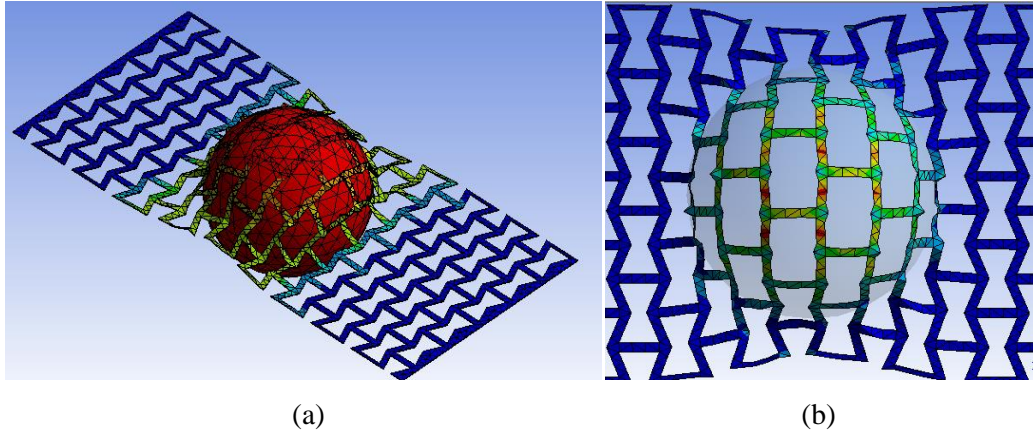
Her iterasyonun analiz süresi ne kadar uzun tutulursa sonuçlar o kadar doğru ve yer değiştirmeler görsel anlamda o kadar gerçekçi olacaktır. Fakat bu analiz çalışmasında amaç auxetic numuneye verilen yer değiştirme işlemiyle deformasyon mekanizmasının sağladığı sinklastik davranışının ne şekilde oluştuğunu görmek olduğundan, analizin bitiş zamanının 0.03 saniyeye ayarlamak yeterli olacaktır. Aynı

zamanda, dinamik etkiler ve titreşimle vibrasyona girme (damping) durumu ihmal edilmiştir.

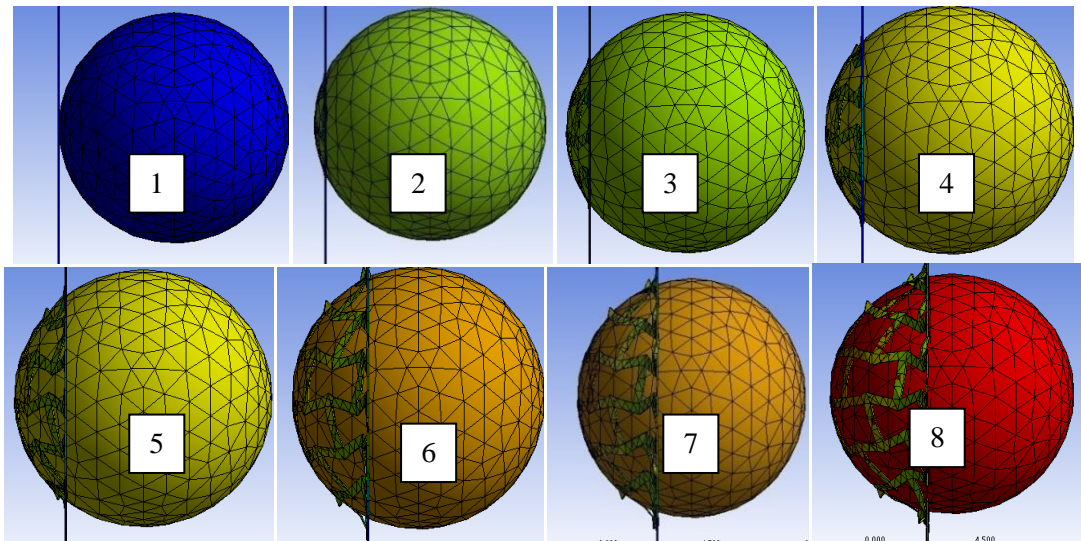
4.2.6 Analiz sonuçları

5 mm'lik yer değiştirmeye numune, re-entrant geometrinin deformasyon mekanizması sayesinde küreyi sarmış ve böylece sinklastik davranış göstermiştir. Böylece, re-entrant yapıların istenen sarma özelliğini sağladığı gösterilmiştir. Özellikle insan vücudu için ortopedik güvenlik ekipmanları; kasklar, diz, dirsek, kol ve bacak koruyucu uygulamalarına yönelik potansiyeli ortaya konmuştur.

