



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Umut AKSU

NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP (AUXETIC)
FİBER AĞ ÖRGÜ YAPILARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE
GÖRE NÜMERİK ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

OSMANIYE – 2016

**T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NEGATİF POİSSON ORANINA SAHİP (AUXETIC)
FİBER AĞ ÖRGÜ YAPILARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE
GÖRE NÜMERİK ANALİZİ**

Umut AKSU

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

**OSMANIYE
AĞUSTOS-2016**

TEZ ONAYI

NEGATİF POİSSON ORANINA SAHİP (AUXETIC) FİBER AĞ ÖRGÜ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE GÖRE NÜMERİK ANALİZİ

Umut AKSU tarafından Yrd. Doç. Dr. M. Seha TATLIER danışmanlığında
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği**
Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri
tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. M. Seha TATLIER
Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, OKÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Recep HALICIOĞLU
Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, OKÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Kerimcan ÇELEBİ
Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, ABTÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yönetim Kurulu'nun/...../..... Tarih ve/..... sayılı
kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. A. Ali GÜRTEN
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

*Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak
5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.*

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Umut AKSU



ÖZET

NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP (AUXETIC) FİBER AĞ ÖRGÜ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE GÖRE NÜMERİK ANALİZİ

Umut AKSU

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. M. Seha TATLIER

Ağustos 2016, 55 sayfa

Malzemelerin mekanik özelliklerine yön veren parametrelerden birisi de Poisson oranıdır. Poisson oranı elastik bir malzemeye uygulanan aksenal bir kuvvet sonucu o malzemedeki fiziksel değişimin sayısal olarak ifadesidir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemelerinin Poisson oranları 0 ile 0,5 arasında farklı değerler almaktadır. Bu değer aralığında bir Poisson oranına sahip bir malzeme için, aksenal bir çekme (veya basma) gerilmesi uygulanması durumunda çekme/basma yönünde bir uzama/kısalma meydana gelirken, bu eksene dik yönde kısalma/genişleme olduğu açıkça gözlemlenebilir. Bununla beraber, 30 yılı aşkın yapılan gözlem ve çalışmalar sonucunda, geleneksel malzemelere nispeten dış etkilere (aksenal kuvvetler vb.) alışılmışın dışında bir fiziksel tepki veren yeni bir malzeme sınıfı keşfedilmiştir. Bu malzemeler, auxetic (negatif Poisson oranına sahip) malzemeler olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada, auxetic fiber ağ örgü yapılarının mekanik özelliklerinin çeşitli parametrelere göre nümerik analizi ve incelenmesi yapılmıştır. MATLAB® programı kullanılarak oluşturulan nümerik 2 boyutlu geleneksel fiber ağ örgü yapı modelleri daha sonra, deformasyon analizleri gerçekleştirilmek üzere ANSYS® programına aktarılmıştır. Geleneksel fiber ağ örgü yapılarının, auxetic fiber ağ örgü yapılar haline gelmesinde en önemli rolü oynayan aksenal basma (-y yönünde bası) parametresi başta olmak üzere, auxetic özelliğın nitel ve nicel durumlarına doğrudan etkileyen parametreler olan; fiberlerin model düzlemi üzerindeki yönelim açısı ve fiberlerin uzunluk/çap oranının farklı değerli için gerçekleştirilen analizler ile, bu parametrelerin auxetic fiber ağ örgü yapılarının Poisson oranı ve etkin elastisite modülü değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir ve sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Negatif Poisson Oranı, Auxetic, Fiber Ağ Örgü Yapı, MATLAB®, ANSYS®

ABSTRACT

THE NUMERICAL ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF FIBROUS NETWORK STRUCTURES WITH NEGATIVE POISSON'S RATIO (AUXETIC) ACCORDING TO VARIOUS PARAMETERS

Umut AKSU

M.Sc., Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Assist. Prof. Dr. M. Seha TATLIER

August 2016, 55 pages

One of the parameteres governing mechanical properties of materials is Poisson's ratio. Poisson's ratio is quantitative expression of physical change at an elastic material resulting from an applied axial load to the material. Today, commonly-used engineering materials' Poisson's ratio have different values in the range of 0 and 0.5. It can be clearly observed that for a material having a Poisson's ratio in this range of value, in case of applying an axial tension stress (or compression), there occurs contraction/expansion in transverse direction while an elongation/ a shortening occurs in longitudinal direction dueto tension/compression. Besides, as results of investigations and studies have been carried on for 30 years, a new class of materials was discovered which react extraordinarily against to external effects (axial loads etc.) in contrast to conventional materials. This class of materials called 'auxetic' (materials which have negative Poisson's ratio). In this study, numerical analysis and investigation of mechanical properties of auxetic fibrous network structures according to various parameters. Numerical 2 dimensional conventional fibrous network structure models generated by using MATLAB®, then imported into ANSYS® program for performing deformation analysis. Effect of parameters were investigated over auxetic fibrous network structures' Poisson's ratio and effective Young's modulus with analyses performed for the different values of the parameters; one of which is notably, axial compression (compress in -y direction) having the most important role in converting conventional fibrous network structures to auxetic one, also fibers' orientation angle in x-y plane and aspect ratio of fibers that effect the qualitative and quantitative situations of auxeticity directly, and results were submitted.

Key Words: Negative Poisson's Ratio, Auxetic, Fiber Network Structure, MATLAB®, ANSYS®



Çok kıymetli aileme...

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Seha TATLIER'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca değerli zamanını ve bilgilerini benimle paylaşan Yrd. Doç. Dr. Tarık BARAN'a ve tezimin düzenlenmesinde bana yardımcı olan meslektaşım Arş. Gör. Emre ÖZER'e teşekkür ederim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca benden hiçbir desteğini esirgemeyen aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İTHAF SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Auxetic Malzemelerin Özellikleri.....	3
1.1.1. Kayma Modülü.....	3
1.1.2. Kırılma Tokluğu.....	4
1.1.3. İz Oluşumuna Karşı Direnç.....	5
1.1.5. Gözeneklilik-Geçirgenlik Kabiliyeti.....	6
1.1.6. Sıradışı Bükülme Özelliği.....	7
1.2. Auxetic Malzemelerin Potansiyel Uygulama Alanları.....	8
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	10
2.1. Doğal Auxetic Yapılar.....	10
2.2. Auxetic Özellik Üzerine Yapılan Teorik ve Deneysel Çalışmalar.....	10
3. MALZEME ve YÖNTEM.....	20
3.1. Fiber Ağ Örgü Yapı Nümerik Modelinin Oluşturulması.....	20
3.2. Fiber Ağ Örgü Yapının Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizi.....	27
4.BULGULAR ve TARTIŞMA.....	34
4.1. Fiber Yönelim Açısı Parametresinin Auxetic Özelliğe Etkisi.....	35
4.2. Fiber Uzunluk/Çap Oranı Parametresinin Auxetic Özelliğe Etkisi.....	40
4.3. Eksenel Basma Oranı Parametresinin Auxetic Özelliğe Etkisi.....	45
5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR.....	50
ÖZGEÇMİŞ.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Nümerik modellerin oluşturulmasında kullanılan parametreler ve parametre değerleri.....	24
Çizelge 4.1. 2boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber yönelim açılarının Poisson oranına etkisi.....	35
Çizelge 4.2. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber yönelim açısı parametresinin etkin elastisite modülüne etkisi.....	36
Çizelge 4.3. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin Poisson oranına etkisi	40
Çizelge 4.4. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin etkin elastisite modülüne etkisi.....	41
Çizelge 4.5. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında eksenel basma parametresinin Poisson oranına etkisi.....	47
Çizelge 4.6. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında eksenel basma parametresinin etkin elastisite modülüne etkisi.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Uygulanan aksenal kuvvet ile geleneksel ve auxetic malzemelerde meydana gelen değişimlerin karşılaştırması, (a) geleneksel malzemede çekme ile oluşan uzamaya karşılık daralma ve (b) basma ile oluşan kısalmaya karşılık genişleme; (c) auxetic malzemede çekme sonucu uzamayla birlikte genişleme ve (d) basma sonucu kısalmayla birlikte daralma [4].....	2
Şekil 1.2. Magnox tipi reaktörlerin moderatörlerinin yapısı [7]	4
Şekil 1.3. (a) Pozitif Poisson oranına sahip malzeme ve (b) Auxetic malzemenin iz oluşum direnci [7].....	5
Şekil 1.4. Auxetic özellikten yararlanılarak yapılabilecek akıllı filtreleme [14]	6
Şekil 1.5. (a) Sinklastik eğri ve (b) antiklastik (eyer formu) eğri [15]	7
Şekil 1.6. (a) Geleneksel petek modeli ile oluşturulan yapının, (b) Girintili petek modeli ile oluşturulan auxetic yapının eğme durumundaki hali [16].....	7
Şekil 2.1. (a) Geleneksel petek modelinin serbest durumdaki hali, (b) Geleneksel petek modelinin deformasyon durumundaki hali, (c) Auxetic anizotropik petek modelinin serbest durumdaki hali, (d) Auxetic anizotropik petek modelinin deformasyon durumundaki hali [8]	11
Şekil 2.2. Auxetic izotropik petek modeli [33].....	11
Şekil 2.3. (a) Geleneksel köpük malzemenin ve (b) auxetic köpük malzemenin içyapısı [34]	12
Şekil 2.4. Auxetic köpüğün, (a) serbest durumdaki hali, (b) aksenal gerilme durumundaki hali [17]	12
Şekil 2.5. Auxetic özelliğe sahip genişletilmiş formdaki ePTFE'nin içyapısı [36]...	13
Şekil 2.6. ePTFE'nin auxetic davranışını açıklayan 2 boyutlu model [37]	14
Şekil 2.7. Auxetic özelliğin görüldüğü anizotropik girintili petek modeline alternatif olarak geliştirilen izotropik model [38]	14
Şekil 2.8. (a) İdeal geleneksel köpük hücresi modeli, (b) ideal auxetic köpük hücresi modeli [40]	15
Şekil 2.9. Polimer malzemelere auxetic özelliğin adaptasyonu amacıyla oluşturulan akışkan kristalli polimer zinciri modeli [42]	16

Şekil 2.10. Auxetic davranışın gözlemlendiği periyodik ok başı şeklinde birim hücrelerden meydana gelen ağ örgü yapısı [43].....	16
Şekil 2.11. Auxetic özelliğın gözlemlendiği 2 boyutlu asimetrik altıgen model [44].....	17
Şekil 2.12. Poliüretan auxetic köpük malzemenin deneysel sonuçlarının açıklanması ve değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen model [45]	17
Şekil 2.13. Hareketli kare hücrelerden oluşan auxetic yapının geometrisi [46]	18
Şekil 2.14. Hareketli üçgen hücrelerden oluşan auxetic yapının geometrisi [47].....	18
Şekil 2.15. Auxetic davranış elde edilen 2 boyutlu içyapı modeli [49]	19
Şekil 3.1. Nümerik modeldeki bir fiberin deformasyon davranışı ve serbestlik dereceleri [50].....	20
Şekil 3.2. Nümerik modelin oluşturulduğu MATLAB® kodunun akış şeması.....	21
Şekil 3.3. Nümerik modellemede bir fiberin doğrusal çizgi ile temsil edilmesi.....	22
Şekil 3.4. Birim hücre içerisinde rastgele üretilen fiberler	23
Şekil 3.5. Birim hücre sınırları dışına taşan fiber kısımları için periyodik sınır şartlarının uygulanması.....	25
Şekil 3.6. Perkolasyon işleminin uygulanması ile bağımsız fiberlerin birbirleriyle kaynaştırılması ve ardından herhangi bir fiber yığına ait olmayan fiberlerin ve fiber kısımlarının silinmesi	26
Şekil 3.7. Perkolasyon yığındaki birbiriyle kesişen fiberlerin yük taşımayan uç kısımlarının silinmesi ve nümerik modelin son hali.....	26
Şekil 3.8. 2 boyutlu nümerik fiber ağ örgü yapısı modelinin ANSYS® programına aktarılması	28
Şekil 3.9. BEAM 188 eleman tipi [51]	29
Şekil 3.10. $x = 0$ ve $y = 0$ boyunca fiber ağ örgü yapısına simetrik sınır şartlarının uygulanması.....	30
Şekil 3.11. İncelenen fiber ağ örgü yapısına simetrik sınır şartlarının uygulanması....	30
Şekil 3.12. Fiber ağ örgü yapısının sıkıştırma işleminden önceki (siyah) ve sonraki (mavi) şekilsel durumları.....	31
Şekil 3.13. Geleneksel fiber ağ örgü yapısının sıkıştırılması ile elde edilen auxetic yapı	32
Şekil 3.14. Auxetic fiber ağ örgü yapısının aksenal çekme etkisine verdiği fiziksel tepki	33

Şekil 4.1. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiberlerin yönelim açısının Poisson oranına etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$, Fiberlerin boy-çap oranı $L/d = 40$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$).....	36
Şekil 4.2. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiberlerin yönelim açısının etkin elastisite modülüne etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$, Fiberlerin boy-çap oranı $L/d = 40$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$).....	37
Şekil 4.3. $\theta = \pm\pi/2$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekmeden önceki durumu	38
Şekil 4.4. $\theta = \pm\pi/2$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekme sonrasındaki durumu	38
Şekil 4.5. $\theta = \pm\pi/12$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekmeden önceki durumu	39
Şekil 4.6. $\theta = \pm\pi/12$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekme sonrasındaki durumu	39
Şekil 4.7. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin Poisson oranına etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$)	41
Şekil 4.8. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin etkin elastisite modülüne etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$)	42
Şekil 4.9. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=20$ olan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekmeden önceki durumu	43
Şekil 4.10. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=20$ olan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekme sonrasındaki durumu	43
Şekil 4.11. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=40$ olan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekmeden önceki durumu	44
Şekil 4.12. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=40$ olan, eksenel bası uygulanmış ağ örgü yapının eksenel çekme sonrasındaki durumu	44

Şekil 4.13. Geleneksel fiber ağ örgüde aksel çekme sonrası enine daralma ve boyuna uzama (eksel basma uygulanmamıştır.).....	45
Şekil 4.14. %70 oranında aksel basma uygulanan geleneksel fiber ağ örgüde aksel çekme sonrası enine genişleme ve boyuna uzama.....	46
Şekil 4.15. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında aksel basma oranı parametresinin Poisson oranına etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, fiber uzunluk/çap oranı $L/d = 0,4$).....	48
Şekil 4.16. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında aksel basma parametresinin etkin elastisite modülüne etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, fiber uzunluk/çap oranı $L/d = 40$)	48

SİMGELER ve KISALTMALAR

A_o	x=0 doğrusu boyunca fiber en-kesitlerin toplam alanı	(m)
C	Eksenel bası miktarı	(-)
E	Elastisite modülü	(Pa)
E'	Etkin elastisite modülü	(-)
E_f	Fiber malzemesinin elastisite modülü	(Pa)
F_x	+x yönündeki çekmeden dolayı x=0 boyunca mesnet reaksiyon kuvveti	(N)
G	Kayma modülü	(Pa)
H	Hertz basıncı	(Pa)
K	Hacim modülü	(Pa)
L	Bir fiberin uzunluğu	(m)
N	Nümerik modeldeki fiber sayısı	(-)
a	Fiber uzunluk/çap oranı	(-)
d	Bir fiberin en-kesit çap değeri	(m)
x_i	Nümerik modelin aksenal basıdan önceki durumunda üst seviyedeki nodların x koordinatı değeri	(m)
x_o	Nümerik modelin x ekseni doğrultusundaki ilk boyu	(m)
x_s	Nümerik modelin aksenal basıdan sonraki durumunda üst seviyedeki nodların x koordinatı değeri	(m)
y_i	Nümerik modelin aksenal basıdan önceki durumunda üst seviyedeki nodların y koordinatı değeri	(m)
y_o	Nümerik modelin y ekseni doğrultusundaki ilk boyu	(m)
y_s	Nümerik modelin aksenal basıdan sonraki durumunda üst seviyedeki nodların x koordinatı değeri	(m)
$x_{1,2}$	x-y düzlemi üzerinde bir fiberin uç kısımlarının koordinat noktalarının x noktası değerleri	(m)
x_3	x-y düzlemi üzerinde bir fiberin orta kısmının koordinat noktasının x noktası değeri	(m)
$y_{1,2}$	x-y düzlemi üzerinde bir fiberin uç kısımlarının koordinat noktalarının y noktası değerleri	(m)

y_3	x-y düzlemi üzerinde bir fiberin orta kısmının koordinat noktasının y değeri	(m)
Δx	x eksenini doğrultusunda şekil değıştirme miktarı	(m)
Δy	y eksenini doğrultusunda şekil değıştirme miktarı	(m)
ε_x	x eksenini doğrultusundaki gerinim miktarı	(-)
ε_y	y eksenini doğrultusundaki gerinim miktarı	(-)
θ	Fiberlerin yönelim açısı	(°)
ν	Poisson oranı	(-)
ν_{ort}	Ortalama Poisson oranı	(-)
ν_{yx}	x-y düzlemindeki Poisson oranı değeri	(-)
σ	Normal gerilme	(Pa)

Üst İndisler

γ	Hertz basınç sabiti
----------	---------------------

1.GİRİŞ

Temelleri insanlık tarihinin başlangıcına dayanan ve çeşitli ihtiyaçları karşılamak üzere sürekli gelişim gösteren teknoloji, toplumların gelişmişliğinin bir ölçüsüdür. Teknolojinin temel bileşenlerinden biri de malzemedir. Malzeme seçiminde; ihtiyacın teknik boyutu, ekonomik boyutu, malzemenin tasarım özellikleri ve işlenebilirlik durumu gibi hususlar göz önünde bulundurulmaktadır. Bu doğrultuda, alışılmış mühendislik malzemelerine alternatif olarak çağın ve geleceğin gereksinimlerini karşılayabilmek amacıyla mevcut malzemelere ek özellikler kazandırma veya yeni malzeme geliştirilmesi yoluyla yeni nesil rekabetçi malzemelerin elde edilmesi yoluna gidilmektedir [1].

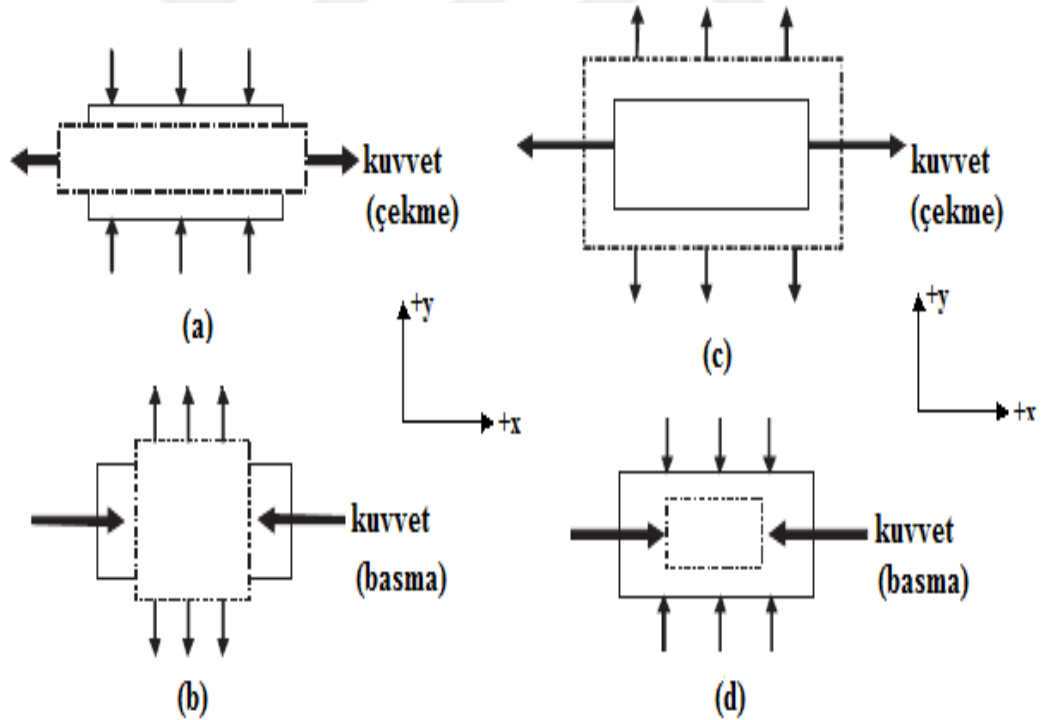
Malzemeler sahip oldukları içyapının durumuna ve atomlar arası bağların kuvvetlerine bağlı olarak pek çok özelliği bünyelerinde barındırır. Bu özellikler malzemelerin mekanik özelliklerine referans olup malzemedeki farklılıkları gösterir ve bu sayede malzemelerin karakteristik yapısını belirler. Malzemelerin davranışlarına yön veren bu özellikler tasarımdan üretim metoduna ve ürün geliştirmeye kadar birçok aşamada büyük rol oynamaktadır [1].

Malzemelerin davranışına yön veren parametrelerden biri de Poisson oranıdır. Genel olarak elastik şekil değiştirme yeteneğine sahip izotropik ve anizotropik malzemeler için belirlenebilen Poisson oranı, malzemelerin çeşitli etkilere karşı boyutsal bağlamda sergilediği davranışları sayısal olarak sembolize eder. Poisson oranı; bir aksel doğrultuda kuvvet uygulanan malzemenin bu doğrultuya dik doğrultudaki birim şekil değiştirme miktarının, kuvvetin uygulandığı doğrultudaki birim şekil değiştirme miktarına oranının eksi işaretlisi olarak tanımlanabilir [2].

$$\nu_{yx} = -\frac{(\Delta y/y_0)}{(\Delta x/x_0)} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (1.1)$$

Kısalma (daralmanın) negatif, uzama (genişlemenin) pozitif olduğu kabul edildiğinde Poisson oranının pozitif değerli olabilmesi için denklem (1.1)'in önüne (-) işareti konulmuştur [2].

En çok bilinen ve günlük hayatta kullanılan malzemelerin Poisson oranı pozitif değerlidir. Bu malzemeler için, bir aksel doğrultuda uygulanan basma kuvveti sonucu bu doğrultuda kısıalma (daralma) meydana gelmesi ve bu doğrultuya dik olan diğer doğrultu(lar)da ise uzama (genişlemenin) görülmesi (veya tersi) mantıksal olarak kabul edilen bir durumdur. Bununla birlikte bazı nadir yapı ve malzemelerde, bir aksel doğrultuda çekmeye maruz kaldıklarında bu doğrultuya dik doğrultu(lar)da uzama (genişleme) veya basmaya maruz kaldıklarında bu doğrultuya dik doğrultu(lar)da kısıalma (daralma) meydana geldiği gözlemlenebilir (Şekil 1.1). Pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin aksine davranış gösteren bu malzemelerin Poisson oranı değerlerinin negatif olması gerektiği açıktır. Negatif Poisson oranına sahip olan bu yapı ve malzemeler literatürde “auxetic” olarak isimlendirilmiştir. Auxetic kelimesi Yunanca’da “artmaya eğilim gösteren” anlamına gelen auxetikos kelimesinden gelmektedir. Auxetic terimi ilk olarak Profesör Ken Evans tarafından 1991 yılında kullanılmıştır [3].



