



OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN FİBER  
TAKVİYELİ KAUÇUK KOMPOZİTLERİN SONLU  
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

Ali Osman GÜNEY

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Bahattin KANBER

2017



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

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN FİBER  
TAKVİYELİ KAUÇUK KOMPOZİTLERİN SONLU  
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali Osman GÜNEY**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**BURSA**  
**Temmuz 2017**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

“Ali Osman GÜNEY” tarafından “Prof. Dr. Bahattin KANBER” yönetiminde hazırlanan “OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN FİBER TAKVİYELİ KAUÇUK KOMPOZİTLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ” başlıklı tez, kapsamı ve niteliği açısından incelenmiş ve **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

### Sınav Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bahattin KANBER

.....

(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü)

Doç. Dr. Rukiye ERTAN

.....

(Uludağ Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü)

Yrd. Doç. Dr. Onur SARAY

.....

(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü)

Tez Savunma Tarihi: 04/07/ 2017

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Murat ERTAŞ

.../.../2017

.....

## 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 : Ali Osman GÜNEY

İmzası :

X X X X X

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında, değerli zamanını ayırarak çalıőmamı yönlendiren ve kolaylaőtıran, tecrübelerini benden esirgemeyen tez danıőmanım Prof. Dr. Bahattin KANBER'e, deneysel çalışmalar için malzeme temin eden MEKLAS ARGE Merkezi'ne, Selçuk ÇELİK'e, Gürkan İLHAN'a, en sıkıntılı zamanlarımda desteklerini yanımda hissettiğim aileme, arkadaőlarıma ve verdikleri desteklerden ötürü çalışma arkadaőlarıma teőekkürü bir borç bilirim.

Bu alıőma Bursa Teknik Üniversitesi BAP tarafından 2016-01-014 numaralı proje ile desteklenmiőtir. Bu sebeple, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araőtırmalar Proje Koordinatörlüğü'ne teőekkürlerimi sunarım.

Ali Osman GÜNEY



*Değerli annem ve babama,*

# İÇİNDEKİLER

## sayfa no

Dış kapak	
İç kapak	
Tez Sınav Sonuç Formu	
İntihal (Aşırma) Beyanı	
Teşekkür	
İthaf	
İçindekiler	<i>vi</i>
Şekil Listesi	<i>viii</i>
Çizelge Listesi	<i>xv</i>
Sembol ve Kısaltma Listesi	<i>xvi</i>
Özet	<i>xvii</i>
Abstract	<i>xviii</i>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Kompozit Malzemeler	3
1.2 Kauçuklar	11
1.3 Vulkanizasyon	14
1.3.1 Vulkanizasyon sistemleri	16
1.3.2 Vulkanizasyon koşulları	18
1.4 Takviyelendiriciler	19
1.4.1 Doğal fiberler	20
1.4.2 Sentetik fiberler	21
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ</b>	<b>23</b>
2.1 Sürekli Fiber Takviyeli Kompozitlerle İlgili Çalışmalar	23
2.2 Fiber Takviyeli Kompozitlerle İlgili Çeşitli Çalışmalar	27
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b>	<b>30</b>
3.1 Materyal	30

	<b><u>sayfa no</u></b>
3.1.1 Vulkanize edilmiş numuneler	30
3.2 Yöntem	31
3.2.1 Tek eksenli çekme testi	31
3.2.2 Sonlu elemanlar yöntemi	32
3.2.3 Fiber ve kauçuk arasındaki yapışma durumu	36
3.2.4 Sonlu eleman analizleri ile deneysel çalışmanın karşılaştırılması	37
3.2.5 Sonlu eleman analizleri için malzeme modellerinin belirlenmesi	38
3.2.6 Modellerin hazırlanması	39
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b>	<b>44</b>
4.1 Çekme Yükünde	44
4.1.1 Fiber çaplarının ve mesafelerinin değişim etkisinin incelenmesi	44
4.1.2 Fiberler arasındaki açının değişim etkisinin incelenmesi	55
4.1.3 Fiber malzemesinin değişim etkisinin incelenmesi	56
4.2 Düzlem Dışı Yükünde	57
4.2.1 Fiber çaplarının ve mesafelerinin değişim etkisinin incelenmesi	57
4.2.2 Fiberler arasındaki açının değişim etkisinin incelenmesi	84
4.2.3 Fiber malzemesinin değişim etkisinin incelenmesi	85
4.2.4 Fiber çapı ve fiber mesafesi değişiminin, fiber ve kauçuk deformasyonuna olan etkisinin incelenmesi	86
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>87</b>
5.2 Sonuç	87
5.1 Öneriler ve İleride Yapılabilecek Çalışmalar	89
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>90</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>95</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