Analiz sonuçlarına ait görseller aşağıdaki Şekil 4.4 ve 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : a) Auxetic numunenin küreyi sarma eğilimi, b) re-entrant hücrelerin deformasyonu



Şekil 4.5 : Kürenin yer değiştirmesinin sonucunda auxetic numunede ilerleyişi

Auxetic malzemeler, mekanik yüklemeler altında konvansiyonel malzemelere göre daha fazla hacimsel değişikliğe uğrarlar. Bu durum için en belirgin örnek simülasyon çalışmasıyla da görülen düzlem dışı eğilme altında oluşan sinklastik (dome-shape) davranıştır. Bu davranış biçimiyle sadece bulunduğu yüzeyi sarmaz, aynı zamanda enerji emme özelliği de gösterir [55].

Bahsedilen bu özelliklerinden dolayı, biyomedikal çalışma içerisinde ayak veya kol protezleri için astar malzemesi olarak önerilmiştir. Bu sayede daha iyi sıklık sağlayıp, ayarlanabilen hacimsel kontrol özelliği ile zaman içerisinde kol ve ayaktaki protezin uygulandığı bölgede oluşan hacimsel değişkenliğe cevap verebildiği belirtilmiştir. Ayrıca; yastıklama görevi ile yük ve vibrasyon iletimini azatlığı ve daha sportif şekilde kullanım sağlandığı belirtilmiştir [56].

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında konvansiyonel malzemelerin yeni özellikler katarak, nasıl akıllı sistemlere dönüştüğü, auxeticlerin de kazandığı bu geometrik özellikler sayesinde günümüzün ve geleceğimizin başta biyomedikal alan olmak üzere çok çeşitli alanlarda nasıl söz sahibi olmaya doğru gittiği ifade edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda re-entrant geometrik şeklinin çok ince auxetic malzemelerde nasıl etki edeceğini görmek için femtosecond laser kesim ile hazırlanmış %40 oranında büyültülmüş, orijinal ve % 40 küçük hücre boyutlarına sahip olan numuneleri çekme testine tabi tutarak, konvansiyonel malzemeler ile arasındaki mekanik farklar ortaya konmuştur.

Aynı zamanda, re-entrant auxetic yapıların sinklastik davranışı simülasyon çalışması ile gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçları şu şekilde yorumlayabiliriz:

- Kuvvet-Şekil değişim grafikleri incelendiğinde konvansiyonel numune auxetic numunelere göre daha fazla kuvvete dayanmaktadır. Aynı zamanda auxetic numunelerin sahip olduğu geometrik şekil, gözenekli bir yapı oluşturarak elastisite modülünü düşürmüştür. Fakat geometrik şeklin neden olduğu etkiden dolayı, auxeticlerin şekil değişimleri grafiklerden de görüldüğü gibi daha fazladır.
- Auxetic numunelerde hücre boyutunun küçülmesi ve kalınlığın artmasıyla, test boyunca hasar oluşana kadar oluşan süreçte auxetic davranışın daha uzun süreyle devam ettiği gözlemlenmiştir.
- Re-entrant geometrili ince plakaların (folyo) sinklastik davranışı, numune üzerinde simülasyon çalışmasında çok net görülmektedir. Bu davranış sayesinde kask ve dizlik gibi yapıların auxetic malzemelerden rahatça üretilebileceği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Talbot D.(2003).Smart Material.
- [2] **Matveenko, V.P.**(2015). Mechanic of Advance Materials, *Springer*.
- [3] The Institute of Materials.(2013).Smart Materials for the 21st Century, *Materials Foresight*.
- [4] **Evans, K.E., Nkansah, M.A., Hutchinson, I.J., Rogers, S.C.**(1991).Molecular Network Design, *Nature*, 353, 124.
- [5] **Fung, Y.C.**(1968).Foundation of Solid Mechanics, *Prentice-Hall*, New Jersey, 353.
- [6] **A.E.H. Love, A.**(1927).Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, Cambridge University Press.
- [7] **Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G. S., Robertson, C.I.**(1982).The mechanics of two-dimensional cellular materials, *Proc. R. Soc. London A: Math. Phys. Eng. Sci*, 382, 25.
- [8] **Almgren, R.F.**,(1985).An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio=-1, *Journal of Elasticity*, 15(4), 427-430.
- [9] **Lakes, R.**(1987).Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. *Science*, 235(4792), 1038-1040.
- [10] **Caddock, B.D&Evans, K.E.**(1989).Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(12), 1877-1882.
- [11] **Evans, K.E&Caddock, B.D.**(1989).Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Mechanisms and interpretation, *Journal of Physics D. Applied Physics*, 22, 1883-1887.
- [12] **Alderson, K.L.&Evans, K.E.**(1992).The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio, *Polymer*, 33(20), 4435-8.
- [13] **Evans, K.E.&Alderson, A.**(2000) Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking, *Adv. Mater*, 817-628.
- [14] **Gunton, D. J.&Saunders, G. A.**(1972).The Young's modulus and Poisson's ratio of arsenic, antimony and bismuth, *J.Mater. Sci*, 7, 1061-1068.
- [15] **Li, Y.**(1976).The anisotropy of Poisson's ratio,Young's modulus and shear modulus in hexagonal materials, *Phys. Status.Solid B*, 38, 171-175.
- [16] **Yeganeh-Haeri, Y., Weidner, D.J.&Parise, J. B.**(1992).Elasticity of α -cristobalite: a silicon dioxide with a negative Poisson's ratio, *Science*, 257, 650-652.
- [17] **Baughman, R.H., Shacklette, J. M., Zakhidov, A. A. &Stafstrom, S.**(1998).Negative Poisson's ratios as a common feature of cubic metals, *Nature*, 392, 362-365.