Şekil 1.1. Uygulanan aksel kuvvet ile geleneksel ve auxetic malzemelerde meydana gelen değişimlerin karşılaştırması, (a) geleneksel malzemede çekme ile oluşan uzamaya karşılık daralma ve (b) basma ile oluşan kısılmaya karşılık genişleme; (c) auxetic malzemede çekme sonucu uzamayla birlikte genişleme ve (d) basma sonucu kısılmayla birlikte daralma [4]

1.1. Auxetic Malzemelerin Özellikleri

Auxetic malzemelerin en dikkat çekici özelliği, negatif Poisson oranına istinaden, geleneksel mühendislik malzemelerinden farklı olarak verdiği mekanik tepkidir. Auxetic malzemelerin sahip oldukları bu özellik geleceğin teknolojisini şekillendirecek potansiyele sahiptir ve bu sayede bilimde yeni bir ilgi alanı ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda geçmişten günümüze kadar birçok deneysel ve nümerik modelleme tabanlı çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen bulgularda, aynı elastisite modülüne sahip geleneksel mühendislik malzemeleri ile karşılaştırıldığında, bazı mekanik özelliklerin auxetic malzemelerde daha üstün durumda olduğu görülmüştür. Bu özelliklerden bazıları şunlardır [5]:

- Kayma modülü,
- Kırılma tokluğu,
- İz oluşumuna karşı direnç,
- Üstün enerji emme kabiliyeti,
- Gözeneklilik-geçirgenlik kabiliyeti,
- Sıradışı bükülme özelliği

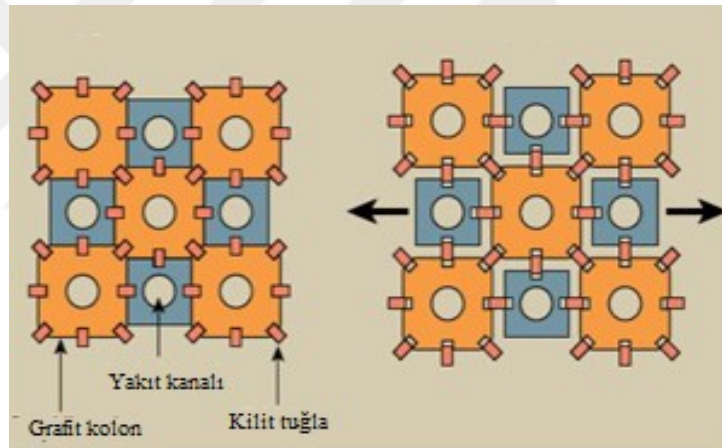
1.1.1. Kayma Modülü

Elastisite teorisine göre, izotropik malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde rol oynayan parametrelerden elastisite modülü (E), kayma modülü (G), hacim modülü (K) ve Poisson oranı (ν) arasındaki ilişki denklem (1.2) ve denklem (1.3)'deki gibidir [6].

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (1.3)$$

3 boyutlu izotropik, lineer elastik malzemeler teorik olarak $-1 \leq \nu \leq 0,5$ aralığında, 2 boyutlu izotropik, lineer elastik malzemeler teorik olarak $-1 \leq \nu \leq 1$ aralığında Poisson oranı değerlerine sahiptir [5]. Poisson oranı 0.5 ve bu değere yakın olan malzemeler için denklem (1.2) ve denklem (1.3) göz önüne alındığında hacim modülü değerinin kayma modülü değerinden çok büyük olduğu görülebilir ($G \ll K$). Bununla beraber Poisson oranı -1 ve bu değere yakın olan malzemeler için kayma modülü değerinin hacim modülü değerinden çok büyük olduğu görülebilir ($K \ll G$). Bazı durumlarda hacim modülünün küçük ve kayma modülünün büyük olmasına ihtiyaç duyulabilir. Örnek olarak 1950'lerde İngiltere'de kurulan magnox nükleer reaktörlerindeki grafit hücrelerin tasarım şekli, $\nu = -1$ 'e eşdeğer auxetic davranış gösteren yapılara benzemektedir (Şekil 1.2). Bu şekildeki bir tasarımın tercih edilmesinin sebebi; deprem, termal genişleme/büzülme vb. etkiler sonucu oluşabilecek yüklerin yatay bileşenlerine karşı reaktörün güvenliğini sağlamaktır [7].



Şekil 1.2. Magnox tipi reaktörlerin moderatörlerinin yapısı [7]

1.1.2. Kırılma Tokluğu

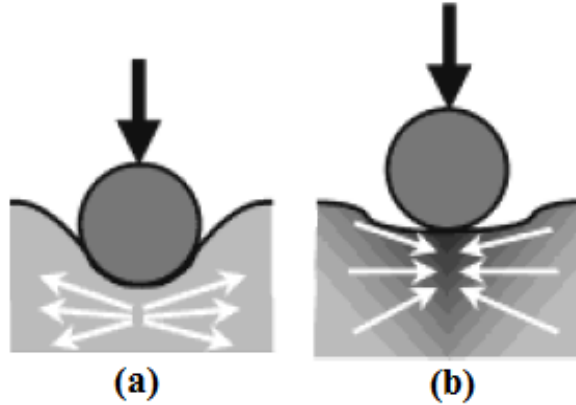
Auxetic köpük malzemeler için, kırılma tokluğunun kalıcı hacimsel sıkıştırma oranının bir fonksiyonu olduğu sonucu deneylerle ortaya konmuştur [5]. Choi ve ark. [8] tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda geleneksel poliüretan-poliyester köpük malzeme ile kıyaslanan auxetic köpük malzemenin daha iyi kırılma tokluğu özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. Auxetic malzemeler ayrıca yüksek çatlak direncine sahiptir. Bu sayede auxetic malzeme bünyesinde çatlak mevcut ise malzeme gerildikçe genişleyerek çatlağı kapatacaktır [5].

1.1.3. İz Oluşumuna Karşı Direnç

Malzemeler sahip oldukları sertlik neticesinde plastik deformasyona karşı direnç gösterirler. Bu direncin ölçüsü ise malzemeye uygulanan basıncın malzemede oluşturduğu iz oluşum miktarıdır. İzotropik malzemeler için iz oluşum direnci (sertliği) özelliği sayısal olarak denklem (1.4) ile ifade edilir [7].

$$H \propto \left[\frac{E}{(1 - \nu^2)} \right]^Y \quad (1.4)$$

Buna göre Poisson oranının -1 ve 1 değerleri için iz oluşum direnci en yüksek değerine sahiptir. Fakat izotropik malzemeler için Poisson oranı değerinin 0,5'i aşamayacağı göz önüne alındığında Poisson oranı -1 ve bu değere daha yakın olan malzemeler için iz oluşum direncinin artırılması muhtemeldir. Auxetic malzemelerin basınca maruz kaldıklarında tüm yönlerden kılma(daralma) meydana geldiği göz önünde bulundurulursa, küçülmeye uğrayan malzemeye basıncın uygulandığı noktada yoğunluk ve dolayısıyla iz oluşum direnci artacaktır [7]. Tersine, auxetic olmayan malzemelerde ise basıncın uygulandığı noktada yoğunluk azalarak iz oluşum direnci de azalmış olacaktır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. (a) Pozitif Poisson oranına sahip malzeme ve
(b) Auxetic malzemenin iz oluşum direnci [7]

Smith ve ark. [9], yaptıkları çalışmalar sonucu auxetic köpüklerin, hacim yoğunluğu ve modülünden bağımsız olarak, geleneksel köpük malzemelere göre daha iyi iz oluşum direnci değerine sahip olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca Alderson ve ark. [10], yaptıkları çalışma ile geleneksel UHMWPE (çok yüksek molekül ağırlıklı

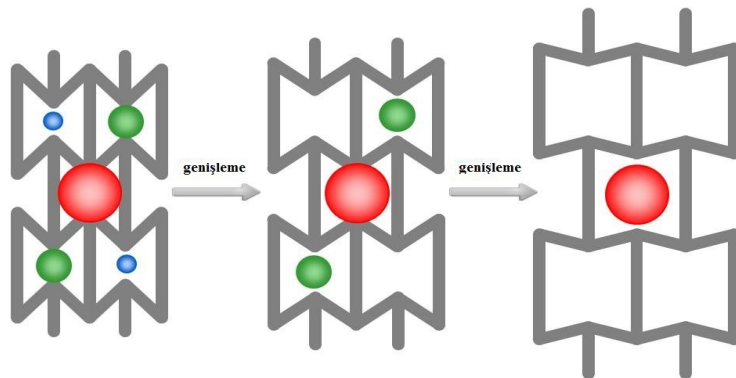
polietilen) ile karşılaştırıldığında, düşük yüklemelerde, auxetic UHMWPE malzemenin daha iyi iz oluşum direncine sahip olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

1.1.4. Üstün Enerji Emme Kabiliyeti

Auxetic malzemeler geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında daha üstün enerji (akustik, ultrasonik, titreşim, darbe gibi) emme kabiliyetine sahiptir [5]. Scarpa ve arkadaşları, yaptıkları deneysel çalışmalar sonucu auxetic köpüklerin, auxetic olmayan köpüklerden daha iyi ses tutma kapasitesine [11] ve daha iyi dinamik ezilme direnci özelliklerine [12] sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir.

1.1.5. Gözeneklilik-Geçirgenlik Kabiliyeti

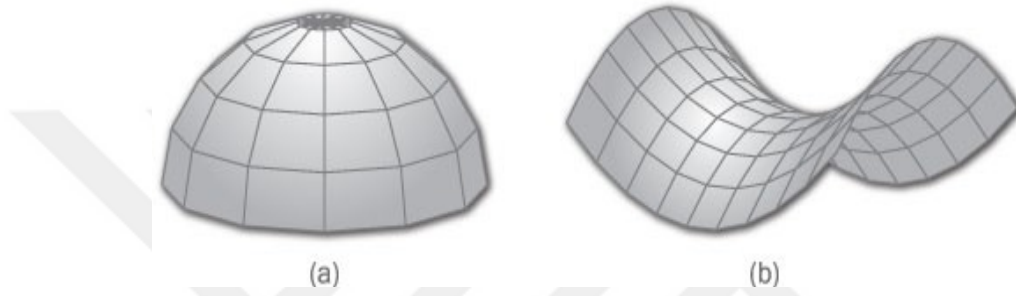
Gözenekli yapıya sahip auxetic malzemeler, bir ekseninde gerildiklerinde gözeneklerinin genişleyerek açılması özelliğine sahiptir. Auxetic malzemelerin bu özelliği ile ilgili çalışmalar yapan Alderson ve ark. [13], genişleyen gözeneklerin boyutlarının artırılabilirliği ve bu gözeneklerin istenilen şekillerde tasarlanabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu özellik çeşitli filtreleme işlemlerinde kullanılabilir. Böylece filtreleme elemanlarının gözeneklerindeki tıkanmalar sonucu filtrede basınç artışının ve filtreleme işlemlerindeki verim düşüşlerinin önüne geçilebileceği düşünülmektedir. Şekil 1.4'te auxetic özellikten yararlanılarak yapılan akıllı filtreleme uygulaması görülmektedir.



Şekil 1.4. Auxetic özellikten yararlanılarak yapılabilecek akıllı filtreleme [14]

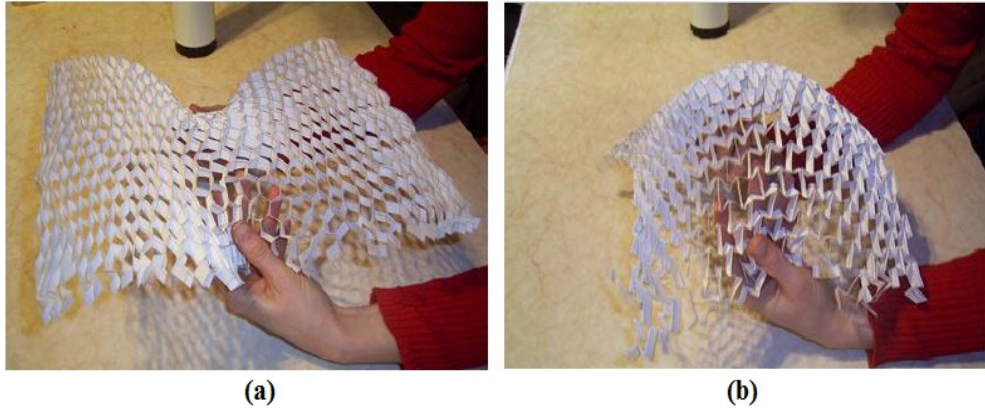
1.1.6. Sıradışı Bükülme Özelliği

Pozitif Poisson oranı değerine sahip yapı ve malzemelerin, eğilmeye zorlandıklarında genellikle yüzey düzlemlerinde birbirini dik kesen iki doğru boyunca içbükey ve dışbükey olacak şekilde (antiklastik) büküldüğü, bununla birlikte auxetic yapı ve malzemelerin ise eğilmeye zorlandıklarında kubbe şeklinde (sinklastik) büküldükleri gözlemlenmiştir. Bu özellik, uzay ve havacılık sektöründe hava araçlarının burun konisi kısmının ve kanat panellerinin tasarım ve üretiminde kullanılabilir [7].



Şekil 1.5. (a) Sinklastik eğri ve (b) antiklastik (eyer formu) eğri [15]

Şekil 1.5'te sinklastik eğri ve antiklastik eğri görülmektedir. Ayrıca Şekil 1.6'da geleneksel petek modeli ile oluşturulan yapı ve girintili petek modeli ile oluşturulan auxetic yapının eğilme durumunda aldıkları son haller görülmektedir.



Şekil 1.6. (a) Geleneksel petek modeli ile oluşturulan yapının, (b) Girintili petek modeli ile oluşturulan auxetic yapının eğilme durumundaki hali [16]

1.2. Auxetic Malzemelerin Potansiyel Uygulama Alanları

Auxetic malzemeler, sahip oldukları özellikleri sayesinde mevcut uygulamalarda geleneksel malzemelere yardımcı veya alternatif olarak kullanılabilirler. Ayrıca auxetic yapı ve malzemelerin kullanım yöntemleri doğrultusunda yeni uygulama alanlarının ortaya çıkması da mümkündür. Bununla birlikte günümüzde auxetic malzemelerin kullanımı henüz yaygınlaşmamıştır. Auxetic malzemelerin uygulanma potansiyeline sahip olduğu bazı örnekler şunlardır [5]:

- *Biyomedikal tıp alanında;* bandajlar, tamponlar, diş ipleri, yapay kas ve damarlar, yapay deri, ameliyat dikiş ipliği, implant malzemeleri, kanal genişleticiler, ilaç salım sistemleri,
- *Tekstil alanında;* fonksiyonel kumaşlar, takviye fiberleri, iplikler, hava filtreleri, balık ağları, contalar, halatlar, perçinler, emniyet kemerleri, auxetic fiberler, spor giysileri,
- *Endüstri alanında;* araç koltuk minderleri, kulaklık süngerleri, şok emiciler,
- *Uzay, havacılık ve otomotiv alanında;* araçların kavisli kısımları, hava araçlarının kanatların kaplamaları ve burun konileri, hava-uzay araçları için zararlı ısıl etkilere karşı koruma, araba tamponları,
- *Koruyucu ve askeri amaçlı ekipmanlarda;* kasklar, kurşun geçirmez yelekler, patlamaya dayanıklı perdeler, dizlikler ve dirsek koruyucular,
- *Algılayıcılar ve eyleyiciler;* hidrofonder, piezoelektrik cihazlar, minyatür algılayıcılar.

Auxetic özellik, geleceğin teknolojisine yön verecek üstünlüklere sahip olmakla birlikte, mevcut auxetic yapı ve malzemeler düşük yoğunluk ve gözenekli yapılarından dolayı yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için uygun değildir. Bununla birlikte auxetic özelliğin kompozit malzemelere adaptasyonu ile yüksek mukavemetli auxetic malzemelerin elde edilmesi sağlanabilir [5].

Bu tez çalışmasında, kompozit malzemelerde takviye katmanı olarak kullanılması amacıyla, auxetic davranış gösterecek şekilde tasarlanan fiber ağ örgü yapının incelenmesi ele alınmıştır. Önce, fiber ağ örgü yapının 2 boyutlu nümerik

modellemesi yapılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, nümerik modelin oluşturulmasında kullanılan parametrelerin ve fiber ağ örgü yapıya uygulanan sıkıştırma faktörünün, auxetic özellik kazanan fiber ağ örgü yapının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Auxetic özelliğinin keşfi yirminci yüzyılın başlarına dayanmaktadır. İlk olarak doğada keşfedilen bu özelliğın ilerleyen zamanlarda bilim ve teknoloji alanlarına adaptasyonu için çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. Henüz otuz yılı aşkın devam etmekte olan bu çalışmalar; auxetic davranışa yol açan mekanizmanın açıklanması ve yeni modellerin oluşturulması, auxetic malzemelerin tasarım ve üretiminin yapılması ile auxetic malzemelerin özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi başta olmak üzere çeşitli amaçları kapsamaktadır [17].

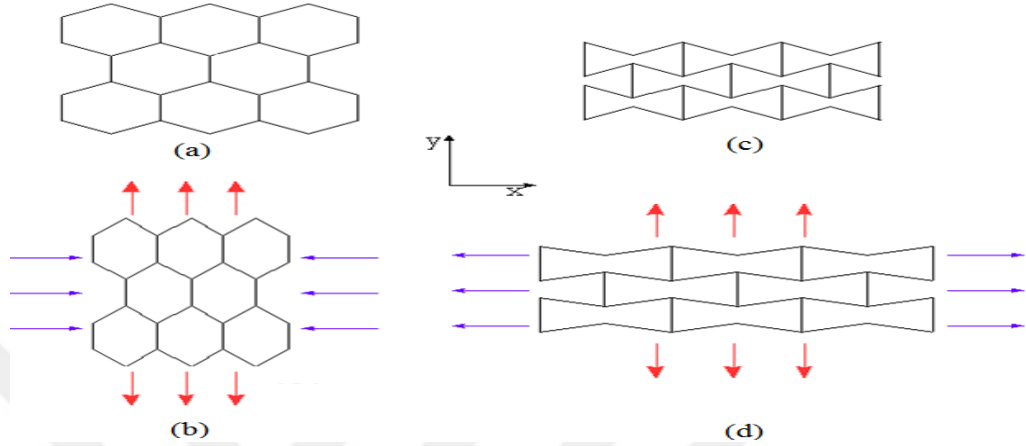
2.1. Doğal Auxetic Yapılar

Auxetic davranış sergilediğı gözlemlenen moleküler seviyedeki ilk doğal malzeme kübik tek kristalli demir piriti (demir sülfıt) olup (Poisson oranı değeri $\nu = -0,14$), 1900'lü yılların başında keşfedilmiştir. Demir piritinin ikiz kristal yapısı sebebiyle auxetic davranış gösterdiği öne sürülmüştür [18]. Daha sonra Ledbetter ve ark. [19] tarafından $YBa_2Cu_3O_7$ (itriyum baryum bakır oksit)'in auxetic özelliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Milstein ve ark. [20], daha sonra da Baughman ve ark. [21], kübik kristal yapılu metallerin ([110] doğrultusunda gerildiklerinde) %69'unun auxetic davranış gösterdiğini öne sürmüşlerdir. Araştırmalar sonucu keşfedilen ve literatürde bahsedilen, auxetic özelliğe sahip doğadaki diğer malzemeler; ısıl grafit [22], yapısında mikro çatlaklar bulunan kayalar [23,24], tek kristalli yapıya sahip arsenik [25] ve kadmiyum [26], çok kristalli yapıya sahip α -cristobalite silis kristali [27]'dir. Ayrıca, insanda ağırlığı taşıyan süngerimsi kemik [28], inek memesi derisi [29], kedi derisi [30] ve semender derisi [31] auxetic özelliğın gözlemlendiğı biyolojik yapılara örnek verilebilir.

2.2. Auxetic Özellik Üzerine Yapılan Teorik ve Deneysel Çalışmalar

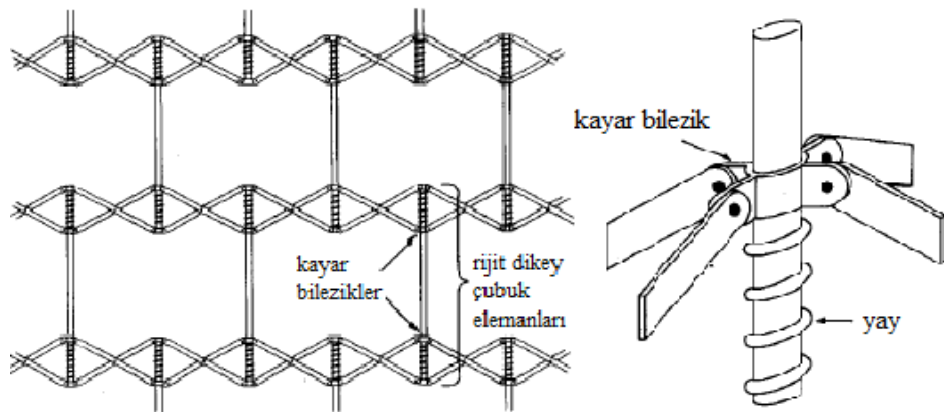
Gibson ve ark. [32], çalışmalarını gözenekli yapıya sahip bir auxetic model geliştirilmesi üzerine yapmışlardır. Bu doğrultuda silikon-kauçuk ve alüminyum malzeme kullanılarak, auxetic davranış sergileyen 2 boyutlu girintili petek modelini elde edilmiştir. Deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular

karşılaştırıldığında, elastisite modülü, Poisson oranı, akma ve burkulma gerilmeleri ile kayma modülü özelliklerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Bu model elastik olarak anizotropik özelliğe sahiptir. Auxetic davranış geometrik yapı ile elde edilmiştir (Şekil 2.1).



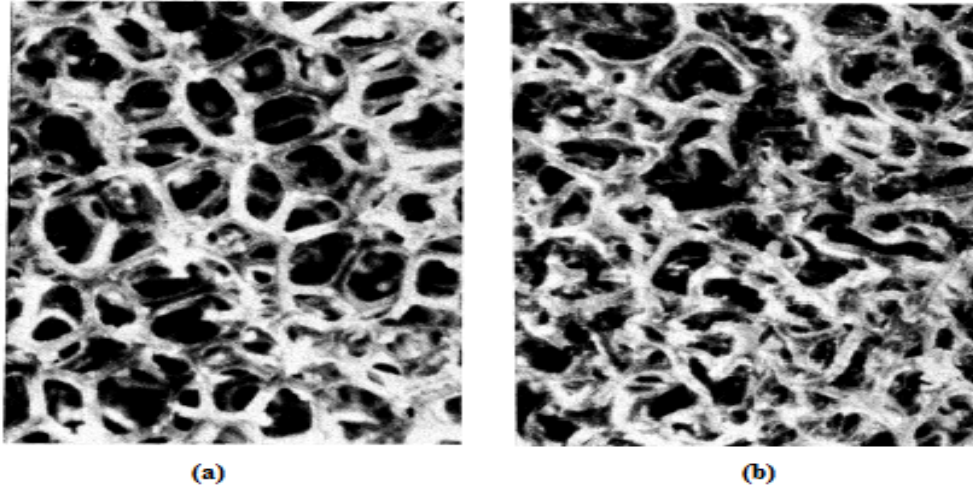
Şekil 2.1. (a) Geleneksel petek modelinin serbest durumdaki hali, (b) Geleneksel petek modelinin deformasyon durumundaki hali, (c) Auxetic anizotropik petek modelinin serbest durumdaki hali, (d) Auxetic anizotropik petek modelinin deformasyon durumundaki hali [8]

Almgren [33], ilk elde edilen 2 boyutlu anizotropik petek modelinin iyileştirilmesi ve 3 boyutlu modelin oluşturulması üzerinde çalışmıştır. Girintili petek modelinde aksenal çekme veya basma sonucu düzlemde kayma gerilmesi meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, ilk modeldeki düşey çubuk elemanlarının uçlarına, hareketli bilezikler arasında yaylar yerleştirilmiştir. Oluşturulan model ile çok büyük kayma gerilmesi ($G = \infty$) ve $\nu = -1$ değerinde Poisson oranı elde edilmiştir. Geliştirilen bu model elastik olarak izotropik özelliğe sahiptir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Auxetic izotropik petek modeli [33]

Lakes [34], kendi geliştirdiği yöntem ile ilk auxetic açık gözenekli izotropik poliüretan köpüğü başarıyla üretmiştir. Geleneksel açık gözenekli (gözenek boyutları; 0,3, 0,4, 1,2, 2,5 mm), düşük yoğunluklu polyester köpük numuneler, üç ekseninde hacimsel sıkıştırılarak (hacimsel sıkıştırma faktörü; 1,4 ila 4 arası), malzemenin gözeneklerinin girintili hale gelmesi sağlanmıştır. Malzeme, kalıba yerleştirilerek yumuşama sıcaklığının bir miktar daha üstü bir sıcaklığa (163-171 °C arası) kadar ısıtılmıştır. Son olarak malzeme oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Bahsedilen parametrelerin farklı değerleri için tekrarlanan deneysel çalışmalar sonucu, üretilen köpüklerin negatif Poisson oranı değerlerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Auxetic özelliğe sahip bu köpüklerin, geleneksel köpüklere göre daha esnek olduğu görülmüştür. Şekil 2.3'te geleneksel köpük ve auxetic köpük malzemelerinin içyapıları, Şekil 2.4'te ise aksenal gerilme etkisiyle auxetic davranışın gözlemlendiği köpük malzeme görülmektedir.