		<b><u>sayfa no</u></b>
Şekil 1.1	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	4
Şekil 1.2	Fiber takviyeli kompozitlerde temel yapılar	7
Şekil 1.3	Kompozit örnekleri: (a) rastgele parçacıklı, (b) tek eksenli, süreksiz fiberler (c) rastgele, süreksiz fiberler, (d) tek eksenli, sürekli fiberler	10
Şekil 1.4	Havali körükler	10
Şekil 1.5	Goodyear Eagle® F1 GS-D3™ marka lastik	10
Şekil 1.6	Geleneksel bir bıçak kullanarak Hevea ağacından lateks akıtması (solda); mekanize edilmiş bir bıçak kullanarak (sağda)	11
Şekil 1.7	Kauçuk ağacı Hevea Brasiliensis'den lateks çıkarılması	12
Şekil 1.8	Silika'nın yüzey kimyası	13
Şekil 1.9	Karbon siyahının morfolojisi	13
Şekil 1.10	Ağ oluşumu	15
Şekil 1.11	Vulkanize edilmiş kauçuk için tipik kuvvet-uzama eğrisi	15
Şekil 1.12	Peroksitlerin çözünmesi ile oluşan çapraz bağlanmalar	18
Şekil 1.13	Fiberlerin sınıflandırılması	19
Şekil 3.1	Numune hazırlama makinesi (Instron 6054.000) ve hazırlanan numuneler	30
Şekil 3.2	Çekme testi makinesi (Shimadzu AG-X Plus 250 kN)	31
Şekil 3.3	0.5 mm/s hızda test edilen numunelerden birisi	31
Şekil 3.4	Freze tezgahının sonlu elemanlar ile modellenmesi	32
Şekil 3.5	Çeşitli geometrilerin sonlu eleman modellemeleri	33
Şekil 3.6	Sekiz eş parçaya bölünen daire	33
Şekil 3.7	Çeşitli mesh tipi örnekleri; a) Bir dişlinin iki boyutlu olarak mesh yapılmış hali, b) Bir uçağın üç boyutlu olarak mesh yapılmış hali, c) Bir merdivenin bir boyutlu çizgi elemanlar ile modellenmiş hali	34
Şekil 3.8	Eleman tipleri	35
Şekil 3.9	Yüzey yapışma durumları; a) Kötü yapışma durumu, b) İyi yapışma durumu, c) Kötü fiber-matris etkileşimi, d) İyi fiber-matris etkileşimi	36
Şekil 3.10	Fiber malzemesinin, FEM ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	38
Şekil 3.11	Fiber takviyeli numune modeli ve ağ yapısı	38
Şekil 3.12	Farklı katmanlara sahip takviyeli kauçuk kompozit için tasarlanan katı model	39
Şekil 3.13	Fiberleri çekme yönünde olan bir modelin görüntüsü	40
Şekil 3.14	Çizilen açılı bir modelin görüntüsü	40
Şekil 3.15	Eksenel çekme yüküne maruz model ve sınır şartları	41
Şekil 3.16	Düzlem dışı yüklemeye maruz model ve sınır şartları	42
Şekil 3.17	Düzlem dışı basınç uygulanmasının ardından modelde meydana gelen toplam deformasyonlar	42

Şekil 4.1	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-eksenel çekme)	44
Şekil 4.2	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-eksenel çekme)	44
Şekil 4.3	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°-eksenel çekme)	45
Şekil 4.4	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°-eksenel çekme)	45
Şekil 4.5	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	46
Şekil 4.6	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	46
Şekil 4.7	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	47
Şekil 4.8	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	47
Şekil 4.9	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	48
Şekil 4.10	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	48
Şekil 4.11	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	49
Şekil 4.12	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	49
Şekil 4.13	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°-eksenel çekme)	50
Şekil 4.14	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°-eksenel çekme)	50
Şekil 4.15	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	51

		<b><u>sayfa no</u></b>
Şekil 4.16	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	51
Şekil 4.17	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	52
Şekil 4.18	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-eksenel çekme)	52
Şekil 4.19	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	53
Şekil 4.20	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	53
Şekil 4.21	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	54
Şekil 4.22	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-eksenel çekme)	54
Şekil 4.23	Çeşitli çap ve mesafedeki fiberler için farklı açılara karşılık, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler	55
Şekil 4.24	Fiber malzemesinin değişimine karşılık fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler	56
Şekil 4.25	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	57
Şekil 4.26	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	57
Şekil 4.27	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	58
Şekil 4.28	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	58
Şekil 4.29	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	59
Şekil 4.30	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	59
Şekil 4.31	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°-düzlem dışı)	60

		<b><u>sayfa no</u></b>
Şekil 4.32	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	60
Şekil 4.33	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	61
Şekil 4.34	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	61
Şekil 4.35	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	62
Şekil 4.36	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	62
Şekil 4.37	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	63
Şekil 4.38	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	63
Şekil 4.39	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	64
Şekil 4.40	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	64
Şekil 4.41	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	65
Şekil 4.42	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	65
Şekil 4.43	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	66
Şekil 4.44	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	66
Şekil 4.45	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	67
Şekil 4.46	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	67

Şekil 4.47	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	68
Şekil 4.48	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	68
Şekil 4.49	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	69
Şekil 4.50	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	69
Şekil 4.51	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	70
Şekil 4.52	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	70
Şekil 4.53	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	71
Şekil 4.54	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)	71
Şekil 4.55	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	72
Şekil 4.56	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	72
Şekil 4.57	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	73
Şekil 4.58	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	73
Şekil 4.59	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	74
Şekil 4.60	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	74
Şekil 4.61	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	75

Şekil 4.62	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	75
Şekil 4.63	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	76
Şekil 4.64	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	76
Şekil 4.65	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	77
Şekil 4.66	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°-düzlem dışı)	77
Şekil 4.67	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-düzlem dışı)	78
Şekil 4.68	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-düzlem dışı)	78
Şekil 4.69	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-düzlem dışı)	79
Şekil 4.70	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-düzlem dışı)	79
Şekil 4.71	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-düzlem dışı)	80
Şekil 4.72	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°-düzlem dışı)	80
Şekil 4.73	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-düzlem dışı)	81
Şekil 4.74	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-düzlem dışı)	81
Şekil 4.75	Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-düzlem dışı)	82
Şekil 4.76	Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°-düzlem dışı)	82

		<b><u>sayfa no</u></b>
Şekil 4.77	Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	83
Şekil 4.78	Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)	83
Şekil 4.79	Çeşitli çap ve mesafedeki fiberler için farklı açılara karşılık, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler	84
Şekil 4.80	Fiber malzemesinin değişimine karşılık fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler	85
Şekil 4.81	Çeşitli fiber çapları için fiber ve kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	86
Şekil 4.82	Çeşitli fiber mesafeleri için fiber ve kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası 0°- düzlem dışı)	86