- [18] **Veronda, D. R. & Westmann, R. A.** (1970). Mechanical characterization of skin – finite deformations, *J. Biomech*, 3, 111–124.
- [19] **Frohlich, L. M., Labarbera, M. & Stevens, W. P.** (1994). Poisson's ratio of a crossed fibre sheath: the skin of aquatic salamanders, *J. Zool. Lond*, 232, 231–252.
- [20] **Lees, C., Vincent, J. E. V. & Hillerton, J. E.** (1991). Poisson's ratio in skin, *Biomed. Mater. Eng.*, 1, 19–23.
- [21] **Williams, J. L. & Lewis, J. L.** (1982). Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis, *J. Biomech. Eng.*, 104(1), 50–56.
- [22] **Alderson, A.** (1999). A triumph of lateral thought, *Chemistry & Industry*, 10(10), 384–391.
- [23] **Masters, I. G. & Evans, K. E.** (1996). Models for the elastic deformation of honeycombs, *Compos. Struct.*, 35(4), 403–422.
- [24] **Grima, N.J., Caruana-Gauci, R., Attard, D., Gatt, R.** (2012). Three-dimensional cellular structures with negative Poisson's ratio and negative compressibility properties, *The Royal Society*, 468, 3121–3138.
- [25] **Alderson, A., Rasburn, J., Evans, K.E.** (2007). Mass transport properties of auxetics (negative Poisson's ratio) foam, *Phys. Stat. Sol.*, 244(3), 817–827., **doi:** 10.1002/pssb.200572701.
- [26] **Grima, J.N., Evans, K.E.** (2000). Auxetic behavior from rotating squares, *Journal of Materials Science Letters*, 1563–1565.
- [27] **Grima, J.N., Alderson, A., Evans, K.E.** (2004). Negative Poisson's ratios from rotating rectangles, *Computational Methods in Science and Technology*, 10(2), 137–145.
- [28] **Smith, C. W., Grima, J. N. & Evans, K. E.** (2000). A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: Missing Rib Foam Model, *Acta Mat.*, 4349–4356.
- [29] **Soman, P., Chen, S. & Fozdar, D.** (2013). *US Patent No. 20130344601 A1*, The Regents Of The University Of California.
- [30] **Prall, D., Lakes, R.S.** (1997). Properties of Chiral Honeycomb with a Poisson's Ratio of -1 , *Int. J. Mech. Sci*, 305–314.
- [31] **Spadoni, A., Ruzzene, M.** (2012). Elasto-static micropolar behavior of a chiral auxetic lattice, *J. Mech. Phys. Solids*, 60(1), 156–171.
- [32] **Caddock, B.D.** (1989). Microporous materials with negative Poisson's ratio: I. Microstructure and mechanical properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22, 1877.
- [33] **Alderson, K.L. & Evans, K.E.** (1992). The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio, *Polymer*, 33, 4435–4438.
- [34] **Smardzewski, J., Klos, R., Fabisiak, B.** (2013). Design of small auxetic springs for furniture, *Materials and Design*, 7723–728.
- [35] **Roberto, N., Lorenzo, M.** (2016). Computational Design and Simulation of Bending-Active Auxetic Structure, 11(2), 59–71.
- [36] **Grima J.N.** (2010). Auxetic Metamaterials, Strasbourg, France.