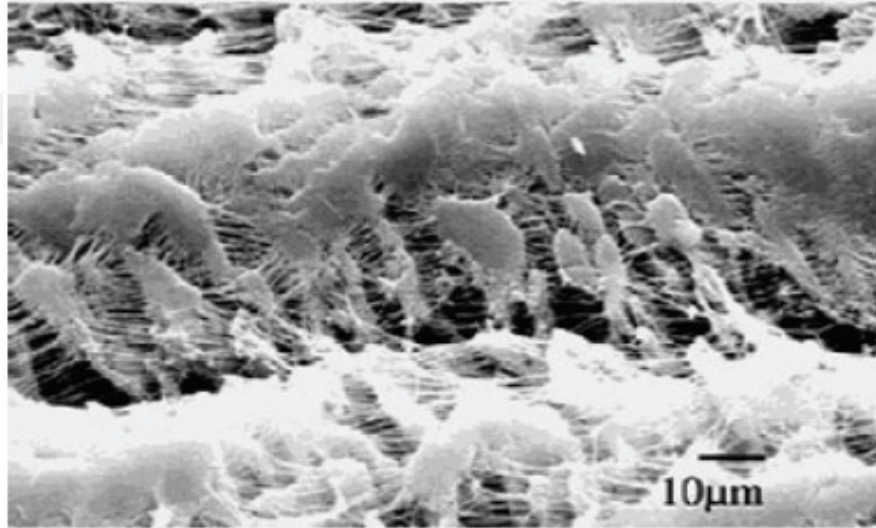
Şekil 2.3. (a) Geleneksel köpük malzemenin ve (b) auxetic köpük malzemenin içyapısı [34]



Şekil 2.4. Auxetic köpüğün, (a) serbest durumdaki hali, (b) aksenal gerilme durumundaki hali [17]

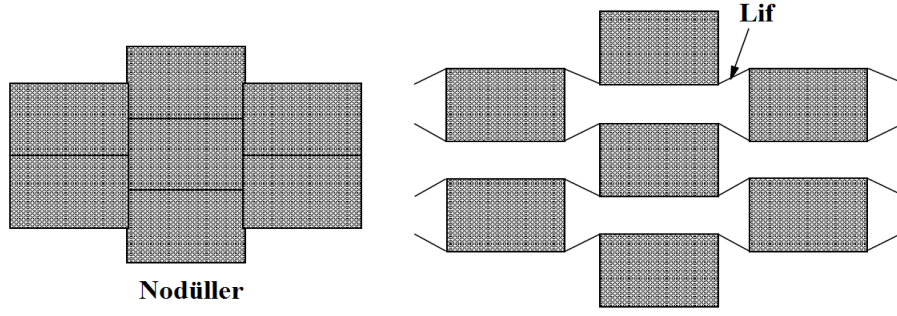
Friis ve ark. [35], geleneksel açık gözenekli termoplastik (polyester üretilen), termoset (silikon kauçuk) ve bakır köpük numuneler kullanılarak auxetic köpük malzeme üretmişlerdir. Auxetic numunelerin üretiminde, Lakes'in geliştirdiği yöntemden yararlanılmıştır. Yapılan denemeler sonucu elde edilen köpüklerin negatif Poisson oranı değerine sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, yeni elde edilen auxetic köpüklerin elastiklik modüllerinin geleneksel köpüklerinkine kıyaslandığında daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Caddock ve ark. [36], ürettikleri ilk mikro gözenekli anizotropik polimer malzeme olan politetrafloroetilen'in genişletilmiş formunda (ePTFE) auxetic özelliğin varlığını gözlemlemişlerdir. Çekme gerilmesi uygulanan ePTFE numunelerinde Poisson oranının $\nu = -12$ 'ye kadar varan çeşitli negatif değerler aldığı görülmüştür. Şekil 2.5'te auxetic özelliğe sahip, genişletilmiş formdaki ePTFE'nin taramalı elektron mikroskopundaki mikro yapısı görülmektedir.



Şekil 2.5. Auxetic özelliğe sahip genişletilmiş formdaki ePTFE'nin içyapısı [36]

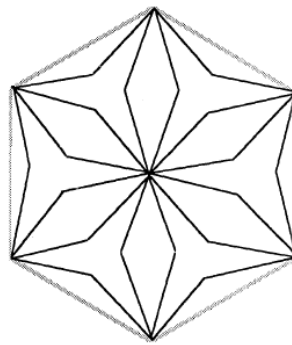
Evans ve ark. [37], bir önceki çalışmada incelenen ePTFE'de, auxetic davranışa yol açan mekanizmanın düzlemsel 2 boyutlu modellemesini yapmışlardır. Oluşturulan modelin, deneysel bulgularla büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. ePTFE'nin auxetic davranışını açıklayan 2 boyutlu model [37]

Choi ve ark. [9], auxetic köpük üretimine etki eden parametreler üzerinde durmuşlardır. Aynı yoğunluğa sahip endüstriyel polimer köpük numuneler (Scott köpük ve gri poliüretan-polyester köpük) ile yaptıkları denemelerde; malzeme türü, sıcaklık, işlem süresi, nem, kalıcı hacimsel sıkıştırma oranı, bağıl yoğunluk ve gözenek boyutları gibi parametreleri incelemişlerdir. Bunun yanında kalıcı hacimsel sıkıştırma oranı faktörü ile poisson oranı, elastisite modülü ve kayma modülü arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır. Ayrıca elde ettikleri auxetic köpükler için, uygulanan kalıcı hacimsel sıkıştırma oranı ile kırılma tokluğu arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu ifade etmişlerdir. Ürettikleri auxetic köpük malzemelerde $\nu = -0,7$ Poisson oranı değerini elde etmişlerdir.

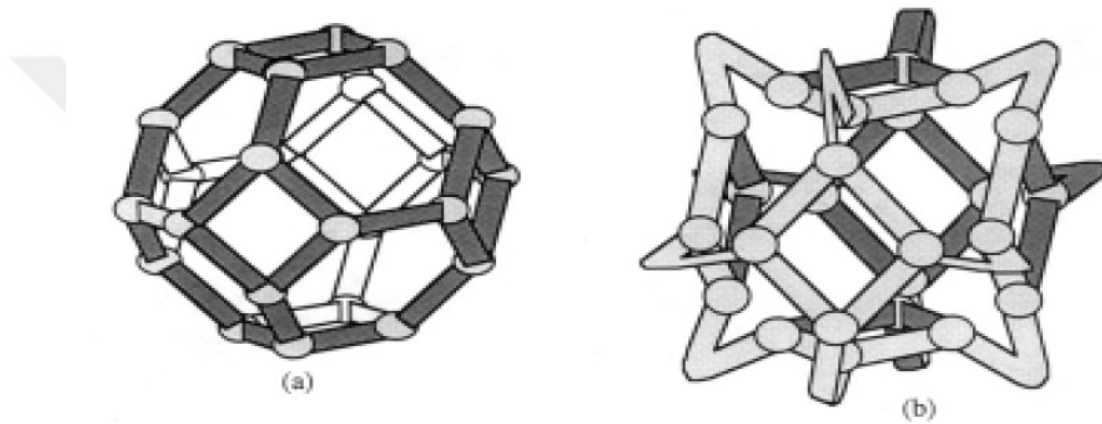
Lakes [38], negatif Poisson oranı değerine sahip yapı ve malzemelerde, auxetic özelliğin ortaya çıkmasında rol oynayan mikro yapı çeşitlerinin davranışsal ve biçimsel özelliklerini incelemiştir. Bu doğrultuda, Gibson ve ark.[32]'nin geliştirdiği girintili petek modeline alternatif olarak 2 boyutlu izotropik bir model öne sürmüştür (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Auxetic özelliğin görüldüğü anizotropik girintili petek modeline alternatif olarak geliştirilen izotropik model [38]

Choi ve ark. [39], yaptıkları diğer bir çalışmada, girintili gözenekli bakır köpük numunelerle $\nu = -0,8$ değerine sahip Poisson oranı elde etmişlerdir.

Choi ve ark. [40], çok yüzlü cisim (14 yüzlü) şeklinde tasarladıkları 3 boyutlu ideal köpük hücresi modeli (Şekil 2.8) üzerinde yaptıkları nümerik analiz sonuçları ile daha önce üretilen geleneksel ve auxetic açık gözenekli köpük malzemelerle yaptıkları deneysel çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Oluşturulan 3 boyutlu modelin, köpük malzemelerin deformasyon mekanizması ve mekanik davranışlarının açıklanmasında başarılı olduğu görülmüştür.

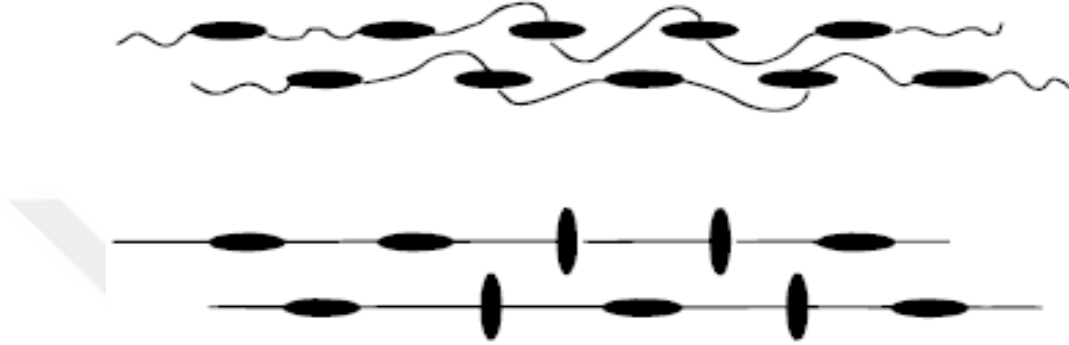


Şekil 2.8. (a) İdeal geleneksel köpük hücresi modeli, (b) ideal auxetic köpük hücresi modeli [40]

Lee ve ark. [41], geliştirdikleri homojenleştirme sonlu elemanlar yöntemiyle geleneksel ve auxetic özelliğe sahip girintili petek modellerinin doğrusal elastik tepkilerini analiz etmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, geleneksel petek modeli için; hacim kesirinin (matris hacminin tüm hacime oranı) elastisite modülü ile doğru orantılı olduğu, Poisson oranı ile ters orantılı olarak değerler aldığı görülmüştür. Ayrıca auxetic özelliğe sahip girintili petek modelinin Poisson oranının, modelin içbükey kenarının açı değerleriyle ilişkili olduğu ve elastisite modülünün modelin içbükey kenarının açı değerleriyle ters orantılı olarak değerler aldığı anlaşılmıştır.

He ve ark. [42], polimer malzemelere auxetic özelliğin adaptasyonu ve bu özelliğin kontrol edilebilmesi amacıyla moleküler düzeyde bir model öne sürmüşlerdir. Öne sürülen model, akışkan kristalli polimer zinciri üzerine, mesafeli olarak, bağlayıcı elemanlarla rijit çubuk şeklindeki moleküllerin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur.

Serbest durumda, üzerinde buldukları polimer zincirine paralel şekilde yönelim gösteren rijit çubuk moleküller, polimer zinciri gerilme etkisi altındayken merkezleri etrafında dönerek polimer zincirine dik pozisyona gelmektedir (Şekil 2.9). Auxetic özellik, bu mekanizma ile gözlemlenmiştir. Bu modelde, rijit çubuk moleküllerinin boyutları ve akışkan kristalli polimer zincirinin uzunluğu auxetic özelliğe etki eden parametrelerdir.



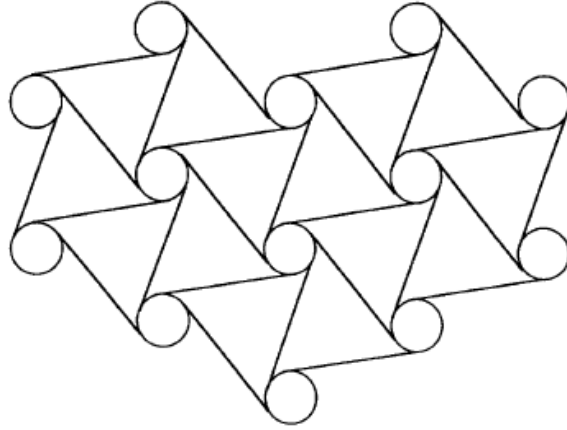
Şekil 2.9. Polimer malzemelere auxetic özelliğin adaptasyonu amacıyla oluşturulan akışkan kristalli polimer zinciri modeli [42]

Larsen ve ark. [43], negatif Poisson oranına sahip 2 boyutlu mikromekanizma ve malzeme yapılarının tasarım ve üretimine yönelik özgün bir yöntem üzerinde çalışma yapmışlardır. Mikromekanizma ve malzeme yapılarının tasarımı nümerik topoloji optimizasyonu metoduyla gerçekleştirilmiştir. Üretimde ise hassas silikon yüzey işleme prosesi kullanılmıştır. Bu yöntemle oluşturulan, periyodik ok başı şeklinde birim hücrelerden meydana gelen ağ örgü yapının (Şekil 2.10) nümerik modeli ile $\nu = -0,8$ değerinde Poisson oranı elde edilmiştir. Hassas silikon yüzey işleme prosesi ile üretilen prototip ile $\nu = -0,92$ değerinde Poisson oranı elde edilmiştir.



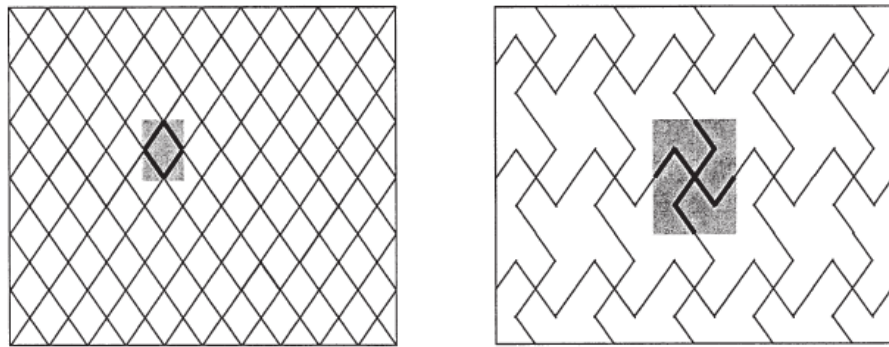
Şekil 2.10. Auxetic davranışın gözlemlendiği periyodik ok başı şeklinde birim hücrelerden meydana gelen ağ örgü yapısı [43]

Prall ve ark. [44], geliştirdikleri 2 boyutlu altıgen asimetrik model (şekil 2.11) için yaptıkları nümerik ve deneysel çalışmalar ile modelin geometrik yapısı ile mekanik özelliklerinin ilişkisini incelemişlerdir. Ayrıca gerinim miktarından bağımsız olarak düzlemde $\nu = -1$ değerinde Poisson oranı elde etmişlerdir.



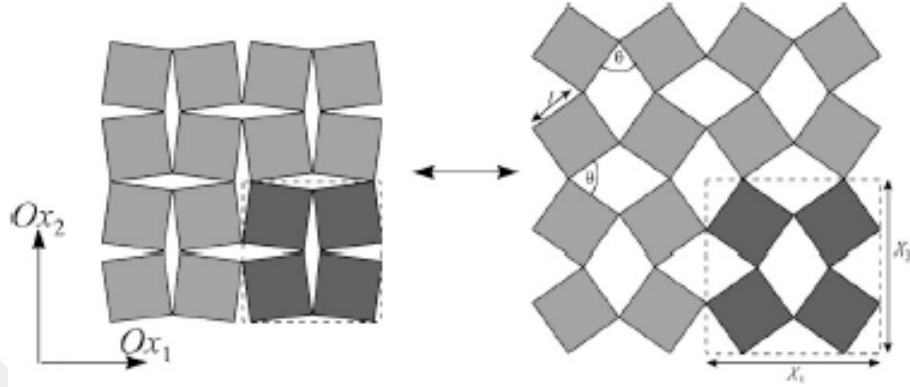
şekil 2.11. Auxetic özelliğin gözlemlendiği 2 boyutlu asimetrik altıgen model [44]

Smith ve ark. [45], üretilen ilk poliüretan auxetic köpük malzemenin, gerinime bağlı Poisson oranı değerlerinin ve gerilme-gerinim davranışının değerlendirilmesine yardımcı olacak 2 boyutlu bir nümerik model oluşturmuşlardır (şekil 2.12). Daha önce oluşturulan petek modeli ile karşılaştırıldığında, nümerik analiz sonuçlarının, bu model için, auxetic köpük malzeme ile yapılan deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmüştür.



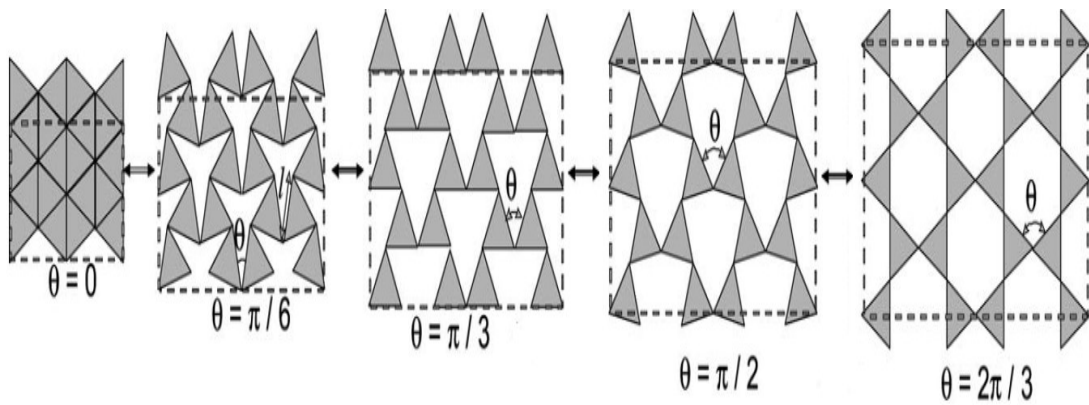
şekil 2.12. Poliüretan auxetic köpük malzemenin deneysel sonuçlarının açıklanması ve değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen model [45]

Grima ve ark. [46], auxetic davranışın gözlemlendiği kristalli yapıya sahip inorganik malzemelerin deformasyon mekanizmasını incelemek ve açıklamak amacıyla, rijit kare hücrelerden oluşan 2 boyutlu izotropik içyapı modeli geliştirmişlerdir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Hareketli kare hücrelerden oluşan auxetic yapının geometrisi [46]

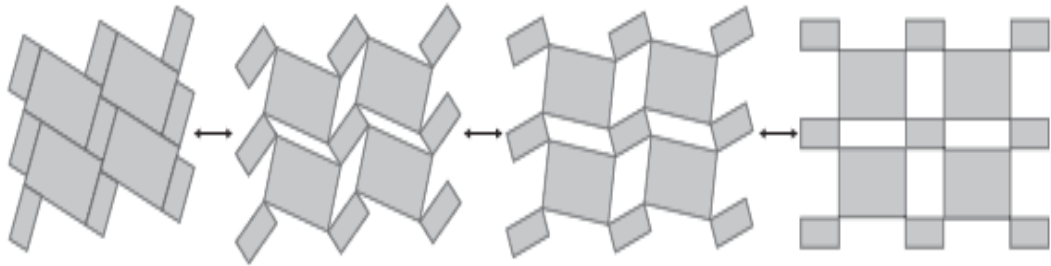
Grima ve ark. [47], auxetic davranış gösteren ABW ve JBW zeolitler başta olmak üzere auxetic özelliğe sahip birçok gerçek yapının tasarlanmasında kullanılabilmesi amacıyla 2 boyutlu izotropik içyapı modeli oluşturmuşlardır. Bu model, birbirlerine bağlantılı oldukları köşe noktaları etrafında dönerek hareket edebilen rijit üçgen hücrelerden meydana gelmektedir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Hareketli üçgen hücrelerden oluşan auxetic yapının geometrisi [47]

Tatlier ve ark. [48], fiber ağ örgü içyapıya sahip malzemelerde auxetic özellik potansiyelinin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Oluşturdukları 3 boyutlu nümerik model üzerinde yaptıkları çalışmada, fiber ağ örgü yapının sahip olduğu geometrik özelliklerin ve modele uygulanan aksnel bası (sıkıştırma) etkisinin, auxetic özelliğın nitel ve nicel dereceleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca, paslanmaz çelik malzemeli fiber ağ örgü içyapıya sahip sıkıştırılmış numuneye uygulanan çekme testlerinden elde edilen deneysel sonuçlarla nümerik analizden elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Grima ve ark. [49], silikalar, zeolitler, akışkan kristalli polimerler gibi birçok auxetic malzemenin özelliklerinin tespiti ve elde edilmesinde yararlanılabilecek farklı bir 2 boyutlu içyapı modeli sunmuşlardır (Şekil 2.15). İçyapı modelinin hücreleri farklı ebatlara sahip dikdörtgenlerdir.