## ÇİZELGE LİSTESİ

		<b><u>sayfa no</u></b>
Çizelge 1.1	Otomobil modelleri, üreticileri ve doğal fiber takviyeli kompozit kullanan bileşenleri	5
Çizelge 1.2	Bir kompozitteki matris ve takviyelendiricinin etkileri	8
Çizelge 1.3	Bazı metalik ve yapısal kompozit malzemelerin çekme özellikleri	9
Çizelge 1.4	Doğal kauçuk ile vulkanize edilmiş kauçuğun karşılaştırılması	16
Çizelge 1.5	Tipik ticari kauçuklar	17
Çizelge 1.6	Bazı sentetik ve doğal (bitkisel) fiberlerin mekanik özellikleri	22
Çizelge 3.1	Nümerik yöntem ile analitik yöntemin karşılaştırılması (Problem çözümü)	34
Çizelge 3.2	Kullanılan fiberlerin parametre değerleri ve fiber malzemeleri	40



## SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
E	Elastisite Modülü
$\tau$	Kayma Gerilmesi
$\sigma$	Normal Gerilme
$\nu$	Poisson Oranı
$\delta$	Deformasyon

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Das Ist Norm
fç	Fiber Çapı
fm	Fiber Mesafesi
fd	Fiber Deformasyonu
kd	Kauçuk Deformasyonu

## ÖZET

# OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN FİBER TAKVİYELİ KAUÇUK KOMPOZİTLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

**Ali Osman GÜNEY**

Bursa Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Prof. Dr. Bahattin KANBER

Temmuz 2017, 95 Sayfa

Fiber takviyeli kauçuk kompozitler, otomotiv endüstrisinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. En yaygın görülme şekilleri; yapay kaslar, araç lastikleri, süspansiyon sistemleri ve yakıt hortumlarıdır. Bu kadar yaygın kullanılmasından dolayı, hangi yükleme altında, nasıl davranış göstereceklerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Bundan dolayı, bu tez kapsamında fiber takviyeli kauçuk kompozitler, ANSYS Workbench ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle 3 boyutlu olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar çözümleri için gerekli doğrulamalar, deneysel çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. Doğrulama işleminin ardından kauçuk malzeme için hiper-elastik malzeme modeli, fiber takviyeler için ise doğrusal elastik malzeme tanımlamasıyla katı modeller hazırlanmış ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde; beş farklı fiber çapı, beş farklı fiber boşluk mesafesi, üç farklı açı ve üç farklı takviyelendirici kullanılmıştır. Bu sayede, fiber çaplarının, fiberler arası mesafelerin, fiberler arası açı değişimlerinin ve farklı takviye malzemelerinin mekanik davranış üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar detaylıca birbirleriyle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal Elastik Malzeme, Fiber Takviyeli Kauçuk Kompozit, Sonlu Eleman Analizi, Hiper-elastik Malzeme.

## **ABSTRACT**

# **THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF FIBER REINFORCED RUBBER COMPOSITES IN AUTOMOTIVE INDUSTRY BY FINITE ELEMENT METHOD**

**Ali Osman GÜNEY**

Bursa Technical University

Graduate Scholl of Natural and Applied Science

Department of Mechanical Engineering Program

Master of Science Thesis

Prof. Dr. Bahattin KANBER

June 2017, 95 Pages

Fiber reinforced rubber composites are widely used in automotive industry. They are used as artificial muscles, vehicle tires, air spring systems and fuel pipes. Because of its widely usage, it must be known how they behaves under various loading conditions. Therefore, in this thesis, fiber reinforced rubber composites are studied by using 3D finite element solutions in ANSYS Workbench. For the validations of finite element solutions, some experimental works are carried out. After this validation step, in all finite element solutions, hyperelastic material model is used for rubbers and lineer elastic material model is used for reinforcing fibers. For this aim, five different fiber diameters, five different fiber distances, three different angles and three different fiber materials are used. So, the effect of changes in fiber diameters, fiber distances, angles between fibers and effect of fiber materials are investigated. Obtained results are compared and discussed in details.

**Keywords:** Fiber Reinforced Rubber Composite, Finite Element Solutions, Hyperelastic Material, Lineer Elastic Material.

## 1. GİRİŞ

Geçtiğimiz 30 yıl boyunca; kompozit malzemeler, plastikler ve seramikler piyasada yoğun olarak kullanılan malzemeler olmuştur. Son 25 yıl içerisinde polimer malzemeler ise, günlük yaşamımızda ve endüstride geniş kullanım alanına ulaşmıştır. Bu duruma karşılık, kompozit malzemelerin uygulamalarının sayısı ve hacmi, piyasada sürekli yeni pazarlar bularak artmıştır [1-2].

Son yıllarda bilim ve teknolojiadaki gelişmeler, insanların ilgisini daha dayanıklı malzemeler olan fiber takviyeli kompozitlere çekmeye başlamıştır. Karbon, cam veya aramid fiberler ile takviyelendirilen pek çok polimer tabanlı kompozit; otomotiv, uzay, inşaat ve spor endüstrisinde kullanılmaktadır. Plastikleri takviyelendirmek için kullanılan yapay fiberlerden birisi olan cam fiber, diğer fiberlerle kıyaslandığında, düşük maliyeti ve yüksek mekanik performansından dolayı en yaygın kullanılan fiberlerden birisi konumundadır. İşlem sırasında yüksek mukavemet göstermesine rağmen, cam fiberlerin yoğunlukları ve enerji tüketimleri yüksek, üretimleri maliyetli, geri dönüşümleri mümkün olmamakta ve ayrıca insan sağlığına da zararlıdır. Bunlara ek olarak, bu gibi geri dönüşümleri mümkün olmayan kompozit atıkların bertarafına ilişkin çevresel ilgi ise gün geçtikçe artmaktadır [3].