- [37] **Anderson, T.L.**(2005).Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications.
- [38] **Choi, J.B., Lakes, R.S.**(1992).Nonlinear properties of polymer cellular materials with a negative poisson's ratio, *J. Mater. Sci.*, 27, 5373 – 5381.
- [39] Donoghue, J.P., Alderson, K.L., Evans, K.E.(2009).The fracture toughness of composite laminates with a negative Poisson's ratio, *Phys. Stat. Sol. B*, 246, 2011-2017.
- [40] **Choi, J.B., Lakes, R.S.**, (1996).Fracture Toughness of Re-entrant Foam Materials with a Negative Poisson's Ratio: Experiment and Analysis, *Int. J. Fracture*, 80, 73-83.
- [41] **Liu, Y., Hu, H.**(2010).A Review on Auxetic Structures and Polymeric Materials, *Scientific Research and Essays*, 5(10), 1052-1063.
- [42] **Howell, B., Prendergast, P. & Hansen, L.**(1994).Examination of acoustic behavior of negative Poisson's ratio materials, *Applied Acoustics*, 43(2), 141–148.
- [43] **Giffo, L.G., Scarpa, F. & Yates, J.R.**(2004).Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam, *Smart Materials and Structures*, 13, 49–56.
- [44] **Biot, M. A.**(1956).Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. ii. high-frequency range, *J Acoust Soc Am*, 28, 179–191.
- [45] **Mullarkey, J.P.G., Evans, K.E., Alderson, A., Ameer-Beg, S. & Perrie, W.**(2001).Auxetic structures for variable permeability systems, *AICHE journal*, 47(11), 2623-2626.
- [46] **Martin, P.G., Gebrewold, Y., Stepan, D.J., Wilson, A.A., Henderson, C.P., Skulley, T.G., Johnson, E.J., Lovo, F., Mattano, D., Ponzio, C.**(2013).*US Patent No. 8342180 B2*, 3M Innovative Properties Company.
- [47] **Martin P.G.**(2011).*US Patent No.US8967147 B2*, 3M Innovative Properties Company.
- [48] *ISO standards on tensile testing in ambient temperature.*(2009).Switzerland: ISO
- [49] **Min Kim, K., Ho Park, J., Soo Kim, H., Hee Kim, J., Lee, Y.Y., Kim, K.Y.**(2012).Effect of plastic deformation on the corrosion resistance of ferritic stainless steel as a bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 8459-8464.
- [50] **Cong-hanh, Pham., Sandrine, T., & Pierre-Yves, M.**(2015).Mechanical properties involved in the micro-forming of ultra-thin stainless steel sheets, *Metallurgical and Materials Transactions*, 3502-3515.
- [51] **Karaca, A.A.**(2016).Auxetic Malzemelerin Deneysel Olarak ve Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [52] **Davis, J.R.**(1994).Stainless Steels (Ohio: ASM International)
- [53] **Hsu, P.I., Huang, M., Xi, Z., Wagner, S., Suo, Z. & Sturm, J.C.**(2004).Spherical deformation of compliant substrates with semiconductor device islands, *J. Appl. Phys.*, 95, 705–12.

- [54] **Lekesiz, H., Bullar, K., Karaca, A.A., Jun, M.G.B.**(2017).Mechanical Characterization of Auxetic Stainless Steel Thin Sheets with Re-enrant Structure, *Smart Matr.Struct.*, 26, 1-14.
- [55] **Bhullar, S.K., Lala, N.L.& Ramkrishna S.**(2015).Smart Biomaterials-A Review, *Rev.Adv.Mater.Sci.*,40, 303-314.
- [56] **Quinguo, F., Yong, K.K., Olena, K., Ugbolue, S.C., Warner, S.B. & Chen, L.Y.**(2007).*US Patent No.US20110046715.*

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Hazal OVAT CAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.04.1989, BURSA
E-posta : h.ovatcan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2012, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** 2018, Bursa Teknik Üniversitesi, Mekanik Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2015- Devam eden: MGI COUTIER A.Ş.- Tasarım Mühendisi
- 2013-2014 TOFAŞ: Tasarım Mühendisi
- 2014-2015 TÜBİTAK PROJESİ: 1. Nanolifli İlaç Taşıma Sistemlerine Sahip Yenilikçi Bir Oksetik Kan Damarı Stenti Geliştirilmesi (Yarı Zamanlı Bursiyer)