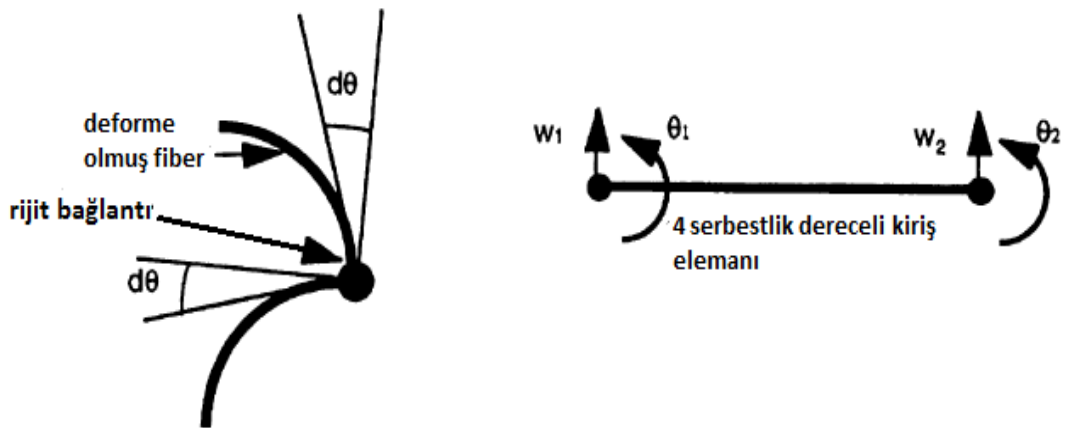
Şekil 2.15. Auxetic davranış elde edilen 2 boyutlu içyapı modeli [49]

3. MALZEME ve YÖNTEM

Bu bölümde, geleneksel fiber ağ örgü yapının oluşturulması, oluşturulan bu yapıdan auxetic fiber ağ örgü yapının elde edilmesi ve elde edilen yeni yapının mekanik özelliklerinin analizine yönelik kullanılan yöntem ele alınmıştır. Yapılan çalışma, fiber ağ örgü yapının düzlemsel 2 boyutlu nümerik modelinin oluşturulması ve daha sonra, oluşturulan modelin sonlu elemanlar yöntemi analizi ile mekanik özelliklerine ait verilerin elde edilmesi olmak üzere 2 kısımdan oluşmaktadır.

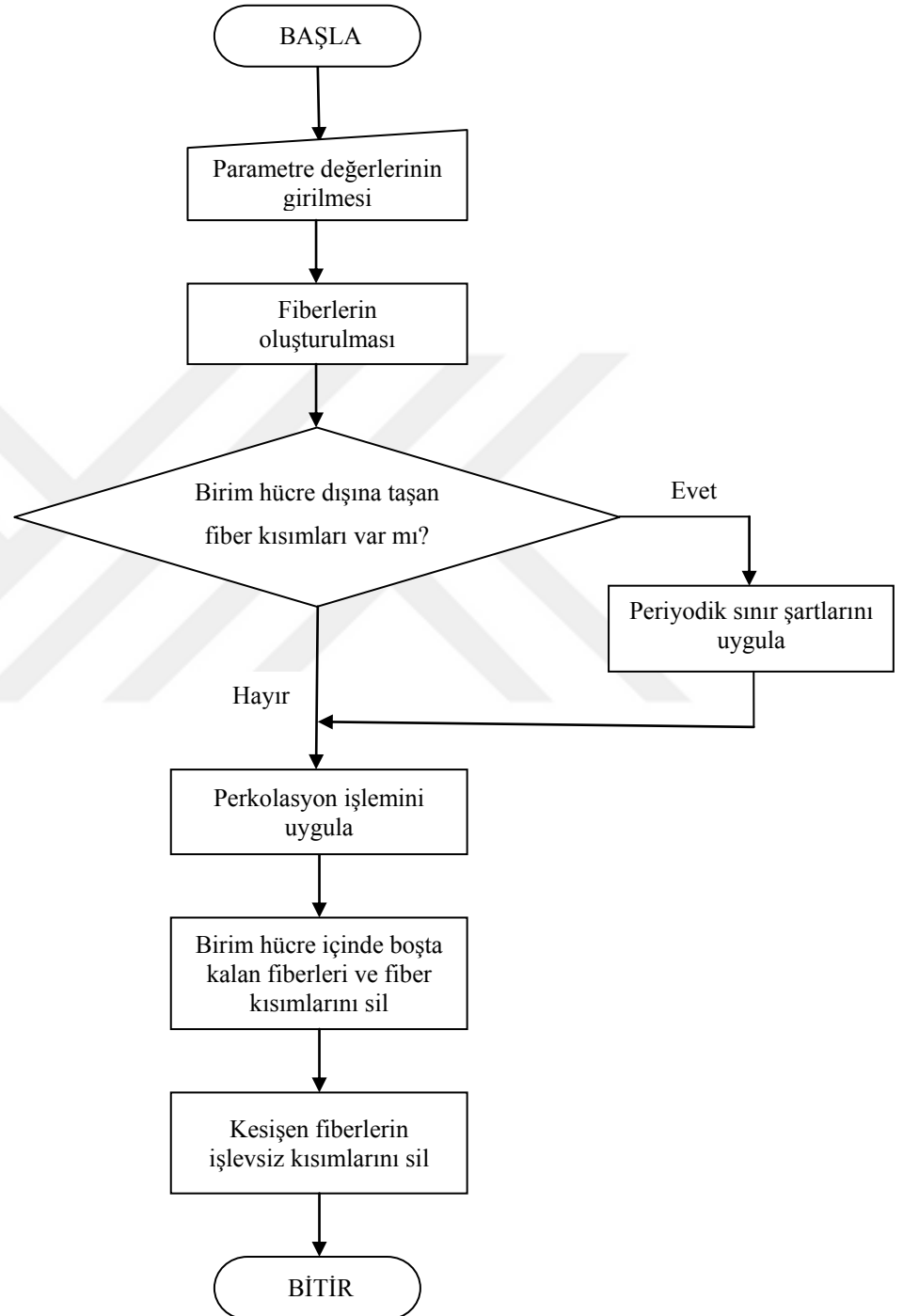
3.1. Fiber Ağ Örgü Yapı Nümerik Modelinin Oluşturulması

Fiber ağ örgü yapının 2 boyutlu nümerik modelinin oluşturulmasında Sastry ve ark. [50]'nin geliştirdiği yöntemden yararlanılmıştır. Bu yöntem özellikle, içyapısı rastgele bir düzende yerleşime sahip fiberlerden meydana gelen malzemelerin deformasyon davranışlarını incelemek, bu tip malzemelerin geliştirilebilmesi ve uygun maliyetle üretilmesine yardımcı olmaya yönelik bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, oluşturulan nümerik modelde bulunan fiberlerde deformasyon sonucu burkulma ve gevşeme meydana gelmediği kabul edilmiştir. Bununla birlikte, deformasyon durumunda fiberler birbirlerinin üzerine eğilebilmektedir. Fiberler arası noktasal bağlantılar rijit olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Nümerik modeldeki bir fiberin deformasyon davranışı ve serbestlik dereceleri [50]

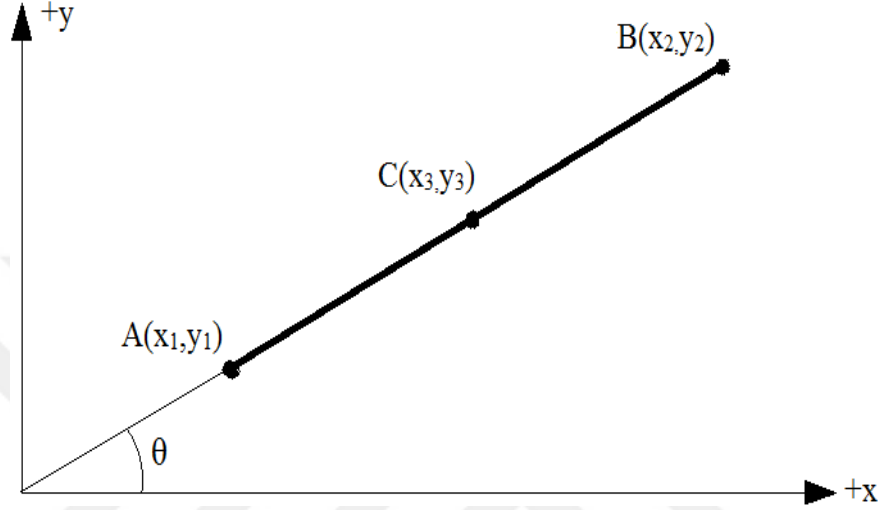
Nümerik modelin oluşturulmasında MATLAB® adlı nümerik hesaplama programından yararlanılmıştır. Oluşturulan MATLAB® kodunun akış şeması Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Nümerik modelin oluşturulduğu MATLAB® kodunun akış şeması

Modelin oluşturulmasında uygulanan yöntemin aşamaları şu şekildedir:

- ❖ Fiber ağ örgü yapının nümerik modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle fiberlerin ve model düzleminin (temsili birim hücre) tanımlanması gereklidir. Fiberler 2 boyutta doğrusal çizgiler ile temsil edilebilir (Şekil 3.3).



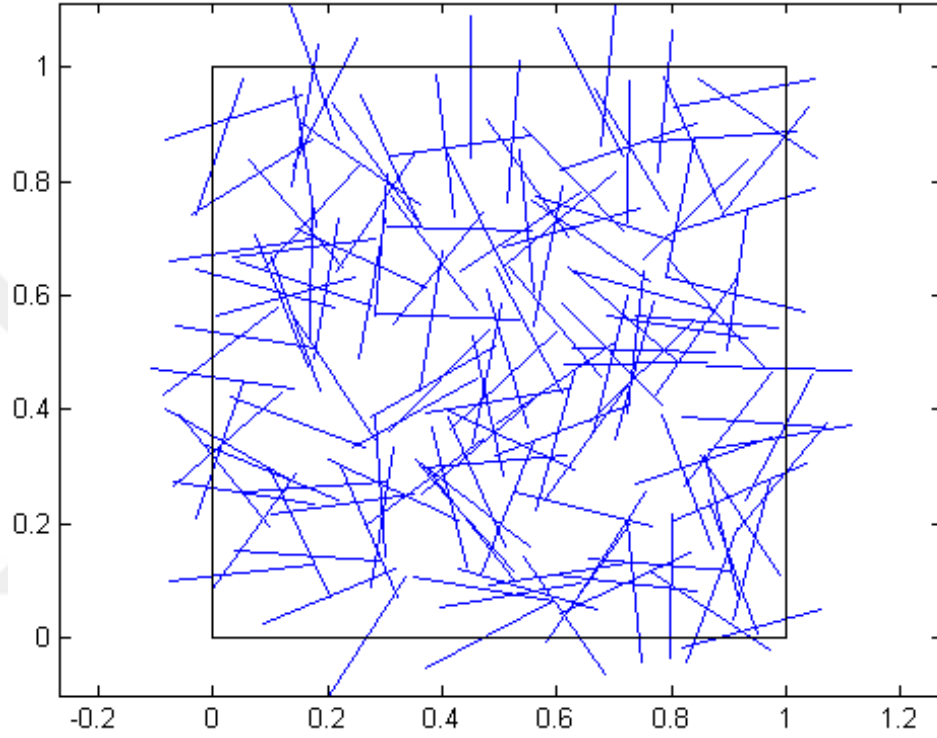
Şekil 3.3. Nümerik modellemede bir fiberin doğrusal çizgi ile temsil edilmesi

Bu doğrultuda fiberlerin oluşturulması için gerekli olan parametreler: fiberleri temsil eden doğrusal çizgilerin merkezlerinin koordinat noktası değerleri (x_3, y_3) ve uç noktalarının koordinat noktası değerleri $[(x_1, y_1), (x_2, y_2)]$, x-y düzlemi üzerindeki fiberlerin yönelim açısı değerleri (θ) , fiberlerin uzunluk değeri (L) ve fiber enkesit çap değeri (d) 'dir. Doğrusal çizgilerin merkezlerinin koordinat noktası değerleri ve x-y düzlemi üzerindeki yönelim açısı değerleri, kullanıcı tarafından belirlenen değer aralığında kod tarafından rastgele üretilir. Doğrusal çizgilerin uzunluk değeri ise kullanıcı tarafından girilir. Doğrusal çizgilerin uç noktalarının koordinat noktası değerleri denklem (3.1) ve denklem (3.2) ile tanımlanır.

$$x_{1,2} = x_3 \pm \frac{L}{2} \times \cos(\theta) \quad (3.1)$$

$$y_{1,2} = y_3 \pm \frac{L}{2} \times \sin(\theta) \quad (3.2)$$

Temsili birim hücre, x-y düzlemi üzerinde birim karelik bir alan olarak belirlenmiş olup, üniform fiber ağ örgü modele ait birim eleman niteliğindedir. MATLAB® kodu çalıştırıldığında, birim karelik alan içerisinde kalacak şekilde, kod tarafından doğrusal çizgilerin merkez noktaları rastgele atanır. Ardından, tanımlı bir aralıktaki açı ve uç noktası koordinat değerleri ile rastgele yerleştirilmiş fiberler oluşturulur (Şekil 3.4).



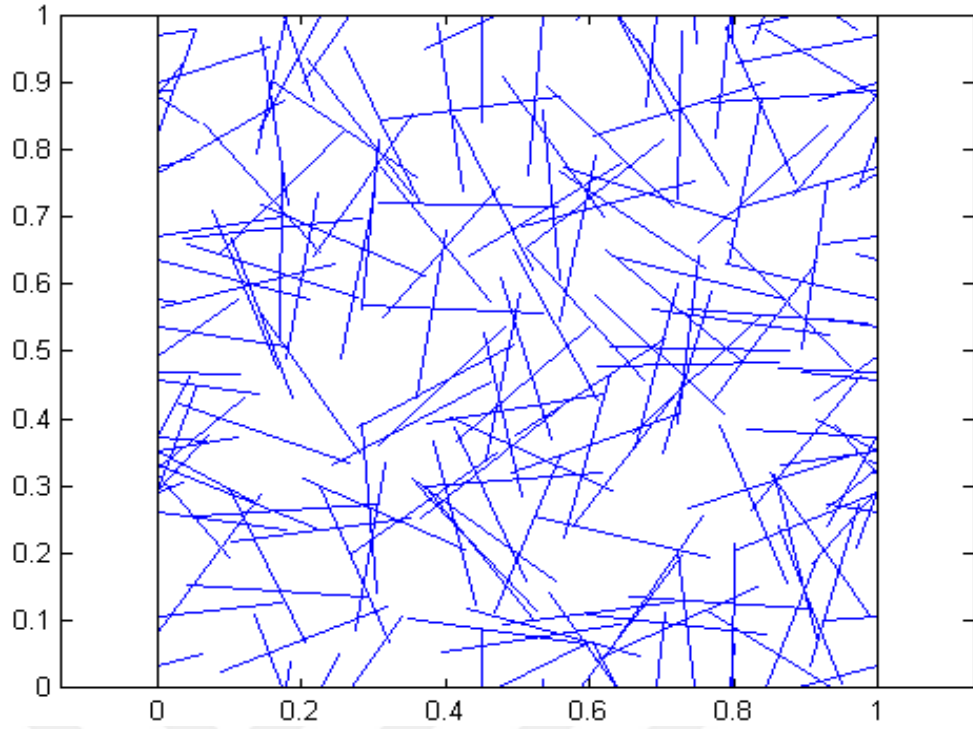
Şekil 3.4. Birim hücre içerisinde rastgele üretilen fiberler

Rastgele düzende şekillenen nümerik fiber ağ örgü yapı modellerde sistemin içyapısını oluşturan fiberler arasında, uygulanan kuvvetin iletilebilmesi amacıyla, kesintisiz bağlantının oluşabilmesi için, fiber ağ örgü yapıya ait yapısal parametrelerin (fiber uzunluğu, fiber sayısı, fiber yönelim açıları ve fiber en-kesit çap değeri) belli bir sınır değerinin üzerinde olması gerekmektedir. Bu sınır değeri ‘perkolasyon eşik değeri’ olarak tanımlanır [48]. Perkolasyon eşik değerinin altındaki yapısal parametre değerleri için nümerik modeller oluşturulamamaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada nümerik modellerin oluşturulabilmesi için, rastgele seçilen en uygun parametre değerleri Çizelge 3.1’deki gibidir.

Çizelge 3.1. Nümerik modellerin oluşturulmasında kullanılan parametreler ve parametre değerleri

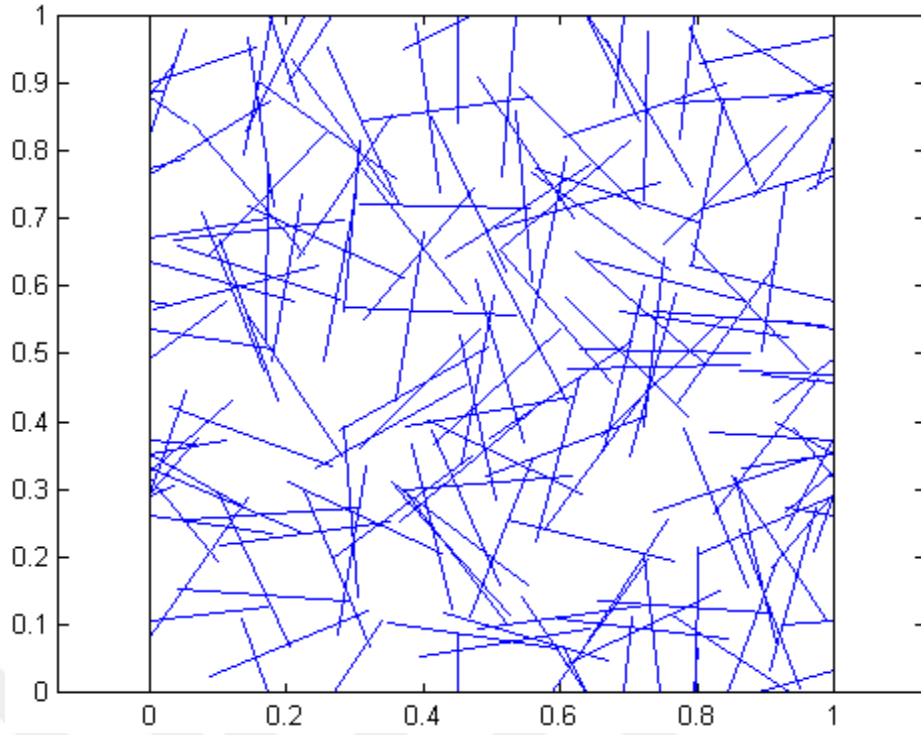
Parametre türü	Parametre değerleri
Doğrusal çizgilerin (fiberler) merkezlerinin koordinat noktası değerleri, ($\mathbf{x}_3, \mathbf{y}_3$)	0 ile 1 aralığında MATLAB® kodu tarafından rastgele atanan değerler
x-y düzlemi üzerindeki fiberlerin yönelim açısı değerleri, (θ)	$\pm \frac{\pi}{12}, \pm \frac{\pi}{6}, \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{\pi}{3}$ ve 0 ile $\frac{\pi}{2}$ aralığındaki açılar
Bir fiberin uzunluk değerleri, (L)	0,2
Doğrusal çizgilerin (fiberler) uç noktalarını koordinat noktası değerleri, ($\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}_2$)	$\mathbf{x}_3, \mathbf{y}_3, \theta, L$ giriş değerlerine göre MATLAB® kodu tarafından üretilen değerler
Fiberlerin uzunluk-enkesit çap oranı, (L/d)	10, 20, 40, 80
Nümerik modellerdeki fiber sayısı, (N)	1600

- ❖ Analizde tüm sistem yerine, tüm sistemi temsil eden özdeş birim hücrelerden bir tanesi ele alınmıştır. Bu durumda makro düzeyde incelenen yeni sistem için, bu sistemdeki tüm fiberlerin özellikleri ve davranışları da analiz için belirleyicidir. Bu sebeple sistemin tüm elemanları dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Bu amaçla, modellenen birim hücre için periyodik sınır şartları uygulanmıştır. Periyodik sınır şartlarının uygulanması, birim hücreye fiberlerin atanmasından sonra, hücre sınırları dışına taşan fiber kısımlarının, taşıdıkları noktanın tam karşısındaki noktadan birim hücre içerisine geri aktarılması işlemini kapsar (Şekil 3.5).

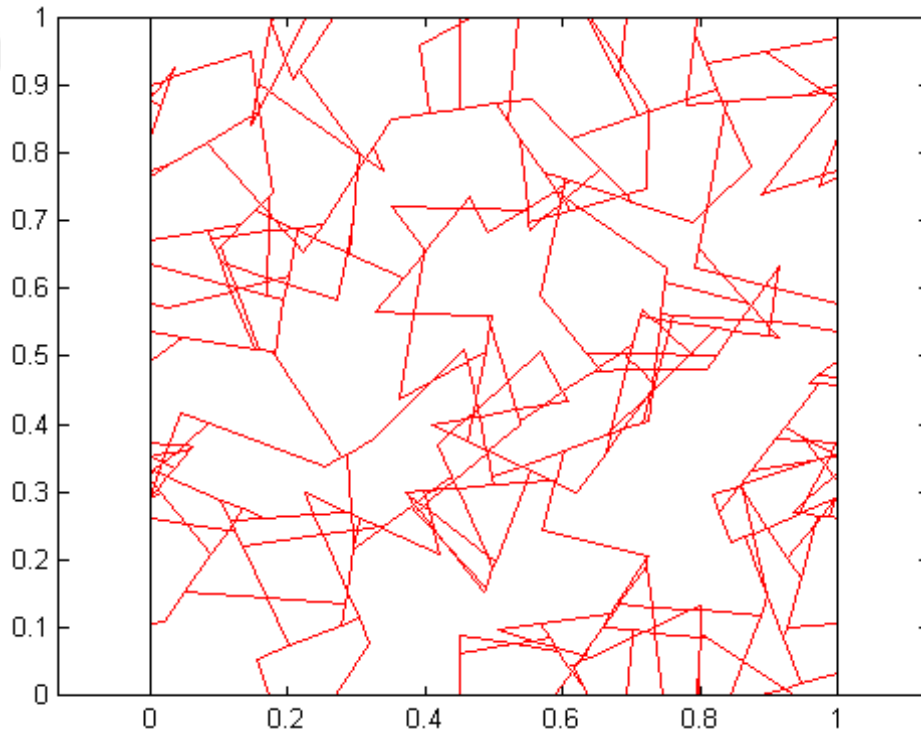


Şekil 3.5. Birim hücre sınırları dışına taşan fiber kısımları için periyodik sınır şartlarının uygulanması

- ❖ Periyodik sınır şartlarının uygulanmasından sonra, birim hücre içerisinde birbirleriyle temas halindeki tüm fiber yığınlarının birbirleriyle rijit bağlantı kurmasını sağlamak ve dolayısıyla modelde uçtan uca kesintisiz fiber bağlantısı oluşturulmak amacıyla perkolasyon işlemi uygulanır. Perkolasyon işlemi ile fiberler kesişim noktalarında, noktasal rijit bağlantılarla birbirine bağlanır. Böylece birbirinden bağımsız olarak oluşturulan fiberler kaynaşarak, sistemin mekanizması olan içyapısı oluşturulmuş olur. Daha sonra, periyodik sınır şartlarının uygulanması sonucu birim hücre içerisine tekrar aktarılan ve herhangi bir fiber yığına ait olmayan (boşta kalan) fiber kısımları ve fiberler sistemin deformasyon mekanizmasına dahil olmayacağı ve yüklenme durumunda işlev göstermeyeceği için silinir (Şekil 3.6).
- ❖ Son olarak, birbirleriyle kaynaşmış fiberlerin, birbirleriyle kesişen uç kısımları (işlevsiz parçalar) silinir (Şekil 3.7). Bu şekilde düzlemsel 2 boyutlu nümerik model elde edilmiş olur.