Polimer matrisli kompozitlerin matris malzemeleri, genellikle petrol kökenli kimyasallardan olan sentetik polimerlerden oluşmaktadır. Bu polimer matris kompozitler genellikle yapay fiberlerle takviyelendirilmiştir. Bu kompozitlerde kullanılan tüm takviyelendiricilerin yaklaşık %99'una tekabül eden cam fiberler açık ara en yaygın şekilde kullanılan fiber çeşididir. Alternatif olarak aramid gibi sentetik fiberler de kullanılmaktadır [4].

Elastomer kompozitler halihazırda endüstride oldukça fazla kullanılmakta olup yeni teknolojilerde uygulama alanları için de güven vermektedir. Pek çok uygulamada, elastomer malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek için sürekli fiberler ile takviyelendirme işlemi yapılmaktadır. Naylon ve karbon lifler, çelik teller gibi yüksek rijitlikteki fiberler, yumuşak elastomerleri takviyelendirmek için yaygın

olarak kullanılmaktadırlar. Bu yüzden, yumuşak elastomer malzemelerin içerisindeki sürekli fiberler; elastik ipler olarak kabul edilmektedir [5].

Kauçuk kompozitler: doğal kauçuk, bütadien kauçuk, stiren bütadien kauçuk vb. kauçuklardan; karbon siyahı, silika vb. dolgu maddelerinden; kürleştiricilerden ve birtakım kimyasal işlemlerden sonra meydana gelen kompozit malzemelerdir. Kauçuklar, çoğu uygulama için yeterli mukavemete sahip olacak şekilde, dolgu maddeleri ile güçlendirilmektedir. Kauçuk kompozit üretiminde, yüksek mekanik özellikler sağladığı için, en yaygın dolgu maddelerinden olan karbon siyahı ve silika kullanılmaktadır. Çoğu uygulama için istenen özellikler; elastisite modülü, çekme mukavemeti, aşınmanın az olması, yırtılma mukavemeti ve dinamik özelliklerdir. Kauçukların maksimum güçlendirilmesi, dolgu maddeleri ile kauçuk arasındaki hem fiziksel hem de kimyasal etkileşimleri içermektedir. Kauçuk kompozitlerin özellikleri sadece dolgu maddelerine bağlı değildir. Bu kompozitlerin özellikleri; çapraz bağlanma (crosslinking) yoğunluğu, çapraz bağlanma tipleri, kauçuk türleri vb. pek çok faktör tarafından da etkilenmektedir [6].

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda matris malzemesi olarak doğal kauçuk, takviyelendirici olarak ise sürekli fiber malzemeler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda öncelikle, MEKLAS ARGE Merkezi'nden temin edilen kompozit kauçuklardan (havalı körük parçaları), içerisindeki fiberler yük taşımayacak şekilde deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler, aksel çekme testlerine tabi tutularak, vulkanize edilmiş kauçuğun gerilme-gerinim diyagramı elde edilmiştir. Ardından bu gerilme-gerinim değerleri, hem ANSYS Workbench programında uygun olabilecek hiper-elastik malzeme modelleri denenerek, hem de literatür taraması yapılarak, en uygun malzeme modeli belirlenmiştir. Kullanılacak fiberler, (nylon 6.6, nylon 6 ve kendir) doğrusal elastik kabul edilerek, malzeme tanımlaması için gereken değerler literatürden elde edilmiştir. Daha sonra deneysel olarak numunelere, fiber doğrultusunda aksel çekme testleri yapılarak elde edilen sonuçlar ile sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırılıp doğrulanmasının ardından, SolidWorks programında hazırlanan iki katmanlı fiber takviyeli kauçuk kompozit modellerde; fiber malzemesinin değişimi, fiberlerin farklı çap, mesafe ve açı değerleri için meydana gelen gerilme değişimleri incelenerek yorumlanmıştır. Ayrıca

bir başka inceleme olarak, düzlem dışı yükleme altındaki gerilme değişimleri de incelenerek yorumlanmıştır.

## 1.1 Kompozit Malzemeler

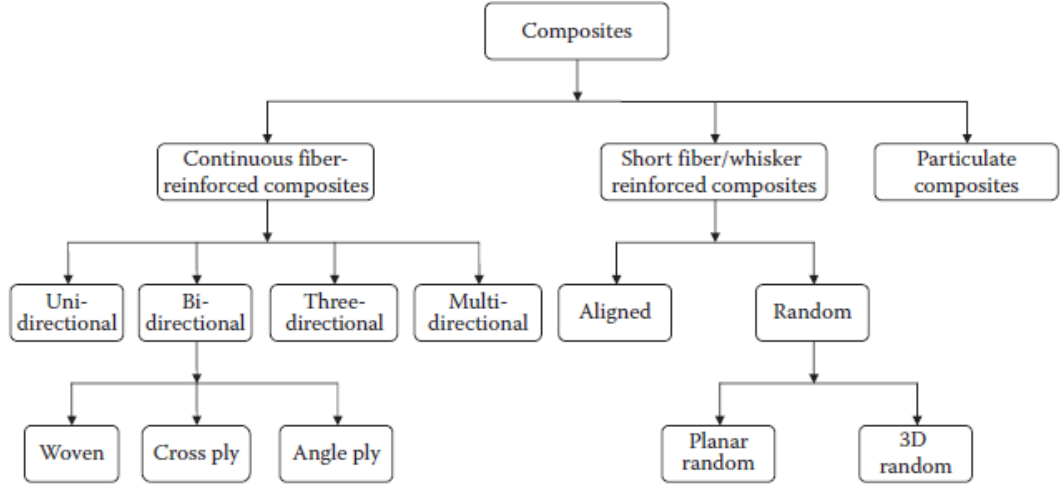
Mühendislerin, çeşitli uygulamalarda kullanmak üzere tasarım ve üretim yapması mümkün olan 50.000'den fazla malzeme vardır. Bu malzemeler, yüzlerce yıldan beri mevcut olan bakır, dökme demir, pirinç gibi sıradan materyallerden, yakın geçmişte üretilen kompozit, seramik ve yüksek performans çelikleri gibi geliştirilmiş malzemelere kadar değişmektedir [7].