Şekil 3.6. Perkolasyon işleminin uygulanması ile bağımsız fiberlerin birbirleriyle kaynaştırılması ve ardından herhangi bir fiber yığına ait olmayan fiberlerin ve fiber kısımlarının silinmesi



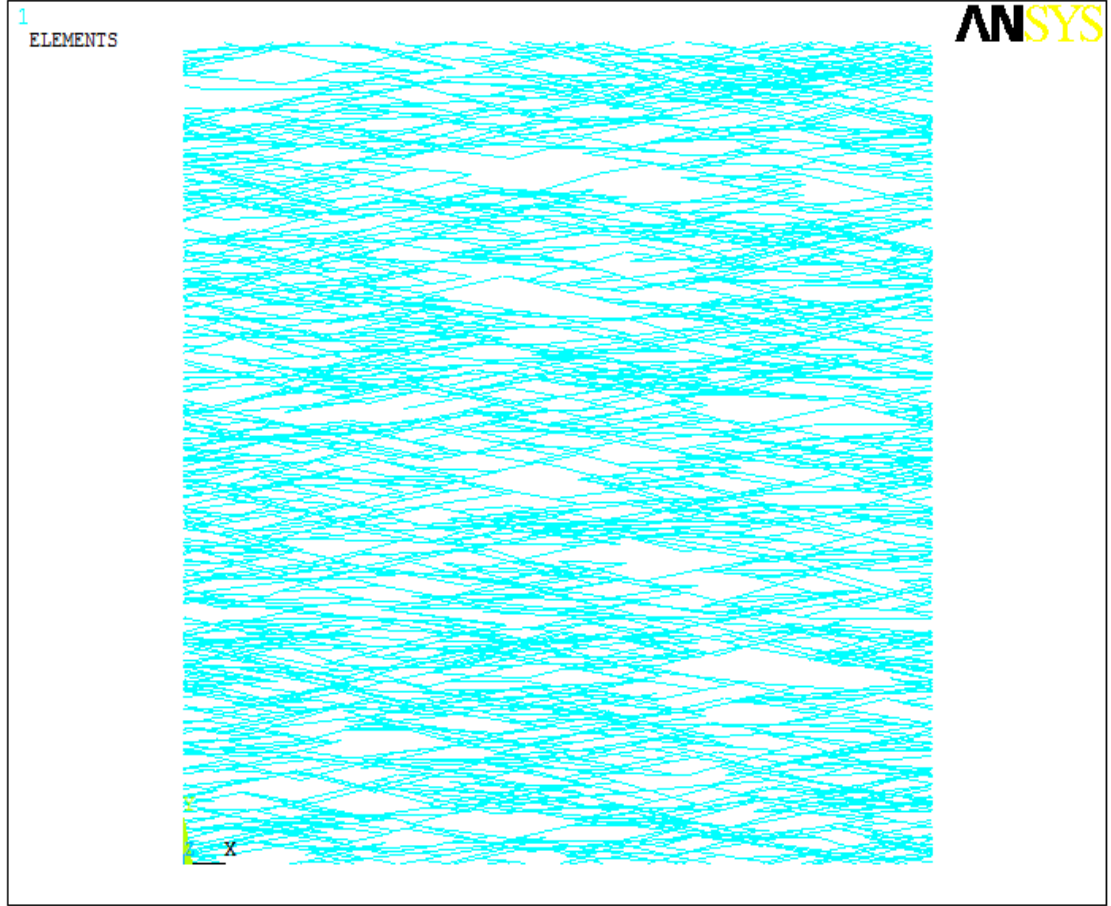
Şekil 3.7. Perkolasyon yığındaki birbiriyle kesişen fiberlerin yük taşımayan uç kısımlarının silinmesi ve nümerik modelin son hali

3.2. Fiber Ağ Örgü Yapının Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizi

Bu kısımda, bir önceki kısımda bahsedilen parametrelerin çeşitli kombinasyonları ile oluşturulan düzlemsel 2 boyutlu nümerik fiber ağ örgü yapı modellerinin sonlu elemanlar yöntemi ile deformasyon analizleri yapılarak elde edilen veriler, daha sonraki bölümde auxetic özelliğe sahip fiber ağ örgü yapının mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla kullanılacaktır. Deformasyon analizlerinde kullanılan analiz tipi lineer statik analizdir. Lineer statik analiz, yük uygulanan modelde plastik deformasyon durumunu göz önünde bulundurmadan, uygulanan yüklerle doğru orantılı olarak meydana gelen deformasyonu çıktı olarak kullanıcıya sunar.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan ANSYS® Mechanical APDL (ANSYS® Parametric Design Language) 14.0 programından yararlanılmıştır. ANSYS®, bir ürünün tasarım aşamasından sonra ve üretiminden önce çeşitli mühendislik analizlerinin yapılmasında kullanılan bir benzetim programıdır.

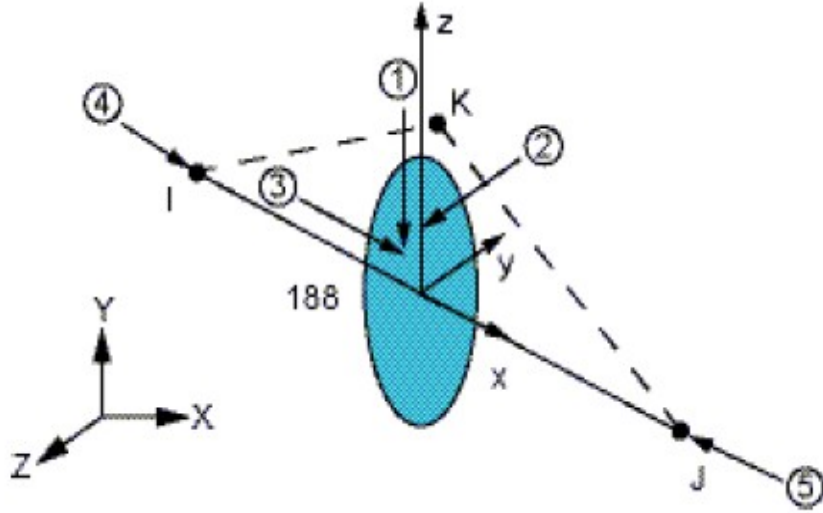
ANSYS® Mechanical APDL 14.0 programı, üzerinde çalışılacak modelin program ara yüzü ve menüleri kullanılarak oluşturulabileceği gibi, bazı uyumlu benzetim programlarında oluşturulan modellerin de dışarıdan ANSYS® programına aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca bir text dosyasında ANSYS® programına özgü uygun komut kodları ve modeli açıkça tanımlayan bilgilerden oluşan bir modül hazırlanarak programda çalıştırılması yoluyla, söz konusu modelin benzetim ortamına aktarılmasına da imkan vermektedir. Bu doğrultuda MATLAB® programı tarafından oluşturulan nümerik modeller, yine MATLAB® programı tarafından text dosyası içerisinde oluşturulan bu modellere ait eleman (fiber) ve düğüm noktası (node) bilgileri ve programa özgü uygun komut kodları kullanılarak hazırlanan modül aracılığıyla, ANSYS® Mechanical APDL 14.0 programına aktarılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. 2 boyutlu nümerik fiber ağ örgü yapı modelinin ANSYS® programına aktarılması

Fiber ağ örgü yapı modelindeki fiberlerin her biri dairesel enkesitli ve aynı çap değerine sahip doğrusal kiriş elemanları olarak modellenmiştir. Bu doğrultuda, fiberlerin tanımlanmasında eleman tipi olarak BEAM 188 seçilmiştir.

BEAM 188, hem narin yapıları hem de kalın enkesitli kiriş yapılarının analizi için uygun bir eleman tipidir. Bu eleman tipi, Timoshenko kiriş teorisi (birinci dereceden kayma deformasyonu teorisi) temel alınarak oluşturulmuştur. Hem deneysel hem de nümerik analizler için tercih edilebilir. Elastik, plastik, sünme ve diğer doğrusal olmayan malzeme tipleri için kullanılabilir. BEAM 188 eleman tipi; x, y, z doğrultularında öteleme ve x, y, z doğrultularında dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 3.9’da BEAM 188 eleman tipinin geometrisi, düğüm noktalarının konumu (I ve J) ve taşıdığı kuvvetlerin doğrultuları gösterilmiştir [51].

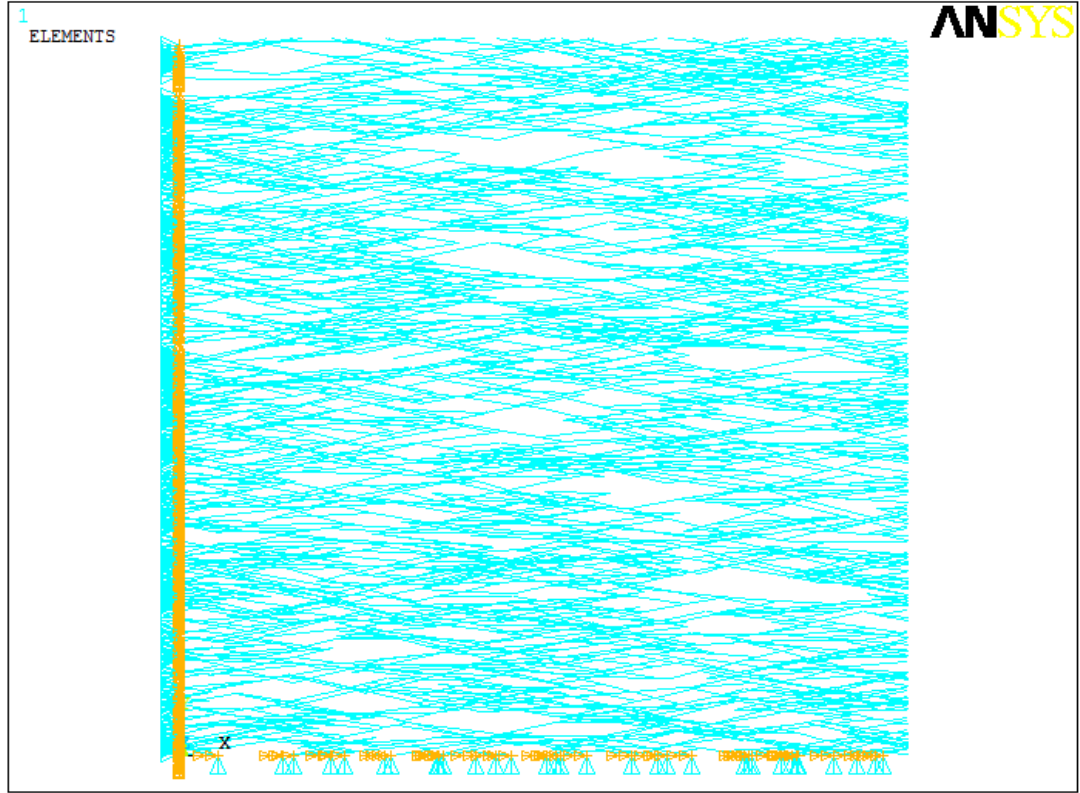


Şekil 3.9. BEAM 188 eleman tipi [51]

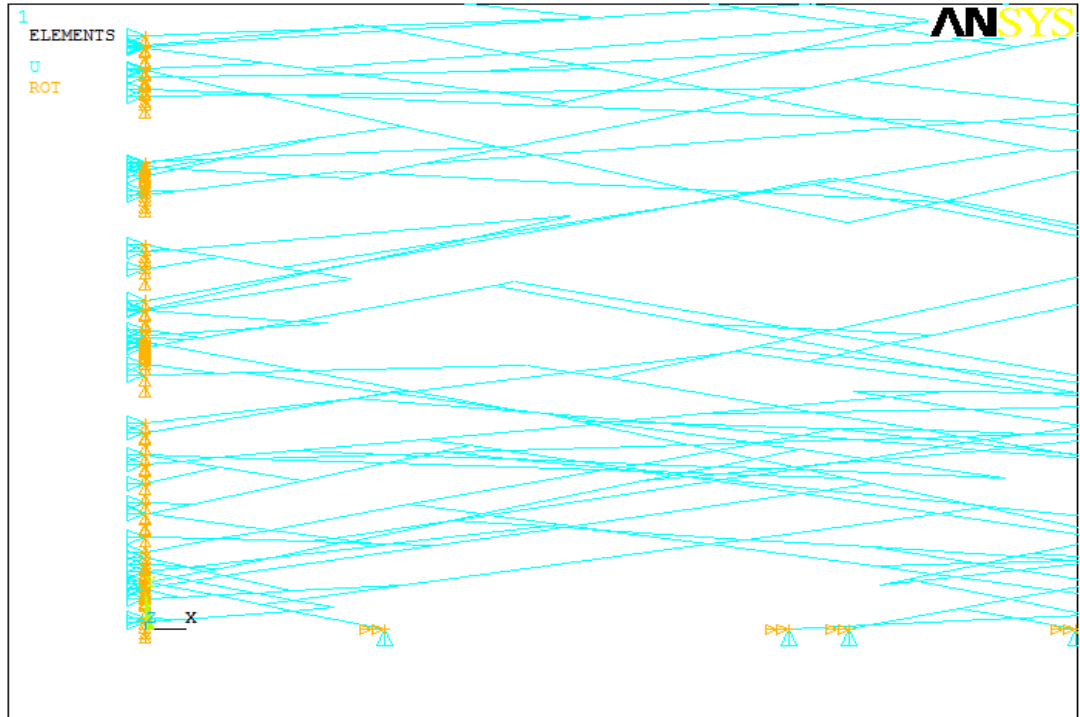
Ağ örgü yapıdaki fiberler paslanmaz çelik malzemeden olup, malzeme özelliklerinden elastisite modülü $E = 200$ GPa ve Poisson oranı $\nu = 0,3$ olarak tanımlanmıştır. Fiber malzemesinin Hook kanununa uyumlu olacak şekilde lineer elastik ve izotropik davranış gösterdiği kabul edilmiştir.

Fiber ağ örgü model, benzetim ortamına aktarıldıktan sonra, $x = 0$ ve $y = 0$ 'da simetrik sınır şartları uygulanmıştır. Böylece x ve y eksenleri boyunca (sınırlardaki) düğüm noktalarının hareket serbestlikleri kısıtlanmıştır (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11).

Ayrıca, ele alınan 2 boyutlu modelin analizi ve elde edilecek sonuçların değerlendirilmesinde x-y düzlemi etkin olacağı için, uygulanacak deplasmanlar sonucunda diğer düzlemlere göre de deformasyon meydana gelmemesi için, düğüm noktalarının x eksenine göre dönme, y eksenine göre dönme ve z eksenine doğrultusundaki deplasman hareketi serbestlikleri kısıtlanmıştır.

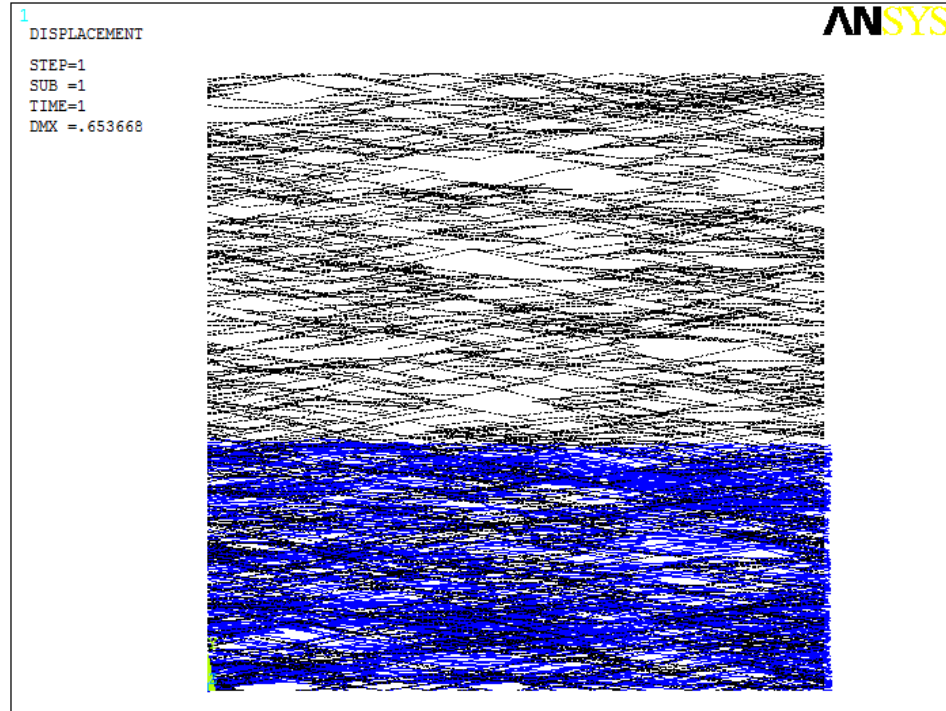


Şekil 3.10. $x = 0$ ve $y = 0$ boyunca fiber ağ örgü yapıya simetrik sınır şartlarının uygulanması



Şekil 3.11. İncelenen fiber ağ örgü yapıya simetrik sınır şartlarının uygulanması

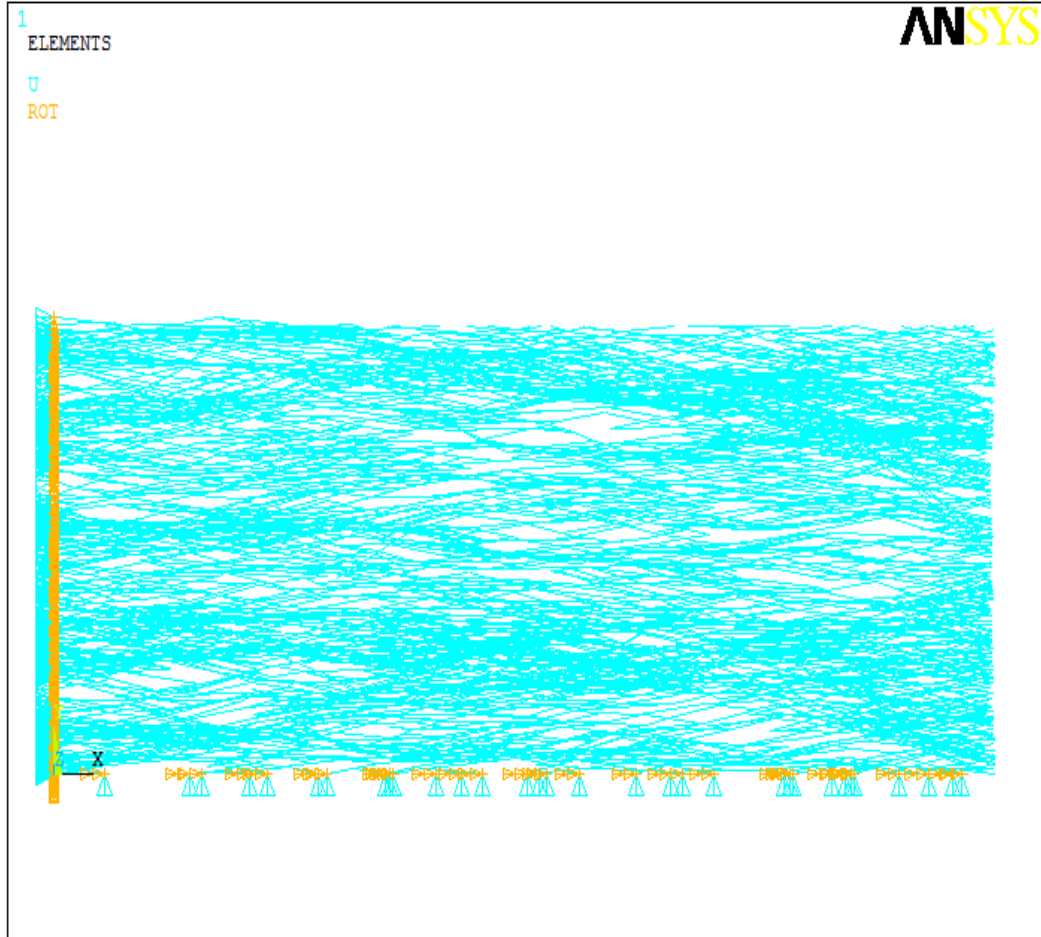
Fiber ağ örgü yapısı; fiber sayısı, fiberlerin boyu, fiberlerin yönelim açısı, fiberlerin enkesit çap değerleri gibi parametrelerin değişen değerleri için farklı seviyelerde gözenekli bir yapıya sahip olmaktadır. Bu durum ise, ağ örgü yapısının y eksenini doğrultusunda (-y yönünde) sıkıştırılabilmesine imkân sağlamaktadır. Geleneksel fiber ağ örgü yapısına auxetic özelliğın kazandırılmasında önemli rol oynayan parametrelerden biri de fiber ağ örgü yapısını -y yönünde sıkıştırma işlemidir. Böylece auxetic özelliğe sahip fiber ağ örgü yapısının başlangıç hali elde edilebilir. Bunun için ağ örgü yapısının $y = 1$ doğrusu boyunca yer alan düğüm noktalarına -y yönünde deplasman (eksenel basma) uygulanmıştır. Şekil 3.12’de geleneksel fiber ağ örgünün sıkıştırılmadan önce (siyah) ve sıkıştırıldıktan sonraki (mavi) şekilsel durumları görülmektedir.



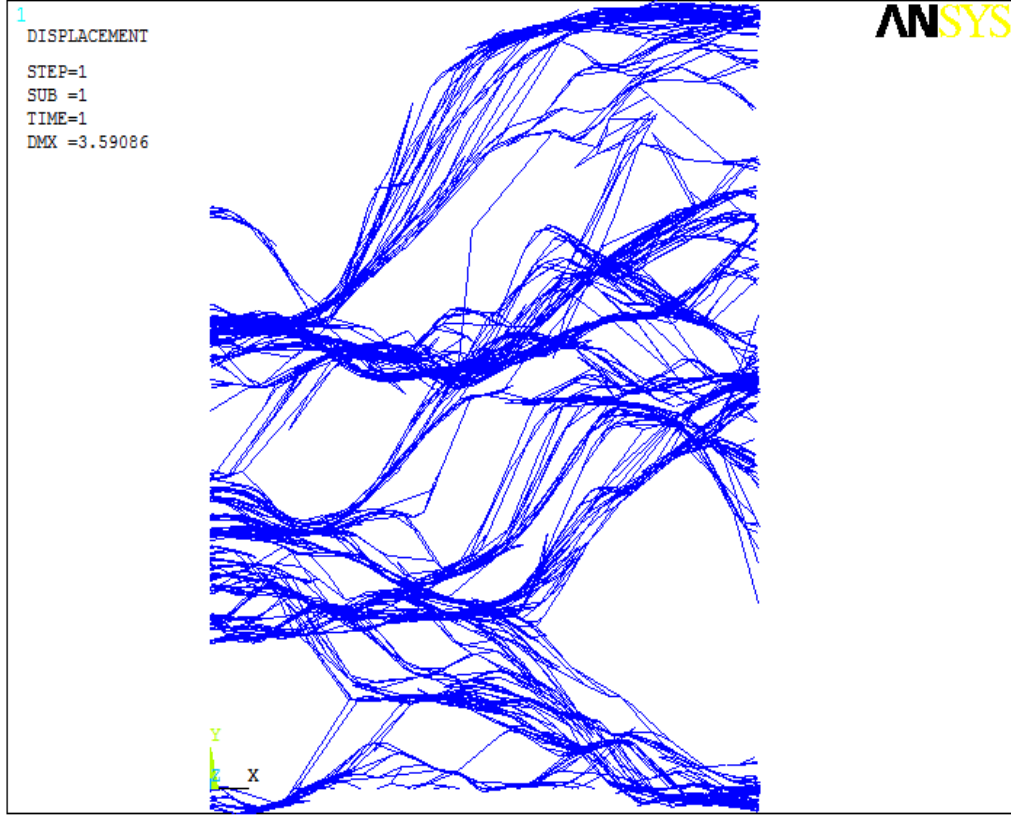
Şekil 3.12. Fiber ağ örgü yapısının sıkıştırma işleminden önceki (siyah) ve sonraki (mavi) şekilsel durumları

Geleneksel fiber ağ örgü yapısının sıkıştırılması işleminden sonra elde edilen yeni model, mekanik özelliklerinin inceleneceği auxetic fiber ağ örgü yapısı olarak tekrar ANSYS® programına aktarılmıştır. Benzetim ortamına aktarılan yeni model ve bu modele uygulanacak gerilme işlemi, analiz işlemlerinin devamı olduğu için simetrik sınır şartları ($x = 0, y = 0$ 'da) tekrar uygulanmıştır (Şekil 3.13).