Günümüzde, geleneksel malzemelerin performansı sınırlara ulaştığı için, tasarımcılar yeni malzemeler kullanarak fikirlerini hayata geçirmektedirler. Bu yüzden, modern teknolojik uygulamalar için yeni malzemeler geliştirmeye ihtiyaç vardır. Yeni malzemeler; yüksek performanslı, güvenilir, hafif olmalı ve ayrıca kendisinden beklenen pek çok özelliği de bünyesinde barındırmalıdır. Onlar; yüksek sıcaklık ve basınç, alçak sıcaklık ve basınç, yüksek derecede korozif etkiler gibi uç çevresel şartlarda kullanılmaya elverişli olmalıdır. Yıllar boyunca, teknolojik gereksinimleri karşılamak için çok sayıda malzeme geliştirilmiştir. Bazı durumlarda, istenen özellikleri tek bir tipte malzeme kullanarak karşılamak mümkün olmayabilir. Bundan dolayı, malzemelerin birleşimi düşünülmüş ve böylece kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozit bir malzemedeki bileşenlerin en iyi özelliklerini elde etmek mümkündür. Tahminler, kompozitlere talebin sürekli artarak devam edeceğini söylemektedir [8].

“Kompozit” kelimesi, iki veya daha fazla farklı parçadan oluşan anlamına gelir. Kompozit bir malzeme, kompozitin özellikleri farklı (genellikle bileşen parçaların özelliklerinden daha iyi) olacak şekilde, iki veya daha fazla malzeme birleştiğinde oluşmaktadır. Şayet özel bir uygulama için elde edilen özellikler malzemelerin kendi özelliklerinden daha kötü olursa kompozit bir malzemeyi oluşturmanın hiçbir anlamı olmayacaktır [9].

Kompozitler, sürekli ve süreksiz ortamlardan oluşmaktadır. Sürekli ortam “matris” olarak adlandırılırken, genellikle daha sert ve daha güçlü olan süreksiz ortam

“takviyelendirici” olarak adlandırılmaktadır. Bir kompozitin özellikleri; bileşen malzemelerinin özelliklerine, dağılım ve etkileşimine bağlıdır. Kompozit malzemeler; partikül, lifli ve takabalı kompozitler olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir [9]. Şekil 1.1’de kompozit malzemelerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [8]

Kompozit malzemelere örnek olarak çelik ile takviyelendirilmiş beton verilebilir. İlk bakışta; grafit, aramid ve cam gibi fiberlerin, çelik ve alüminyum gibi metallere birkaç kat daha güçlü özgül modüllere sahip olduğu görülebilir. Ancak bu malzemeler, sadece fiberlerden değil, kauçuk ve fiber birleşiminden meydana geldiği için kompozitlerin mekanik avantajları hakkında yanlış bir izlenim verir. Buna karşılık matrisler ise, fiberlerden daha düşük modül ve mukavemete sahiptirler [10].

Kompozit malzemeler; sentetik ve doğal kompozitler olmak üzere genel olarak iki sınıfa da ayrılabilir. Doğal kompozitlerin bazı örnekleri; odun, kemik vb.’dir. Odun, lignin matrisindeki güçlü ve esnek selüloz liflerden oluşan bir kompozittir. Kemiğin bileşenleri; sert, kırılğan hidroksi apatit plaketi ve kollajen adlı güçlü ancak yumuşak proteindir. Bileşenler, doğal kompozitlerin içerisinde iyi oranlarda olmasına rağmen doğal kompozitlerin özelliklerini uygun hale getirmesi çok zordur. Sentetik kompozitler, insan yapımı kompozitlerdir. Sentetik kompozitlerde, istenen özelliklerde bir kompozit malzeme üretebilmek için, oldukça fazla matris ve

takviyelendirici içerisinde uygun olanları seçmek için yeterince esneklik payı vardır. [8].

Otomotiv endüstrisinde, doğal fiber takviyeli kompozitleri kullanmada artan bir eğilim vardır [3]. Dünya çapında önemli araç üreticilerinin çoğu Çizelge 1.1’de listelendiği gibi doğal fiber takviyeli kompozitleri kullanmaktadır.

**Çizelge 1.1** Otomobil modelleri, üreticileri ve doğal fiber takviyeli kompozit kullanan bileşenleri [3]

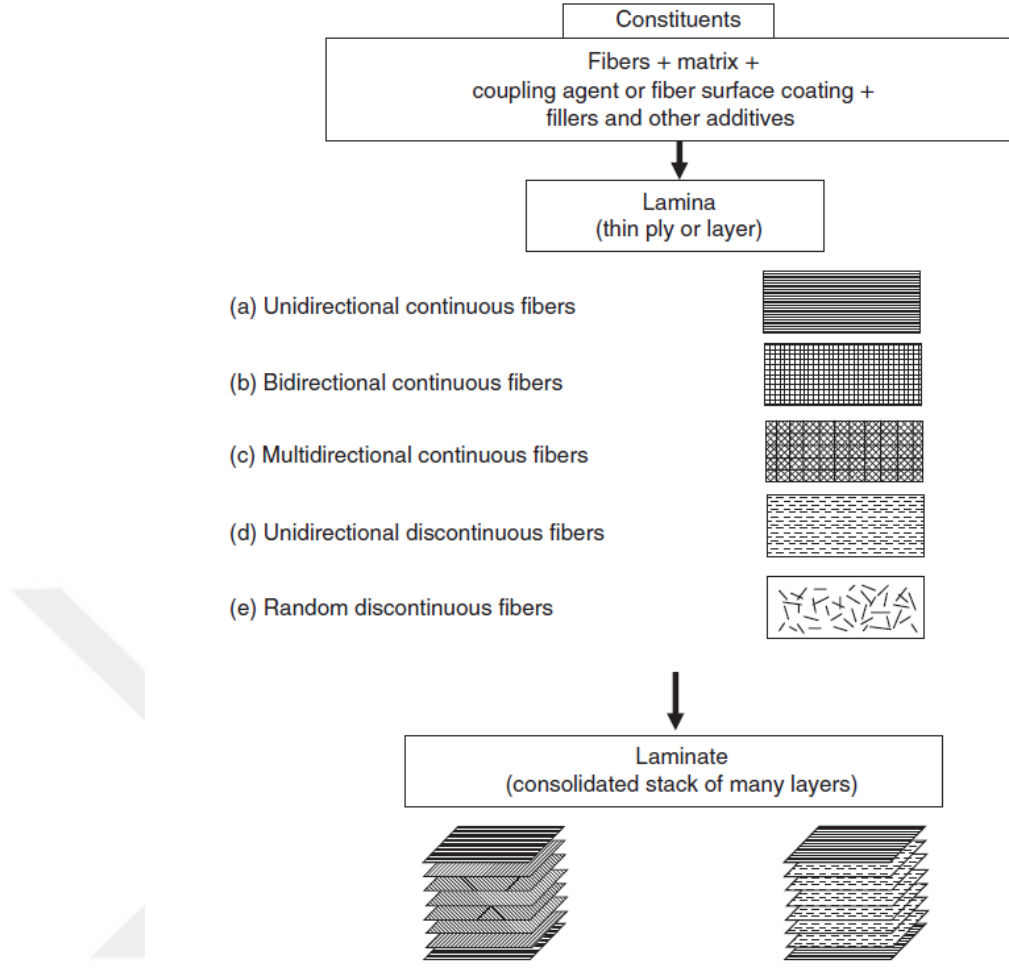
Models	Manufacturers	Components
A2, A3, A4, A4 Avant, A6, A8	Audi	Seat back, side and back door panel, boot lining, hat rack, spare tire lining
Roadstar, Coupe		
C5	Citroen	Interior door paneling
3, 5, 7 series	BMW	Door panels, headliner panel, boot lining, seat back, noise insulation panels, molded foot well linings
Eco Elise	Lotus	Body panels, spoiler, seats, interior carpets
Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156	Fiat	Door panel
Astra, Vectra, Zafira		
406	Peugeot	Front and rear door panels
2000 and others	Rover	Insulation, rear storage shelf/panel
Raum, Brevis, Harrier, Celsior	Toyota	Door panels, seat backs, floor mats, spare tire cover
Golf A4, Passat Variant, Bora	Volkswagen	Door panel, seat back, boot-lid finish panel, boot liner
Space star, Colt	Mitsubishi	Cargo area floor, door panels, instrumental panels
Clio, Twingo	Renault	Rear parcel shelf
Mercedes A, C, E, S class, Trucks, EvoBus (exterior)	Daimler-Benz	Door panels, windshield/dashboard, business table, pillar cover panel, glove box, instrumental panel support, insulation, molding rod/apertures, seat backrest panel, trunk panel, seat surface/backrest, internal engine cover, engine insulation, sun visor, bumper, wheel box, roof cover
Pilot	Honda	Cargo area
C70, V70	Volvo	Seat padding, natural foams, cargo floor tray
Cadillac Deville, Chevrolet TrailBlazer	General Motors	Seat backs, cargo area floor
L3000	Saturn	Package trays and door panel
Mondeo CD 162, Focus, Freestar	Ford	Floor trays, door panels, B-pillar, boot liner



Lifli kompozitler için en yaygın şekilde kullanılan matrisler, “plastik” olarak adlandırılan, organik “süper polimer” malzemelerdir. Lifli kompozitler genellikle tabakalıdır. Yani malzemenin farklı katmanları bir eleman veya plaka oluşturacak şekilde birbirleri ile bağlıdır. Fiber takviyeli malzemelerin tabakaları, çeşitli yönlerde istenen farklı rijitliği ve mukavemeti vermeleri için, her katmandaki yönlendirilmiş fiberlerle farklı yönlerde güçlendirilmektedir. Her bir katmandaki bileşen malzemeler aynı olduğu zaman, tabakalı katmanlar bir “laminat” olarak adlandırılmaktadır. Lifli kompozitlerin mekaniğinin incelenmesi; sürekli ve kısa fiberler olmak üzere iki geniş alana ayrılmaktadır. Takviyelendirici fiberin uzunluğu, kompozitin yapısal davranışını etkiler. Uzunluğu 50 mm’den kısa olan fiber genellikle kısa fiber olarak kabul edilmektedir [9].

Fiber takviyeli bir kompozit malzemedeki ana bileşenler, takviyelendirici fiberler ve fiberleri bağlayıcı olarak davranan matristir. Fiber takviyeli kompozit içerisinde bulunan diğer bileşenler; bağlayıcı malzemeler, astarlar ve dolgu maddeleridir. Bağlayıcı malzemeler ve astarlar, fiber-matris arayüzeyi boyunca olan bağı güçlendirmenin yanında, matrisle fiberler arasındaki ıslatmayı iyileştirmek için de fiberler üzerine uygulanmaktadır. Neticede, her ikisi de fiberler ile matris arasında daha iyi yük transfer edilmesini sağlamaktadır. Dolgu maddeleri, maliyeti azaltmak ve onların boyutsal kararlılığını yükseltmek için bazı polimerik matrislerle birlikte kullanılmaktadır [11].