Son olarak auxetic fiber ağ örgü yapının mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla nümerik modele, x eksenine doğrultusundaki serbest uçlarına +x yönünde %40 miktarında deplasman (eksenel çekme) uygulanmıştır. Şekil 3.14'te auxetic fiber ağ örgü yapıda eksenel çekme etkisi sonucu meydana gelen fiziksel tepki görülmektedir.



Şekil 3.13. Geleneksel fiber ağ örgü yapının sıkıştırılması ile elde edilen auxetic yapı



Şekil 3.14. Auxetic fiber ağ örgü yapının aksenal çekme etkisine verdiği fiziksel tepki

4.BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, fiber ağ örgü yapının geometrisini teşkil eden parametrelerin ve fiber ağ örgü yapıya uygulanan –y yönündeki deplasmanın (eksenel basma miktarı), auxetic özelliğın nitelik ve niceliğine olan etkisi incelenerek sayısal sonuçlar ve bu sonuçları görsel olarak destekleyen şekiller sunulmuştur. Her seferinde, ele alınan tek bir parametrenin değişen değerleri için deformasyon analizleri yapılarak, elde edilen verilerle auxetic fiber ağ örgü yapıların Poisson oranı ve elastisite modülü değerleri tayin edilmiştir. Nümerik modellerin oluşturulmasında kullanılan uygun bir parametreler kombinasyonu ile MATLAB® programı tarafından her seferinde üretilen farklı modellerin fiber dizilimleri de farklı olacağından, fiber ağ örgü yapıların Poisson oranı ve elastisite modüllerinin tayini için aynı parametreler kullanılarak oluşturulan 5 farklı model için deformasyon analizleri yapılmıştır. 5 farklı modelin deformasyon analizlerinden elde edilen veriler ile Poisson oranı ve etkin elastisite modülüne ait ortalama değerler ve bu değerlere ait standart sapma miktarları hesaplanmıştır.

Bir nümerik model için Poisson oranı değerinin hesaplanmasında, +y yönünde modelin en üst seviyesindeki düğüm noktalarının koordinat değerlerinden yararlanılmıştır. Modele –y yönünde bası uygulandıktan sonra, +x yönünde çekme uygulanmadan önceki ve çekme uygulandıktan sonraki durumlarda düğüm noktalarının ilk ve son koordinat değerlerinin toplamının aritmetik ortalaması alınarak, denklem (4.1)'den modele ait Poisson oranı değeri hesaplanmıştır.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\frac{y_s - y_i}{x_s - x_i}}{x_i} \quad (4.1)$$

Nümerik modellerin etkin elastisite modüllerinin hesaplanmasında ise denklem (4.2)'den ve denklem (4.3)'ten yararlanılmıştır [52].

$$E' = \frac{E}{E_f} \quad (4.2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sum F_x/A_0}{\Delta x/x_0} \quad (4.3)$$

Denklem (4.2)'deki E_f terimi, fiber malzemesinin elastisite modülü değeridir. Denklem (4.3)'deki $\sum F_x$ terimi, fiber ağ örgü yapı modelinin +x yönünde çekilmesi sonucu oluşan toplam mesnet reaksiyon kuvvetidir. A_0 , $x = 0$ doğrusu boyunca fiber en kesit alanlarının toplamı olup birim karedir.

4.1. Fiber Yönelim Açısı Parametresinin Auxetic Özelliğe Etkisi

Geleneksel fiber ağ örgü yapıdan elde edilen auxetic fiber ağ örgü yapının mekanik özelliklerine doğrudan etki eden yapısal parametrelerden biri, ağ örgü yapıdaki fiberlerin yönelim açılarının değeridir. Oluşturulan 2 boyutlu geleneksel fiber ağ örgü yapı modellerinde, fiber yönelim açısı değerleri olarak $\pm\pi/12$, $\pm\pi/6$, $\pm\pi/4$, $\pm\pi/3$, $\pm\pi/2$ kullanılmıştır. Her bir açı değeri için 5 farklı model oluşturulmuştur. Tüm modeller için; modellere uygulanan bası miktarı ($C = \%60$) ve diğer bir yapısal parametre olan fiberlerin uzunluk/çap oranı ($L/d = 40$) parametreleri sabit bir değerde tutularak yapılan deformasyon analizleri ile fiber yönelim açısı değerlerinin, fiber ağ örgü yapıların Poisson oranı değerlerine etkisini gösteren sayısal sonuçlar elde edilmiş ve Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Ayrıca, fiber yönelim açısı değerlerinin, ağ örgü yapıların elastisite modülü değerlerine etkisini gösteren sayısal sonuçlar Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

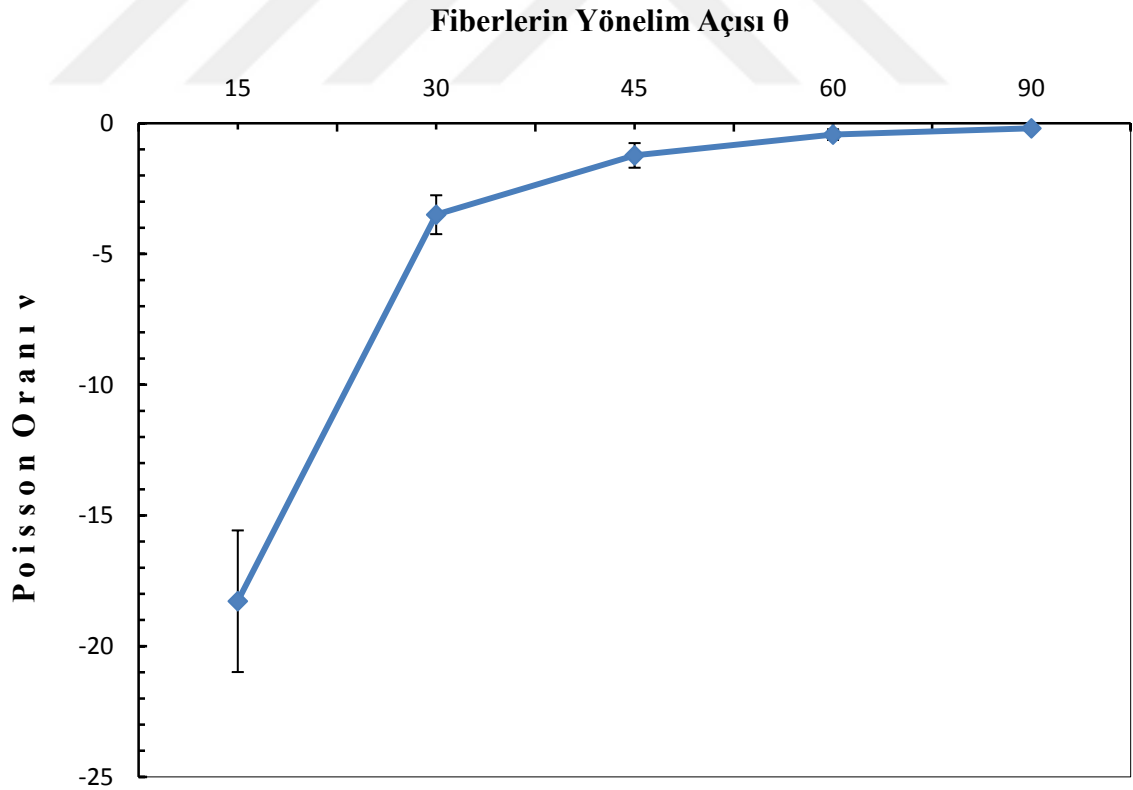
Çizelge 4.1. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarda fiber yönelim açılarının Poisson oranına etkisi

Grup	Fiber Sayısı (N)	Fiber Uzunluğu (L)	Fiber Uzunluk/Çap Oranı (L/d)	Fiberlerin Yönelim Açıları (θ)	Bası Miktarı (C)	Poisson oranı değerleri (ν_{ort})	Standart Sapma Miktarı
1	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,6	-18,28	2,708
2	1600	0,2	40	$\pm\pi/6$	0,6	-3,5	0,743
3	1600	0,2	40	$\pm\pi/4$	0,6	-1,23	0,471
4	1600	0,2	40	$\pm\pi/3$	0,6	-0,44	0,204
5	1600	0,2	40	$\pm\pi/2$	0,6	-0,196	0,057

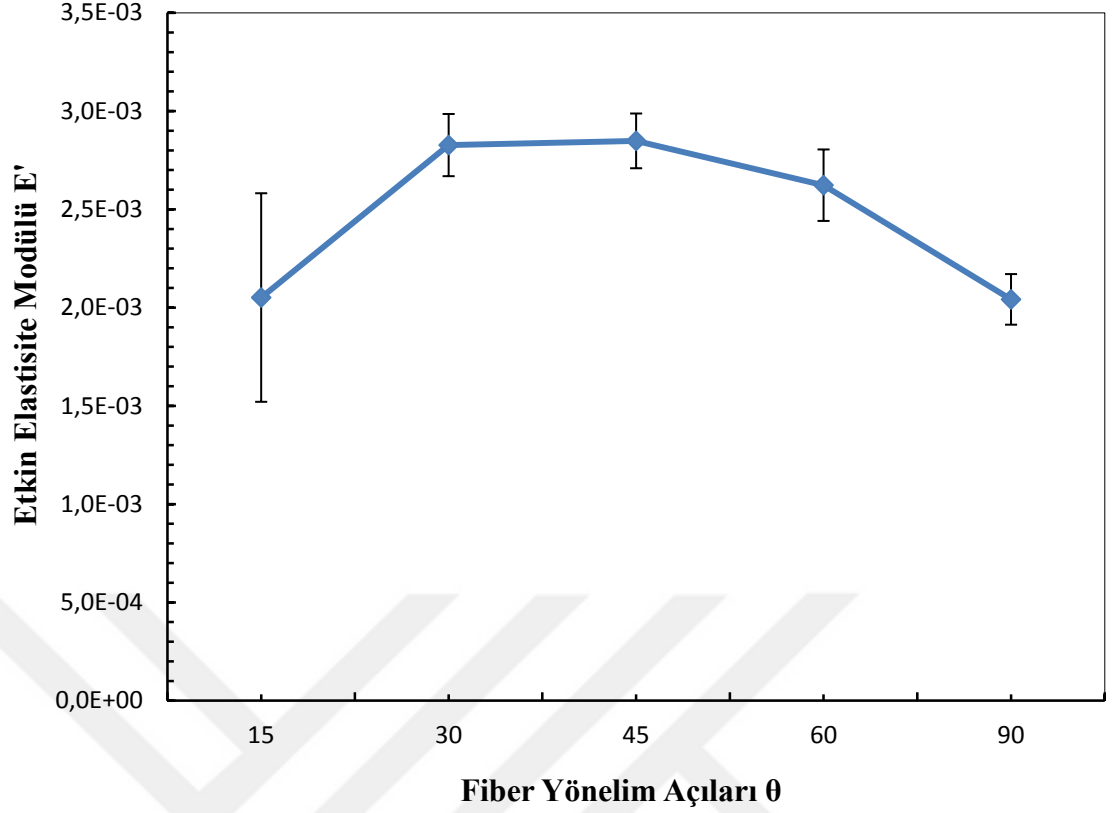
Çizelge 4.2. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber yönelim açısı parametresinin etkin elastisite modülüne etkisi

Grup	Fiber Sayısı (N)	Fiber Uzunluğu (L)	Fiber Uzunluk/Çap Oranı (L/d)	Fiberlerin Yönelim Açıları (θ)	Bası Miktarı (C)	Etkin Elastisite Modülü (E')	Standart Sapma Miktarı
1	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,6	2,05E-03	5,31E-04
2	1600	0,2	40	$\pm\pi/6$	0,6	2,83E-03	1,58E-04
3	1600	0,2	40	$\pm\pi/4$	0,6	2,85E-03	1,39E-04
4	1600	0,2	40	$\pm\pi/3$	0,6	2,62E-03	1,82E-04
5	1600	0,2	40	$\pm\pi/2$	0,6	2,04E-03	1,29E-04

Farklı fiber yönelim açısı değerlerinin, fiber ağ örgü yapı modellerine ait Poisson oranı değerlerine etkisi Şekil 4.1'de, etkin elastisite modülü değerlerine etkisi ise Şekil 4.2'de grafiksel olarak görülmektedir.

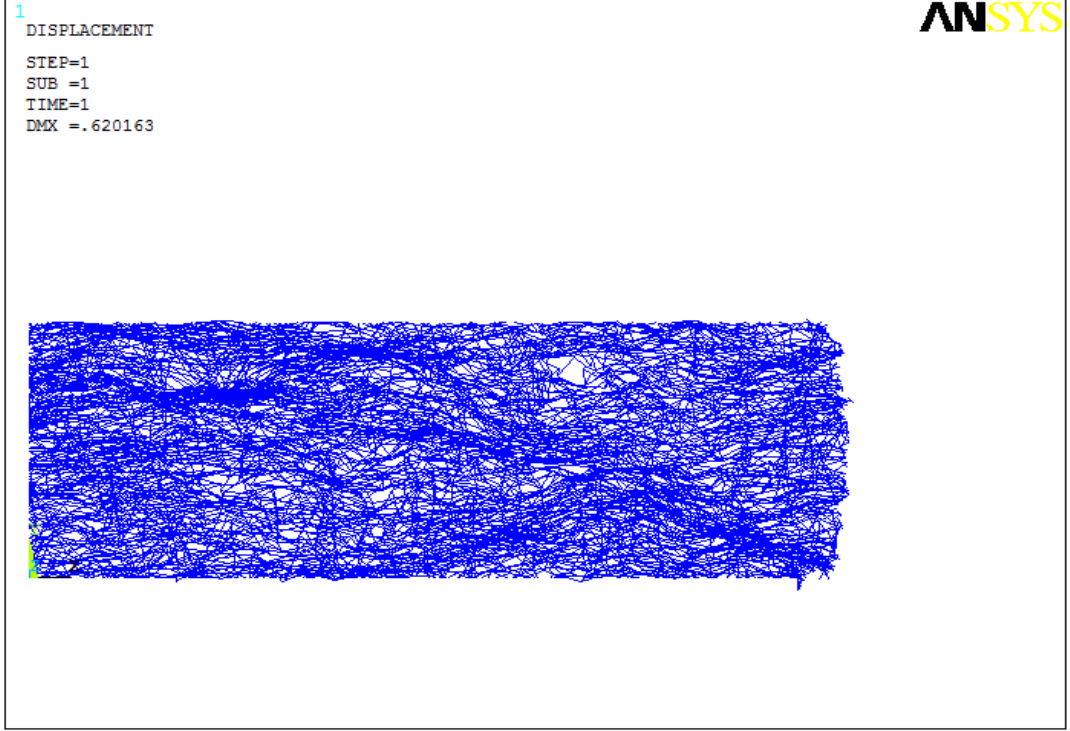


Şekil 4.1. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiberlerin yönelim açısının Poisson oranına etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$, Fiberlerin boy-çap oranı $L/d = 40$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$)

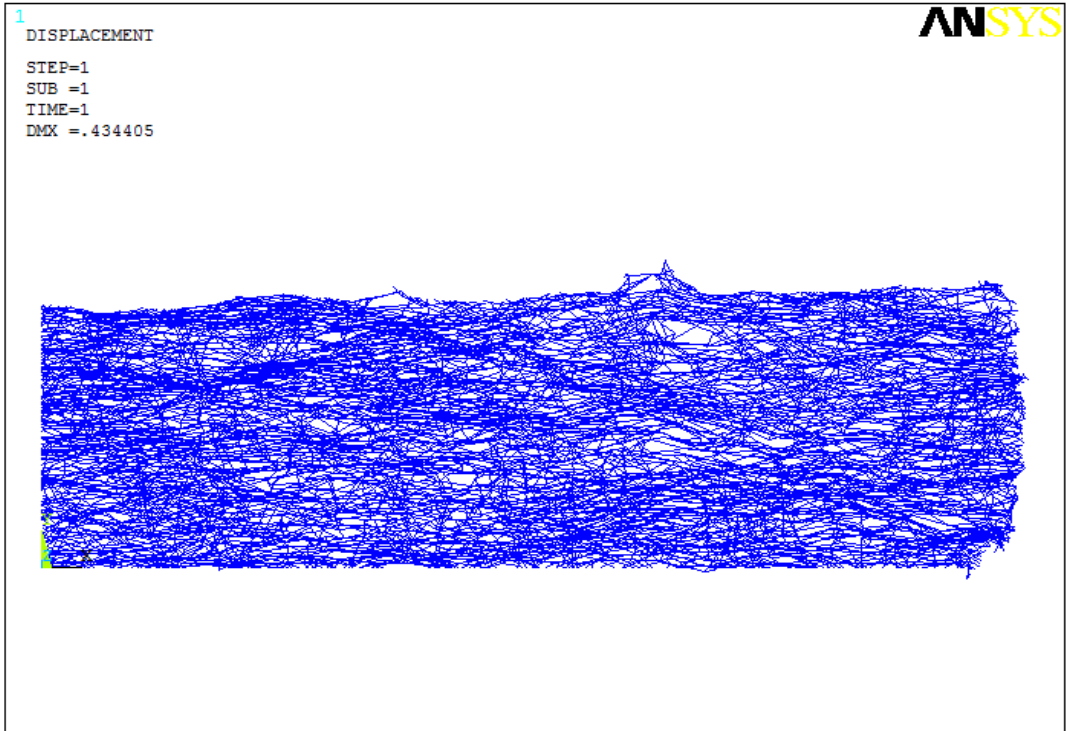


Şekil 4.2. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiberlerin yönelim açısının etkin elastisite modülüne etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$, Fiberlerin boy-çap oranı $L/d = 40$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$)

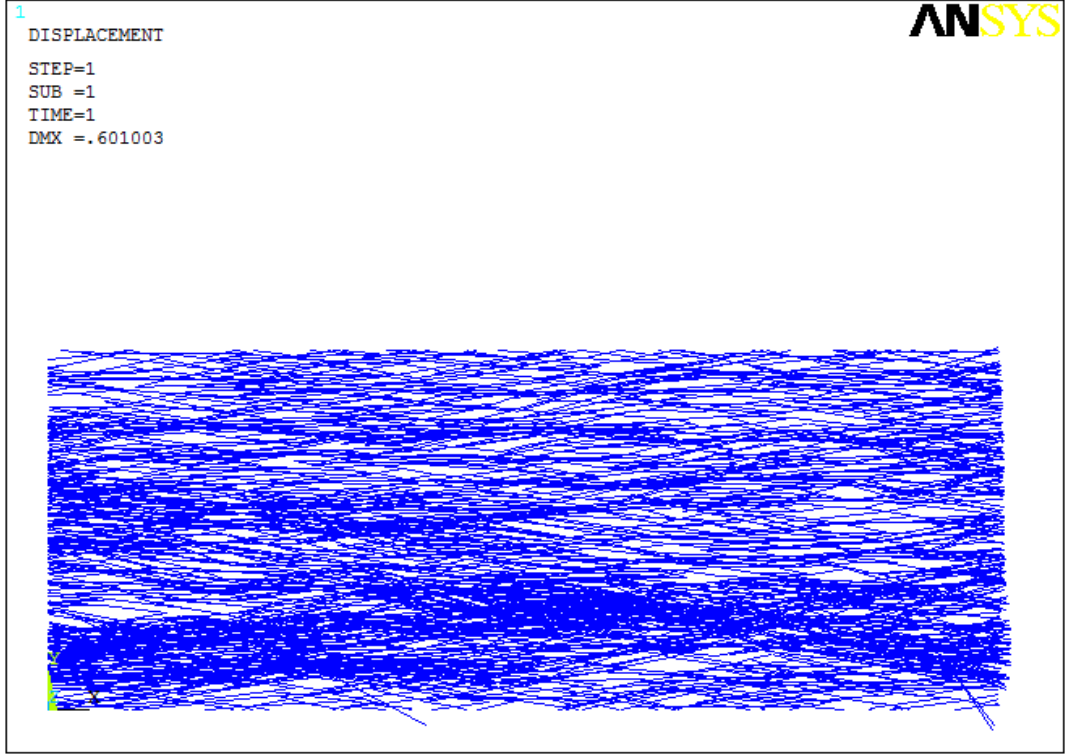
Örnek olarak, Şekil 4.3'de $\theta = \pm\pi/2$ derece yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, %60 oranında $-y$ yönünde aksenal bası uygulanmış bir ağ örgü yapı modelinin aksenal çekmeden önceki durumu ve Şekil 4.4'de ise aksenal çekme sonrasındaki durumu görülmektedir. Aynı şekilde, Şekil 4.5'te $\theta = \pm\pi/12$ derece yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, %60 oranında $-y$ yönünde aksenal bası uygulanmış bir ağ örgü yapı modelinin aksenal çekmeden önceki durumu ve Şekil 4.6'da ise aksenal çekme sonrasındaki durumu görülmektedir. Verilen örnek durumlar için fiber uzunluk/çap oranı değeri sabit ve $L/d = 40$ 'tır.