Kompozit bir yapının üretimi, ince bir matris katmanı içerisinde bir tabaka oluşturacak şekilde, çok sayıda fiberin birleşmesi ile başlamaktadır. Bir tabakanın kalınlığı genellikle 0.1-1 mm arasında değişmektedir. Eğer tabakayı oluşturmak için sürekli (uzun) fiberler kullanılırsa; onlar, ya tek eksenli (Şekil 1.2a, tüm fiberler tek eksenle), ya iki eksenli (Şekil 1.2b, birbirlerine dik olan iki eksenli fiberler) ya da çok eksenli yönlenebilirler (Şekil 1.2c, fiberler ikiden fazla eksenle). Tek eksenli fiberleri içeren bir tabaka için kompozit malzeme, fiberlerin uzunlamasına yönünde en yüksek mukavemet ve modül değerlerine sahiptir. Ancak bununla birlikte, çapraz yönde kompozitin mukavemet ve modül değerleri çok düşüktür. İki yönlü fiberler içeren bir tabaka için; mukavemet ve modül değerleri, uzunlamasına ve çapraz yönlerde farklı miktarlarda fiber kullanarak değişebilir. Dengeli bir tabakada bu özellikler her iki yönde de aynıdır [11].



**Şekil 1.2** Fiber takviyeli kompozitlerde temel yapılar [11]

Bir tabaka, matris içerisinde süreksiz (kısa) fiberler kullanılarak da yapılabilir. Süreksiz fiberler ya tek eksenli yönde (Şekil 1.2d) ya da rastgele yönde sıralanabilir (Şekil 1.2e). Süreksiz fiber takviyeli kompozitler, sürekli fiber takviyeli kompozitlerden daha düşük mukavemet ve modüle sahiptirler. Ancak bununla birlikte, fiberlerin rastgele yönlendirilmesiyle (Şekil 1.2e), tabaka düzleminde tüm yönlerde, eşit mekanik ve fiziksel özellikler elde edilmesi mümkün olmaktadır [11]. Çizelge 1.2’de bir kompozit malzemenin elemanları olan matris ve takviyelendiricinin etkileri gösterilmiştir.

**Çizelge 1.2** Bir kompozitteki matris ve takviyelendiricinin etkileri [12]

Matrix	Reinforcements
<ul style="list-style-type: none"><li>• Gives shape to the composite part</li><li>• Protects the reinforcements from the environment</li><li>• Transfers loads to the reinforcements</li><li>• Contributes to properties that depend upon both the matrix and the reinforcements, such as toughness</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Give strength, stiffness, and other mechanical properties to the composite</li><li>• Dominate other properties such as the coefficient of thermal expansion, conductivity, and thermal transport</li></ul>

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemetli ve yüksek modül değerlerine sahip, matrisin içine yerleştirilmiş veya farklı arayüzeylerle matrise bağlanmış fiberlerden oluşur. Bu şekilde hem fiberler hem de matris, kimyasal ve fiziksel özelliklerini korurlar, ancak yine de yalnız başlarına gerçekleştirilemeyen özelliklerin bir birleşimini meydana getirirler. Genellikle kompozit malzemeyi çevreleyen, bileşenler arasında yükü aktarıcı olarak hareket eden ve malzemeyi; yüksek sıcaklık, nem gibi çevreden gelebilecek zararlara karşı koruyan matris, bütün bileşenleri bir arada istenen yerde ve yönde tutma görevini gerçekleştirirken, fiberler ise yükü taşıyan elemanlardır [11].

Pek çok fiber takviyeli polimer, geleneksel metalik malzemeler ile kıyaslanabilir seviyede ya da daha iyi olan mukavemet ve elastisite modülüne sahiptir. Düşük yoğunluk, mukavemet-ağırlık oranları ve elastisite modülü-ağırlık oranlarından dolayı bu kompozit malzemeler, metalik malzemelerden önemli ölçüde üstündür (Çizelge 1.3). Bunlara ek olarak, pek çok kompozitin yorulma hasar toleransının yanında ayrıca yorulma mukavemeti de mükemmeldir. Bu sebeplerden dolayı, fiber takviyeli polimerler, yapısal malzemelerin bir ana sınıfı olarak ortaya çıkmış olup havacılık, otomotiv ve diğer sektörlerde ağırlığın kritik olduğu pek çok bileşende metallerin yerine kullanımı ya düşünülmekte ya da kullanılmaktadır [11].