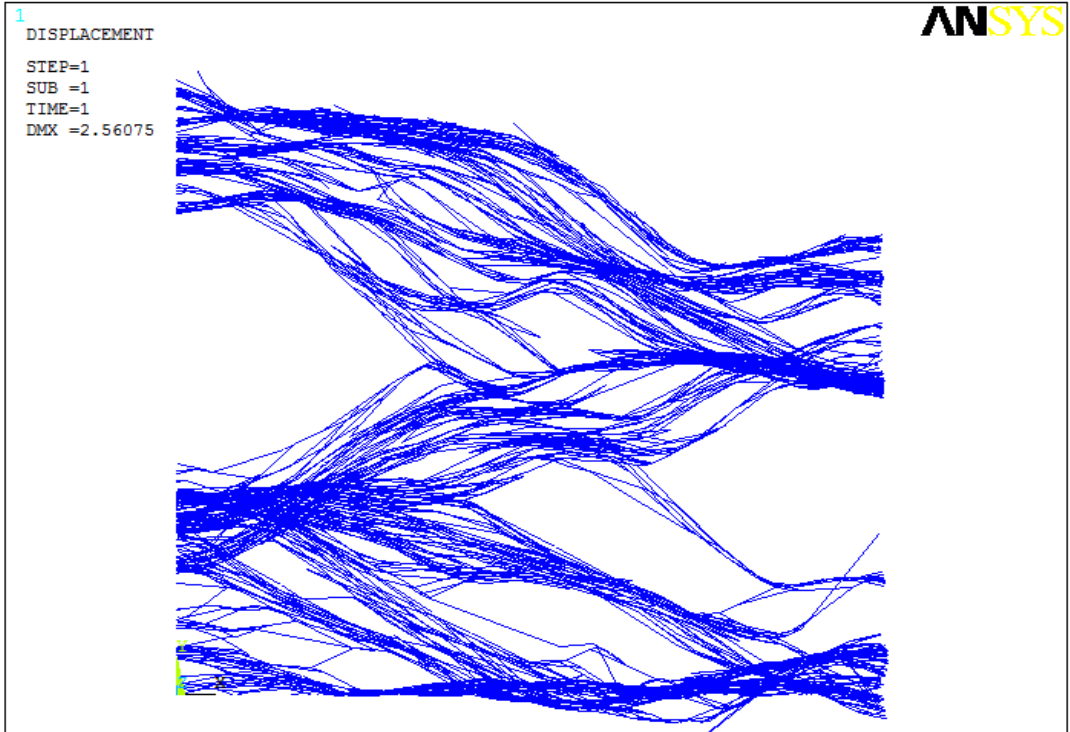
Şekil 4.3. $\theta = \pm\pi/2$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, aksel bası uygulanmış ağ örgü yapının aksel çekmeden önceki durumu



Şekil 4.4. $\theta = \pm\pi/2$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, aksel bası uygulanmış ağ örgü yapının aksel çekme sonrasındaki durumu



Şekil 4.5. $\theta = \pm\pi/12$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, aksenal bası uygulanmış ağ örgü yapının aksenal çekmeden önceki durumu



Şekil 4.6. $\theta = \pm\pi/12$ derecelik yönelim açısına sahip fiberlerden oluşan, aksenal bası uygulanmış ağ örgü yapının aksenal çekme sonrasındaki durumu

4.2. Fiber Uzunluk/Çap Oranı Parametresinin Auxetic Özelliğe Etkisi

Auxetic fiber ağ örgü yapının mekanik özelliklerine doğrudan etki eden diğer bir yapısal parametre ise, ağ örgü yapıdaki fiberlerin karakteristik özellikleridir. Fiberlerin karakteristik özellikleri, fiber uzunlukları ve fiberlerin çap değerleri ile tanımlanmaktadır. Bir nümerik ağ örgü yapı modelindeki fiberler eşit uzunluk ve aynı çap değerine sahiptir. Bununla birlikte fiber uzunluk değeri sabit tutularak, çap değerlerinin değiştirilmesi yoluyla farklı yoğunluk ve geometrik yapıya sahip ağ örgü yapı modelleri elde edilebilir. Fiberlerin uzunluk değerleri L , fiberlerin çap değerleri d ile sembolize edildiğinde fiber uzunluk/çap oranı değeri denklem (4.4) ile tanımlanabilir.

$$a = \frac{L}{d} \quad (4.4)$$

Oluşturulan 2 boyutlu geleneksel fiber ağ örgü yapı modellerinde, fiber uzunluk/çap oranı değerleri olarak 10, 20, 40, 80 kullanılmıştır. Her bir fiber uzunluk/çap oranı değeri için 5 farklı model oluşturulmuştur. Tüm modeller için; modellere uygulanan bası miktarı ($C = \%60$) ve fiberlerin yönelim açısı değeri ($\theta = \pm\pi/12$) parametreleri sabit bir değerde tutularak yapılan deformasyon analizleri ile fiber uzunluk/çap oranı değerlerinin, fiber ağ örgü yapıların Poisson oranı değerlerine etkisini gösteren sayısal sonuçlar elde edilmiş ve Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Ayrıca, çeşitli fiber uzunluk/çap oranı değerlerinin, ağ örgü yapıların elastisite modülü değerlerine etkisini gösteren sayısal sonuçlar Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

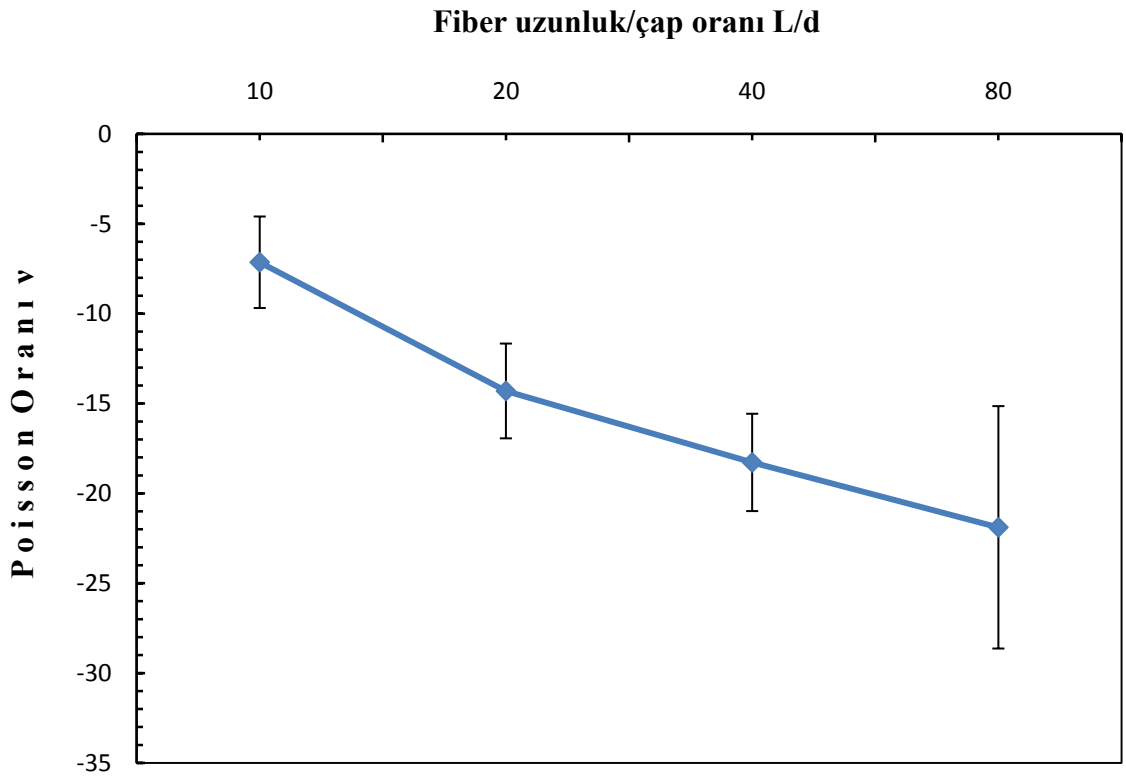
Çizelge 4.3. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin Poisson oranına etkisi

Grup	Fiber Sayısı (N)	Fiber Uzunluğu (L)	Fiber Uzunluk/Çap Oranı (L/d)	Fiberlerin Yönelim Açıları (θ)	Bası Miktarı (C)	Poisson oranı değerleri (ν_{ort})	Standart Sapma Miktarı
1	1600	0,2	10	$\pm\pi/12$	0,6	-7,14	2,55
2	1600	0,2	20	$\pm\pi/12$	0,6	-14,28	2,64
3	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,6	-18,28	2,71
4	1600	0,2	80	$\pm\pi/12$	0,6	-21,89	6,74

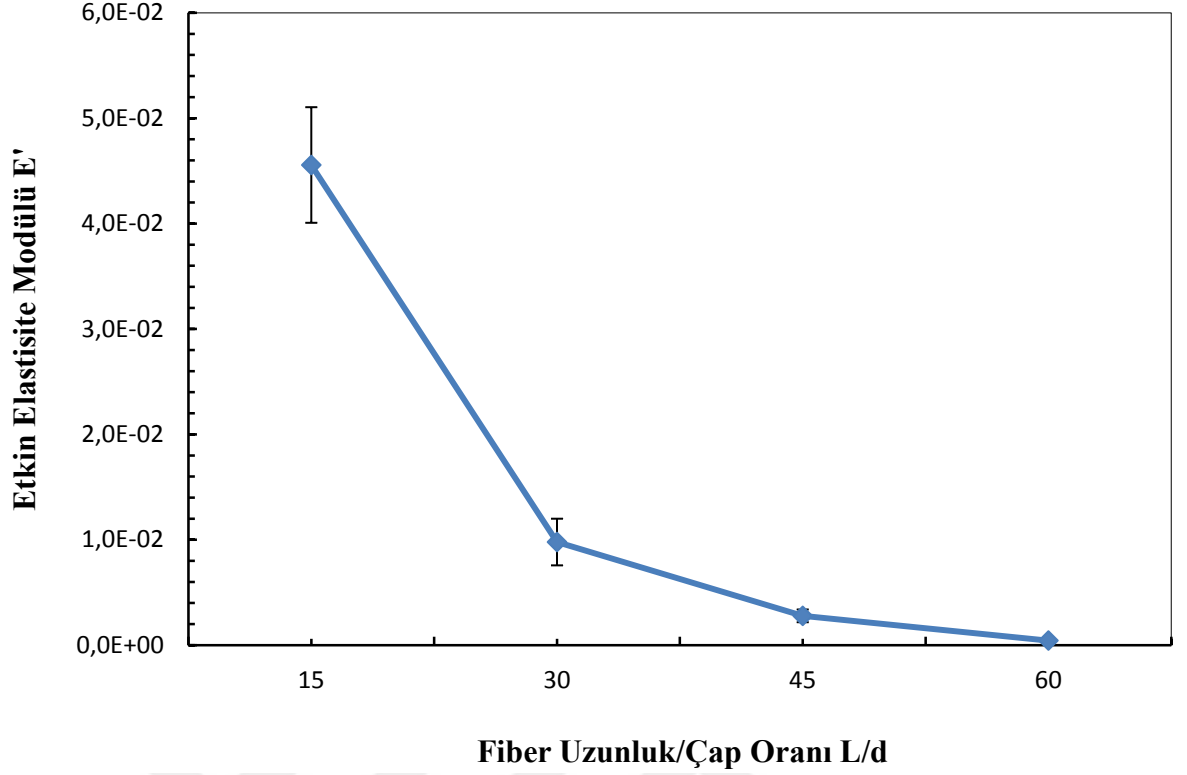
Çizelge 4.4. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin etkin elastisite modülüne etkisi

Grup	Fiber Sayısı (N)	Fiber Uzunluğu (L)	Fiber Uzunluk/Çap Oranı (L/d)	Fiberlerin Yönelim Açılıarı (θ)	Bası Miktarı (C)	Etkin Elastisite Modülü (E')	Standart Sapma Miktarı
1	1600	0,2	10	$\pm\pi/12$	0,6	4,56E-02	5,48E-03
2	1600	0,2	20	$\pm\pi/12$	0,6	9,78E-03	2,21E-03
3	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,6	2,78E-03	6,04E-04
4	1600	0,2	80	$\pm\pi/12$	0,6	4,36E-04	4,98E-05

Farklı fiber uzunluk/çap oranı değerlerinin, fiber ağ örgü yapı modellerine ait Poisson oranı değerlerine etkisi Şekil 4.7'de, etkin elastisite modülü değerlerine etkisi ise Şekil 4.8'de grafiksel olarak görülmektedir.

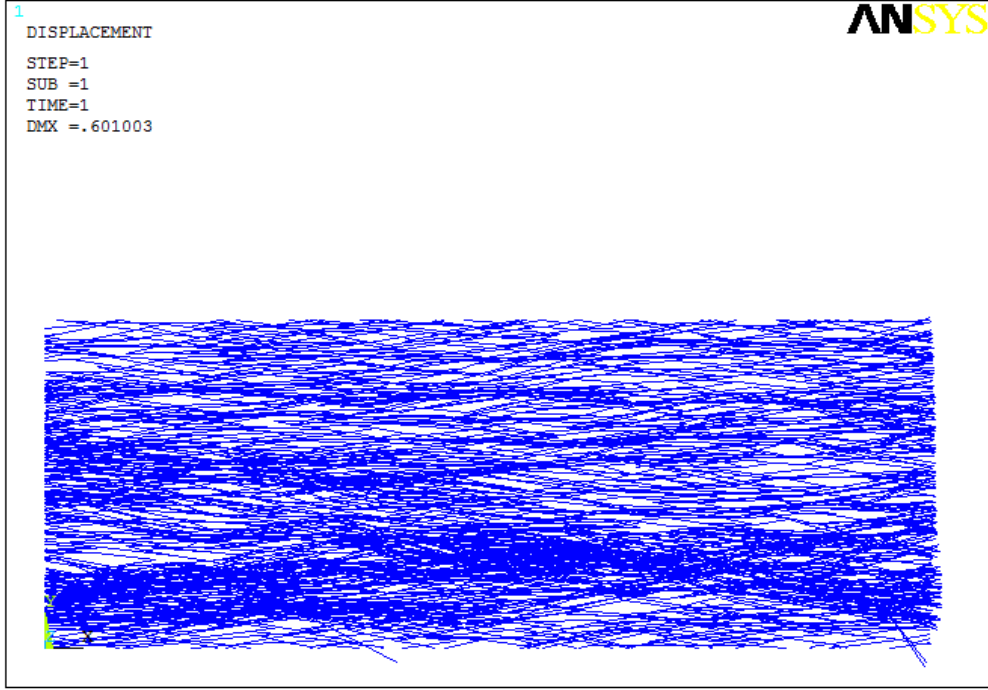


Şekil 4.7. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin Poisson oranına etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$)

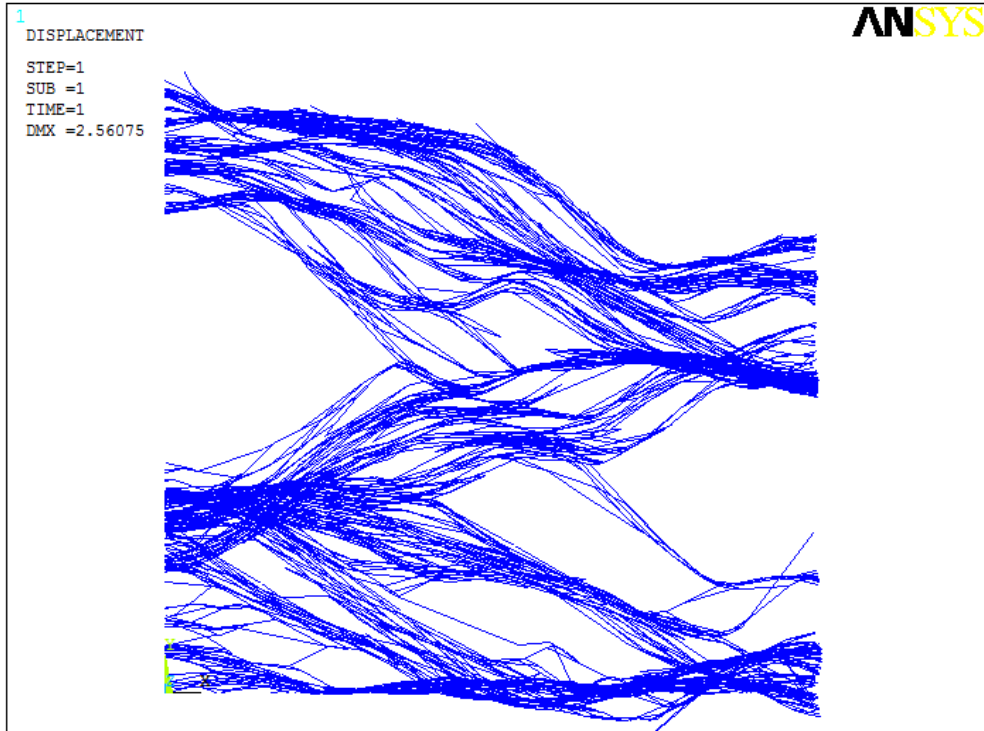


Şekil 4.8. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında fiber uzunluk/çap oranı parametresinin etkin elastisite modülüne etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, modele uygulanan bası miktarı $C = 0,6$)

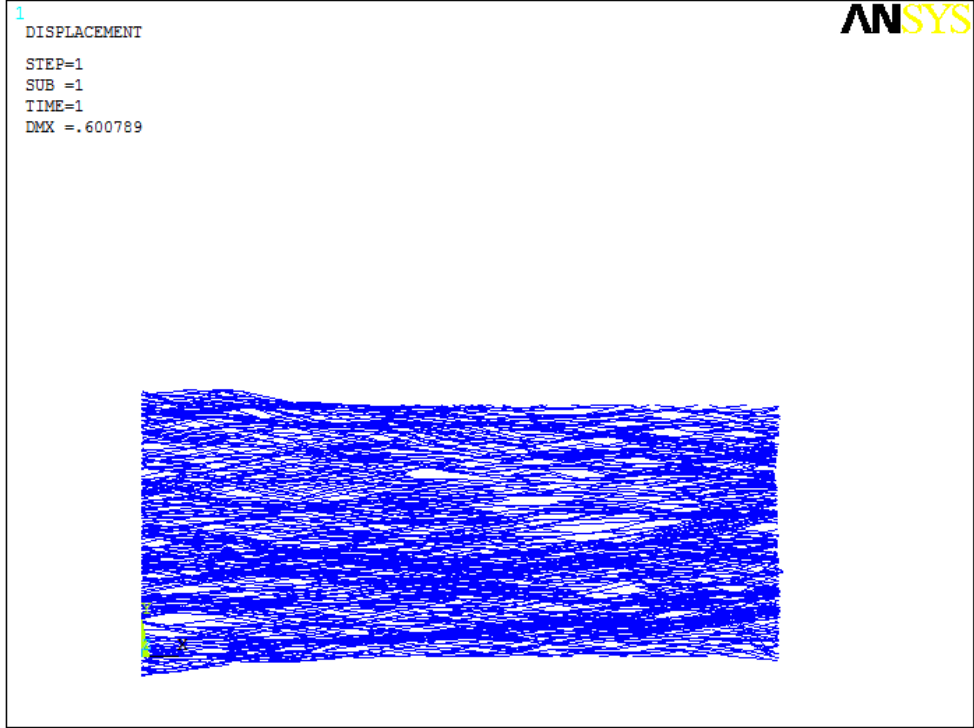
Örnek olarak, Şekil 4.9’da, fiber uzunluk/çap oranı $L/d = 20$ olan, %60 oranında –y yönünde aksenal bası uygulanmış bir ağ örgü yapı modelinin aksenal çekmeden önceki durumu ve Şekil 4.10’da ise aksenal çekme sonrasındaki durumu görülmektedir. Aynı şekilde, Şekil 4.11’de fiber uzunluk/çap oranı $L/d = 40$ olan, %60 oranında –y yönünde aksenal bası uygulanmış bir ağ örgü yapı modelinin aksenal çekmeden önceki durumu ve Şekil 4.12’de ise aksenal çekme sonrasındaki durumu görülmektedir. Örnek durumlar için fiber yönelim açısı değeri sabit ve $\theta = \pm\pi/12$ ’ dir.



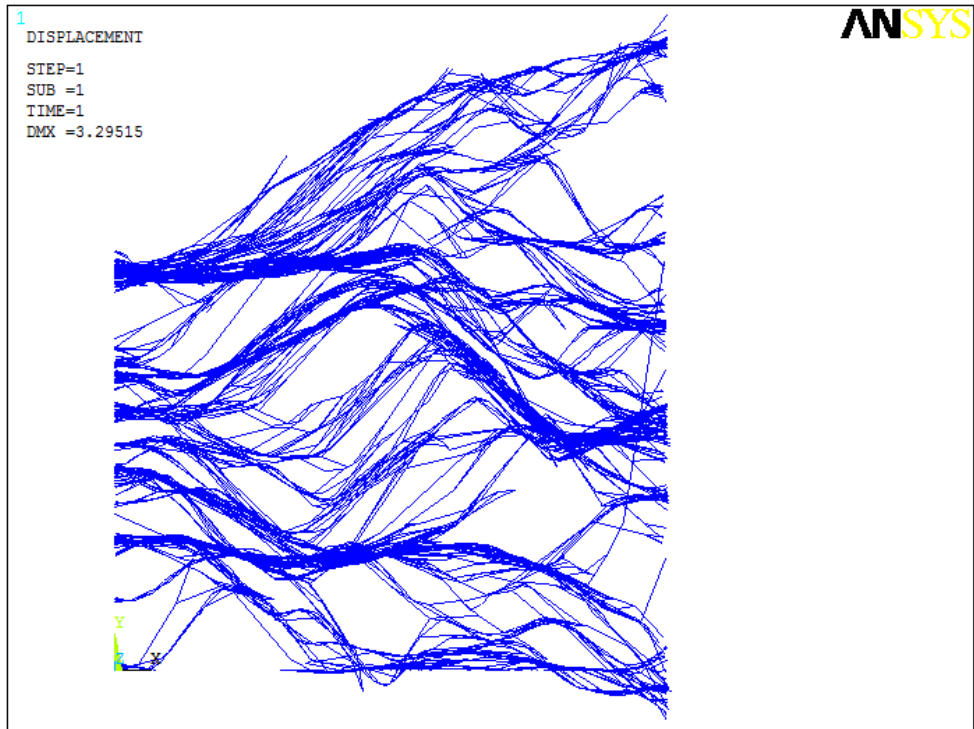
Şekil 4.9. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=20$ olan, aksenal bası uygulanmış ağ örgü yapının aksenal çekmeden önceki durumu



Şekil 4.10. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=20$ olan, aksenal bası uygulanmış ağ örgü yapının aksenal çekme sonrasındaki durumu



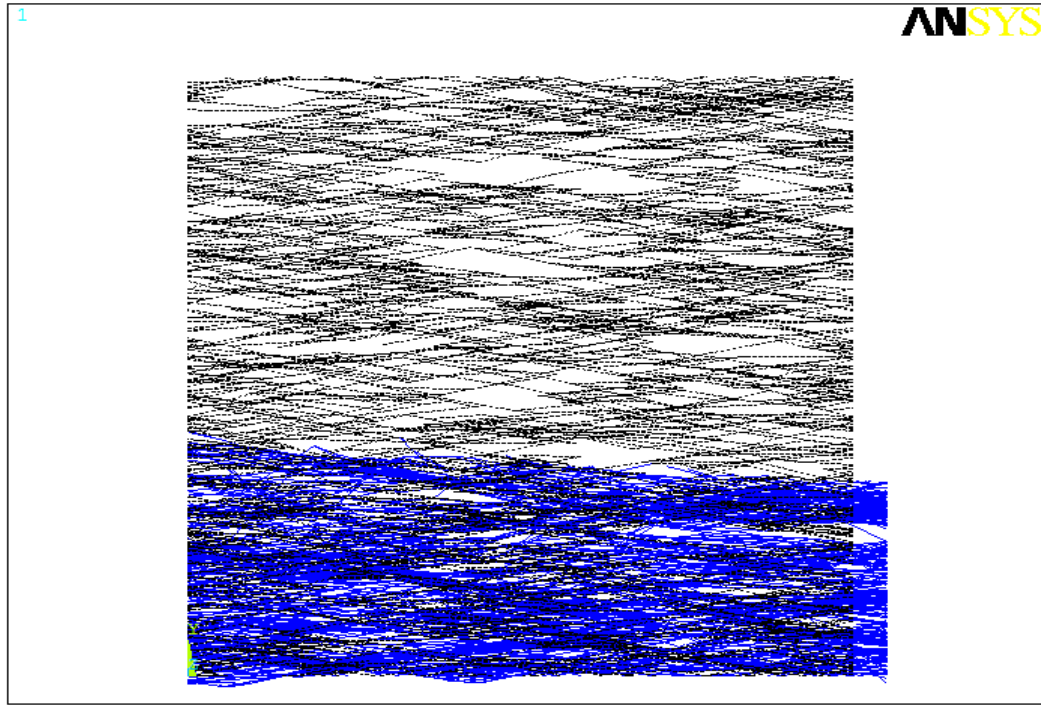
Şekil 4.11. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=40$ olan, aksenal bası uygulanmış ağ örgü yapının aksenal çekmeden önceki durumu



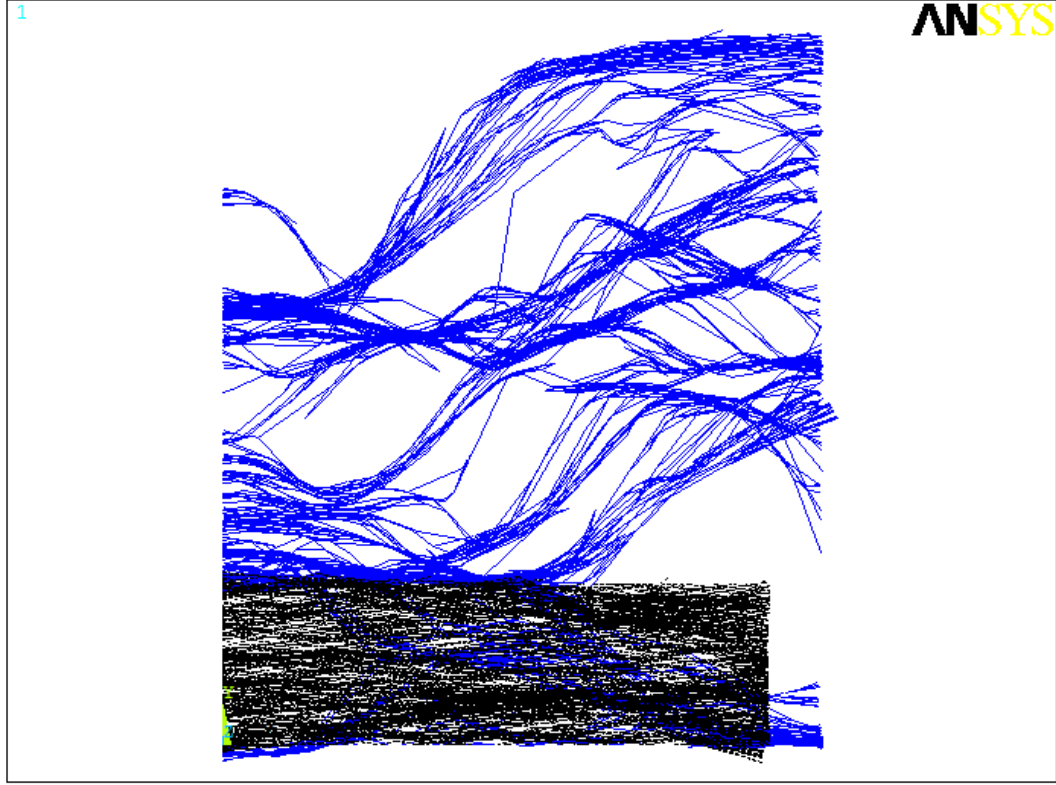
Şekil 4.12. Fiber uzunluk/çap oranı $L/d=40$ olan, aksenal bası uygulanmış ağ örgü yapının aksenal çekme sonrasındaki durumu

4.3. Eksenel Basma Oranı Parametresinin Auxetic Özelliğe Etkisi

Geleneksel fiber ağ örgü yapıda auxetic özelliğin gözlemlenmesinde, yapısal parametrelerin yanı sıra, bir dış etken olan sıkıştırma faktörü (eksenel basma) de önemli bir rol oynamaktadır. Fiber ağ örgü yapı, boşluklu yapısı ile sıkıştırılmaya uygun bir modeldir. Bir geleneksel fiber ağ örgü yapı, enine (-y yönünde) bir eksenel basıya maruz kalmadan, sadece boyuna (+x yönünde) bir eksenel çekmeye maruz kaldığında, boyuna uzamaya karşılık enine daralmanın meydana geldiği gözlemlenebilir (Şekil 4.13). Bu, pozitif Poisson oranı değerine sahip olan malzemeler için olağan bir tepkidir. Bununla birlikte, geleneksel fiber ağ örgü yapı, eksenel bası uygulanarak kalıcı şekilde sıkıştırılmış son halini aldığı anda, ağ örgü yapıdaki fiberler bir öngerilme enerjisine sahip olacaktır. Bu sayede, sıkıştırılmış ağ örgü yapıya eksenel çekme uygulandığında, ağ örgü yapıda boyuna uzamanın yanında enine genişlemenin meydana geldiği gözlemlenecektir. Bu durum, auxetic davranışı ifade etmektedir. Şekil 4.14'te %70 oranında eksenel bası uygulanmış geleneksel ağ örgü yapının eksenel çekme sonrasında gösterdiği davranış görülmektedir.



Şekil 4.13. Geleneksel fiber ağ örgüde eksenel çekme sonrası enine daralma ve boyuna uzama (eksenel basma uygulanmamıştır.)



Şekil 4.14. %70 oranında aksenal basma uygulanan geleneksel fiber ağ örgüde aksenal çekme sonrası enine genişleme ve boyuna uzama

Eksenal basma parametresinin, auxetic özelliğın durumu ve derecesi ile olan ilişkisinin incelenmesi amacıyla, yapısal parametreler sabit tutularak (fiberlerin uzunluk/çap oranı $(L/d = 40)$, fiberlerin yönelim açısı $(\theta = \pm\pi/12)$ derece), 5 farklı nümerik model oluşturulmuştur. Her bir modele %40, %50, %60 ve %70 oranında, $y = 1$ seviyesindeki nodlardan, $-y$ yönünde deplasman (eksenal basma) uygulanmıştır. Yapılan deformasyon analizleri ile aksenal basmanın, fiber ağ örgü yapıların Poisson oranına etkisini gösteren sayısal sonuçlar Çizelge 4.5'te, elastisite modülü değerlerine etkisini gösteren sayısal sonuçlar Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

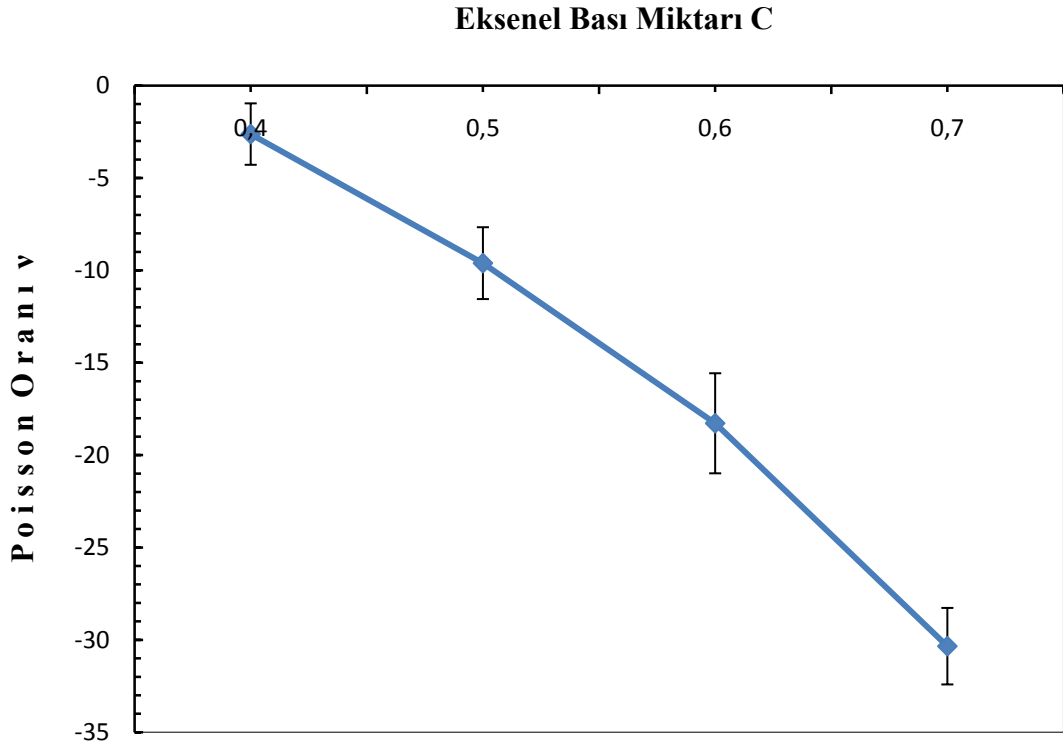
Çizelge 4.5. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında aksenal basma parametresinin Poisson oranına etkisi

Grup	Fiber Sayısı (N)	Fiber Uzunluğu (L)	Fiber Uzunluk/Çap Oranı (L/d)	Fiberlerin Yönelim Açılıarı (θ)	Bası Miktarı (C)	Poisson oranı değerleri (ν_{ort})	Standart Sapma Miktarı
1	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,4	-2,626	1,663
2	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,5	-9,612	1,944
3	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,6	-18,280	2,708
4	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,7	-30,345	2,070

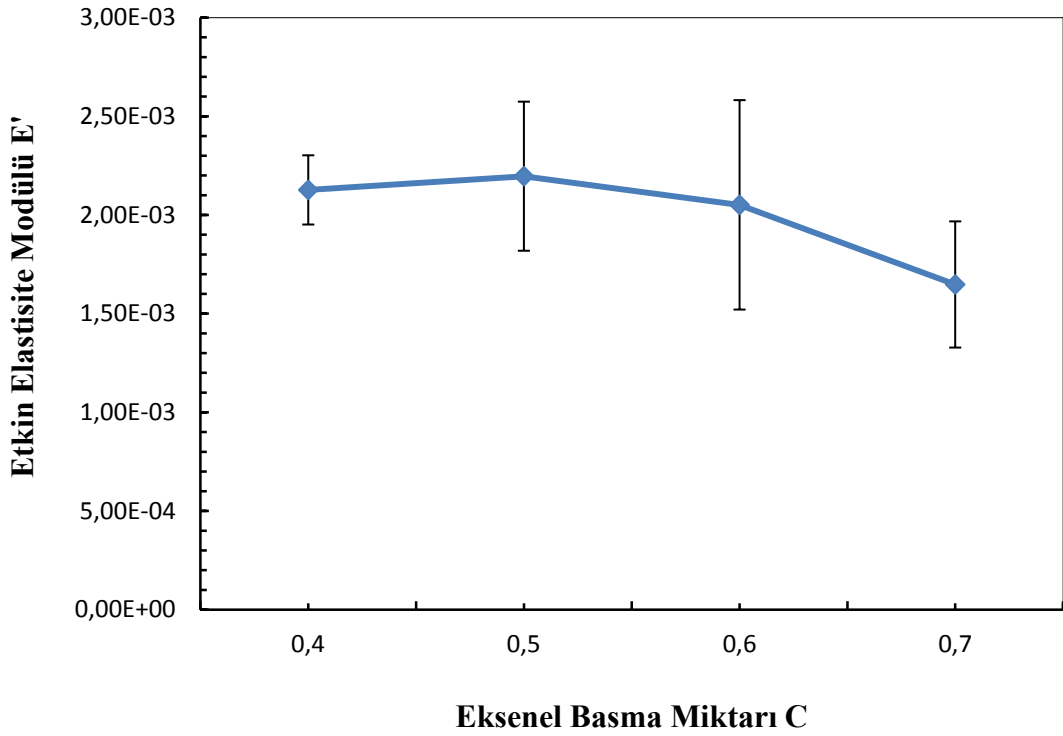
Çizelge 4.6. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında aksenal basma parametresinin etkin elastisite modülüne etkisi

Grup	Fiber Sayısı (N)	Fiber Uzunluğu (L)	Fiber Uzunluk/Çap Oranı (L/d)	Fiberlerin Yönelim Açılıarı (θ)	Bası Miktarı (C)	Etkin Elastisite Modülü (E')	Standart Sapma Miktarı
1	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,4	2,13E-03	1,75E-04
2	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,5	2,20E-03	3,78E-04
3	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,6	2,05E-03	5,31E-04
4	1600	0,2	40	$\pm\pi/12$	0,7	1,65E-03	3,20E-04

Çeşitli aksenal basma oranı miktarı değerlerinin, fiber ağ örgü yapı modellerine ait Poisson oranı değerlerine etkisi Şekil 4.15'te, etkin elastisite modülü değerlerine etkisi ise Şekil 4.16'da grafiksel olarak görülmektedir.



Şekil 4.15. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında eksenel basma oranı parametresinin Poisson oranına etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, fiber uzunluk/çap oranı $L/d = 0,4$)



Şekil 4.16. 2 boyutlu fiber ağ örgü yapılarında eksenel basma parametresinin etkin elastisite modülüne etkisinin grafiksel gösterimi (fiber sayısı $N = 1600$, fiber uzunluğu $L = 0,2$ fiber yönelim açısı $\theta = \pm\pi/12$, fiber uzunluk/çap oranı $L/d = 40$)

5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Benzetim ortamında, geleneksel fiber ağ örgü yapının negatif Poisson oranına sahip (auxetic) bir yapıya dönüşümü sağlanmıştır. Oluşturulan 2 boyutlu nümerik geleneksel fiber ağ örgü yapı modelleri kullanılarak elde edilen auxetic fiber ağ örgü yapı modellerinin deformasyon analizleri yapılmış ve auxetic özelliğin nitel ve nicel seviyelerine yön veren parametrelerin etkisi incelenmiştir. Auxetic özelliğe doğrudan yön veren parametreler; fiberlerin yönelim açısı ve fiberlerin uzunluk/çap oranı değerleri ile eksenel basma faktörüdür. Eksenel basma, ayrıca auxetic özelliğin ortaya çıkmasını sağlayan en önemli parametredir. Diğer parametreler sabit tutularak, her seferinde bir parametrenin farklı değerleri için yapılan deformasyon analizleri sonucunda şu çıkarımlar yapılmıştır:

- ✓ Fiberlerin yönelim açısı parametresi için; $\pm\pi/2$ değerinden $\pm\pi/12$ değerine doğru auxetic davranış daha belirgin şekilde görülmektedir. Aynı sonuç doğrultusunda, ağ örgü yapıda azalan açı değeri için, anizotropik davranış da belirgin şekilde artış göstermektedir. Ağ örgü yapının Poisson oranı değeri, azalan açı değerleri ile doğru orantılı olarak azalış göstermektedir. Etkin elastisite modülünün değeri, $\pm\pi/6$ için en yüksek değerde olup, artan açı değerleri için azalış göstermiştir.
- ✓ Fiberlerin uzunluk/çap oranı parametresinin artan değerleri için Poisson oranı değerleri de sürekli azalış göstermiştir. Aynı şekilde, artan uzunluk/çap oranı değerlerine bağlı olarak etkin elastisite modülü değerleri için de azalan değerler kaydedilmiştir.
- ✓ Eksenel basma parametresinin artan değerleri için, auxetic özelliğin daha belirgin hale gelmesi, beklenen bir durumdur. Bu teoriyi doğrular nitelikte, artan eksenel basma değerleri için, sürekli azalan Poisson oranı değerleri kaydedilmiştir. Bununla birlikte, etkin elastisite modülü değerleri, eksenel basma miktarının $C = 0,5$ değerinde en yüksek değerini almış ve eksenel basma miktarının artan değerleriyle birlikte düşüş göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Smith, W.F., Principles materials science engineering, (Editör: Kınıkoğlu, N.), Malzeme bilimi ve mühendisliği, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [2] Beer, F.P., Johnston R.E., Dewolf, J.T., Mazurek, D.F., Mechanics of materials, (Editör: Soyuçok, A., Soyuçok, Ö.), Cisimlerin mukavemeti, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [3] Evans, K.E., Nkansah, M.A., Hutchinson, I.J., Rogers, S.C., Molecular network design, Nature, 353(6340), 124, 1991.
- [4] Uzun, M., Negatif Poisson oranına sahip (auxetic) malzemeler ve uygulama alanları, Tekstil ve Mühendis, 17(77), 13-18, 2010.
- [5] Liu, Y., Hu, H., A review on auxetic structures and polymeric materials, Academic Journals, 5(10), 1052-1063, 2010.
- [6] Yang, W., Li, Z.M., Shi, W., Xie, B.H., Yang, M.B., Review on auxetic materials, Journal of Materials Science, 39(10), 3269-3279, 2004.
- [7] Evans, K.E., Alderson, A., Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking!, Advanced Materials, 12(9), 617-628, 2000.
- [8] Choi, J.B., Lakes, R.S., Nonlinear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio, Journal of Materials Science, 27(17), 4678-4684, 1992.
- [9] Smith, C.V., Evans, K.E., Lehman, F., Strain dependent densification during indentation in auxetic foams, Cellular Polymers, 18(2), 79-101, 1999.
- [10] Alderson, K.L., Fitzgerald, A., Evans, K.E., The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene, Journal of Materials Science, 35(16), 4039-4047, 2000.
- [11] Scarpa, F., Bullough, W.A., Lumley, P., Trends in acoustic properties of iron particle seeded auxetic polyurethane foam, Journal of Mechanical Engineering Science, 218(2), 241-244, 2004.
- [12] Scarpa, F., Yates, J.R., Ciffo, L.G., Patsias, S., Dynamic crushing of auxetic open-cell polyurethane foam, Journal of Mechanical Engineering Science, 216(12), 1153-1156, 2002.

- [13] Alderson, A., Rasburn, J., Evans, K.E., Grima, J.N., Auxetic polymeric filters display enhanced de-fouling and pressure compensation properties, *Membrane Technology*, 2001(137), 6-8, 2001.
- [14] Carneiro, V.H., Meireles, J., Puga, H., Auxetic materials-a review, *Materials Science-Poland*, 31(4), 561-571, 2013.
- [15] Underhill, R.S., Defense applications of auxetic materials, *DSIAC Journal*, 1(1), 6-12, 2014.
- [16] Sanami, M., Ravirala, N., Alderson, K., Alderson, A., Auxetic materials for sports applications, *Procedia Engineering*, 72, 453-458, 2014.
- [17] Bhullar, S.K., Three decades of auxetic polymers: a review, *De Gruyter e-Polimers*, 15(4), 205-215, 2015.
- [18] Love, A.E.H., *A treatise on the mechanical theory of elasticity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1927.
- [19] Ledbetter, H., Lei, M., Monocrystal elastic constants of orthotropic $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$: An estimate, *Journal of Materials Research*, 6(11), 2253–2255, 1991.
- [20] Milstein, F., Huang, K., Existence of a negative Poisson's ratio in fcc crystals, *Physical Review B*, 19(4), 2030–2033, 1979.
- [21] Baughman, R.H., Shacklette, J.M., Zakhidov, A.A., Stafstrom S., Negative Poisson's ratio as a common feature of cubic metals, *Nature*, 392(6674), 362–365, 1998.
- [22] Garber, A.M., *Pyrolytic materials for thermal protection systems*, *Aerospace Engineering*, 22, 126-137, 1963.
- [23] Nur, A., Simmons, G., The effect of saturation on velocity in low porosity rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, 7(2), 183-193, 1969.
- [24] Etienne, F.H., Houpert, R., Thermally induced microcracking in granites: characterisation and analysis, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 26(2), 125-134, 1989.
- [25] Gunton, D.J., and Saunders G.A., The Young's modulus and Poisson's ratio in arsenic, antimony and bismuth, *Journal of Materials Science*, 7(9), 1061–1068, 1972.

- [26] Li, Y., The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus and shear modulus in hexagonal materials, *Physica Status Solidi SeriesA*, 38(1), 171–175, 1976.
- [27] Yeganeh-Haeri, A., Weidner, D.J., Praise, J.B., Elasticity of α -cristobalite: a silicon dioxide with a negative Poisson's ratio, *Science*, 257(570), 650-652, 1992.
- [28] Williams, J.L., Lewis J.L., Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis, *Journal of Biomechanical Engineering*, 104(1), 50–56, 1982.
- [29] Lees, C., Vincent, J.F., Hillerton J.E., Poisson's ratio in skin, *Biomedical Materials And Engineering*, 1(1), 19-23, 1991.
- [30] Veronda, D.R., Westmann, R.A., Mechanical characterisation of skin finite deformations, *Journal of Biomechanics*, 3(1), 111–124, 1970.
- [31] Frohlich, L.M., Labarbera, M., Stevens, W.P., Poisson's ratio of a crossed fibre sheath: the skin of aquatic salamanders, *Journal of Zoology London*, 232(2), 231-252, 1994.
- [32] Gibson, L.J., Ashby, M.F., Schajer, G.S., Robertson, C.I., The mechanics of two-dimensional cellular materials, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 382(1782), 25-42, 1982.
- [33] Almgren, R.F., An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio= -1, *Journal of Elasticity*, 15(4), 427-430, 1985.
- [34] Lakes, R., Foam structures with a negative Poisson's ratio, *Science*, 235(4792), 1038-1040, 1987.
- [35] Friis, E.A., Lakes, R.S., Park, J.B., Negative Poisson's ratio polymeric and metallic foams, *Journal of Materials Science*, 23(12), 4406-4414, 1988.
- [36] Caddock, B.D., Evans, K.E., Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(12), 1877-1882, 1989.
- [37] Evans, K.E., Caddock, B.D., Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Microstructure and mechanical properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(12), 1883-1887, 1989.

- [38] Lakes, R., Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: structural aspects, *Journal of Materials Science*, 26(9), 2287-2292, 1991.
- [39] Choi, J.B., Lakes, R.S., Non-linear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio, *Journal of Materials Science*, 27(19), 5375-5381, 1992.
- [40] Choi, J.B., Lakes, R.S., Nonlinear analysis of the Poisson's ratio of negative Poisson's ratio foams, *Journal of Composite Materials*, 29(1), 113-128, 1995.
- [41] Lee, J., Choi, J.B., Choi, K., Application of homogenization FEM analysis to regular and re-entrant honeycomb structures, *Journal of Materials Science*, 31(15), 4105-4110, 1996.
- [42] He, C., Liu, P., Griffin, A.C., Toward negative Poisson's ratio polymers through molecular design, *Macromolecules*, 31(9), 3145-3147, 1998.
- [43] Larsen, U.D., Sigmund, O., Bouwstra, S., Design and fabrication of compliant mechanisms and material structures with negative Poisson's ratio, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 6(2), 99-106, 1997.
- [44] Prall, D., Lakes, R.S., Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of -1, *International Journal of Mechanical Science*, 39(3), 305-314, 1997.
- [45] Smith, C.W., Grima, J.N., Evans, K.E., A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model, *Acta Materialia*, 48(17), 4349-4356, 2000.
- [46] Grima, J.N., Evans, K.E., Auxetic behaviour from rotating squares, *Journal of Materials Science Letters*, 19(17), 1563-1565, 2000.
- [47] Grima, J.N., Evans, K.E., Auxetic behaviour from rotating triangles, *Journal of Materials Science*, 41(10), 3193-3196, 2006.
- [48] Tatlier, M., Berhan, L., Modelling the negative Poisson's ratio of compressed fused fibre networks, *Physica Status Solidi (b)*, 246(9), 2018-2024, 2009.
- [49] Grima, J.N., Manicaro, E., Attard, D., Auxetic behaviour form connected different-sized squares and rectangles, *The Royal Society*, 467(2126), 439-458, 2010.
- [50] Sastry, A.M., Cheng, X., Wang, C.W., Mechanics of stochastic fibrous Networks, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 3(11), 288-296, 1998.
- [51] ANSYS® Mechanical APDL 14.0 Help Topics

- [52] Tatlier, M.S., Toward negative Poisson's ratio composites: Investigation of the auxetic behavior of fibrous networks, Doctor of Philosophy, Toledo, 109, 2009.



ÖZGEÇMİŞ

1. **Adı Soyadı** : Umut AKSU
2. **Doğum Tarihi** : 02.01.1989
3. **Ünvanı** : Araştırma Görevlisi
4. **Öğrenim Durumu** :

Derece	Bölüm/Program	Okul/Üniversite	Bitirme Yılı
Lise	Fen Bilimleri	Selçuklu Dolapoğlu Anadolu Lisesi	2007
Lisans	Makine Mühendisliği	Selçuk Üniversitesi	2012

5. **Akademik Ünvanlar:**

Görevi	Bölümü	Kurumu	Yıl
Araştırma Görevlisi	Makine Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2013 –