**Çizelge 1.3** Bazı metalik ve yapısal kompozit malzemelerin çekme özellikleri [11]

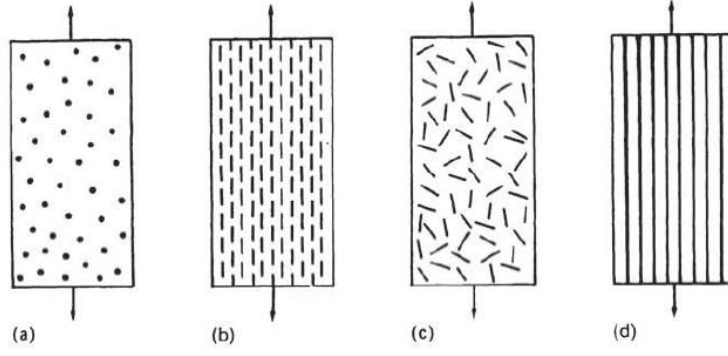
Material <sup>a</sup>	Density, g/cm <sup>3</sup>	Modulus, GPa (Msi)	Tensile Strength, MPa (ksi)	Yield Strength, MPa (ksi)	Ratio of Modulus to Weight, <sup>b</sup> 10 <sup>6</sup> m	Ratio of Tensile Strength to Weight, <sup>b</sup> 10 <sup>3</sup> m
SAE 1010 steel (cold-worked)	7.87	207 (30)	365 (53)	303 (44)	2.68	4.72
AISI 4340 steel (quenched and tempered)	7.87	207 (30)	1722 (250)	1515 (220)	2.68	22.3
6061-T6 aluminum alloy	2.70	68.9 (10)	310 (45)	275 (40)	2.60	11.7
7178-T6 aluminum alloy	2.70	68.9 (10)	606 (88)	537 (78)	2.60	22.9
Ti-6Al-4V titanium alloy (aged)	4.43	110 (16)	1171 (170)	1068 (155)	2.53	26.9
17-7 PH stainless steel (aged)	7.87	196 (28.5)	1619 (235)	1515 (220)	2.54	21.0
INCO 718 nickel alloy (aged)	8.2	207 (30)	1399 (203)	1247 (181)	2.57	17.4
High-strength carbon fiber-epoxy matrix (unidirectional) <sup>a</sup>	1.55	137.8 (20)	1550 (225)	—	9.06	101.9
High-modulus carbon fiber-epoxy matrix (unidirectional)	1.63	215 (31.2)	1240 (180)	—	13.44	77.5
E-glass fiber-epoxy matrix (unidirectional)	1.85	39.3 (5.7)	965 (140)	—	2.16	53.2
Kevlar 49 fiber-epoxy matrix (unidirectional)	1.38	75.8 (11)	1378 (200)	—	5.60	101.8
Boron fiber-6061 Al alloy matrix (annealed)	2.35	220 (32)	1109 (161)	—	9.54	48.1
Carbon fiber-epoxy matrix (quasi-isotropic)	1.55	45.5 (6.6)	579 (84)	—	2.99	38
Sheet-molding compound (SMC) composite (isotropic)	1.87	15.8 (2.3)	164 (23.8)	—	0.86	8.9

<sup>a</sup> For unidirectional composites, the fibers are unidirectional and the reported modulus and tensile strength values are measured in the direction of fibers, that is, the longitudinal direction of the composite.

<sup>b</sup> The modulus-weight ratio and the strength-weight ratios are obtained by dividing the absolute values with the specific weight of the respective material. Specific weight is defined as weight per unit volume. It is obtained by multiplying density with the acceleration due to gravity.

Çelik ve alüminyum gibi geleneksel yapısal metaller, ölçüm yönüne bakılmaksızın eşit veya hemen hemen eşit özellikler gösterdiği için izotropik olarak düşünülmektedir. Genel olarak fiber takviyeli bir kompozitin özellikleri, ölçüm yönüne son derece bağlıdır ve dolayısıyla onlar izotropik malzeme değildir. Örneğin, tek eksen doğrultusunda fiber takviyeli bir polimerin çekme mukavemeti ve elastisite modülü özellikleri, fiberlerin uzunlamasına yönünde ölçüldüğü zaman maksimumdur. Herhangi bir başka ölçüm açısında bu özellikler daha düşüktür. Fiberlerin yönü çapraz olduğunda, yani uzunlamasına yönüne 90°'de (dik olarak) ölçüldüğü zaman minimumdur. Benzer şekilde açı değişiminin etkisi; darbe mukavemeti, termal genleşme katsayısı ve termal iletkenlik gibi diğer mekanik ve termal özellikler için de gözlenmektedir [11].

Çeşitli tipteki fiberler; uzunluğu boyunca, yığın halindeki daha dayanıklıdır. Bu, fiberin küçük kesitsel ölçülerinden dolayıdır. Bu durum; moleküler eksikliklerin, kusurların ve dislokasyonların doğal varlığını en aza indirir. Mühendislik uygulamaları için yaygın olarak kullanılan sentetik (insan yapımı) fiberler arasında cam, karbon (grafit) ve kevlar (aramid) sayılabilir [9]. Şekil 1.3'de kompozitlere ve takviyelendirici şekillerine çeşitli örnekler verilmiştir.



**Şekil 1.3** Kompozit örnekleri: (a) rastgele parçacıklı, (b) tek eksenli, süreksiz fiberler (c) rastgele, süreksiz fiberler, (d) tek eksenli, sürekli fiberler [13]

Hiper-elastik malzemeler yaygın olarak araç lastiklerinde, konveyör ve güç iletim bantlarında, süspansiyon sistemlerinde, biyolojik dokularda (arterial duvarı, bağ doku) vb. yerlerde kullanılmaktadır [14-15]. Şekil 1.4’de havalı körüklere örnekler gösterilmiştir. Şekil 1.5’te ise araç lastiklerinde kullanılan takviyelendirme görülmektedir.



**Şekil 1.4** Havalı körükler [16-17]



**Şekil 1.5** Goodyear Eagle® F1 GS-D3™ marka lastik [18]

## 1.2 Kauçuklar

Gerek doğal gerekse yapay kauçukların hepsi elastomer adlı polimer sınıfının bir parçasıdır. Bu yüzden, öncelikle elastomer kavramını açıklamak gerekir. Elastomer, oda sıcaklığında başlangıçtaki boyunun en az iki katına kadar uzayabilen ve bu uzamaya sebep olan kuvvet üzerinden kalktığı zaman, hemen hemen ilk haline dönebilen, polimer grubunun bir üyesidir [19].

Kauçuk olarak bilinen ticari malzeme (veya daha açık ismiyle “doğal kauçuk”) “Hevea Brasiliensis” ağacından lateks şeklinde elde edilmektedir. Kauçuk kelimesi, 1770’de kimyacı Priestley tarafından bahsedilen, bu malzemenin kağıttan izleri silme kabiliyetinden türemiştir. Mevcut kullanımda, kauçuk terimi doğal kauçuk ile sınırlı değildir [20].

Dünya çapındaki doğal kauçuk tüketimi; araç lastikleri (%75), otomotiv mekanik ürünleri (%5), otomotiv dışı mekanik ürünler (%10), tıp ve sağlıkla ilgili çeşitli ürünler gibi (%10) çeşitli uygulamalar arasında paylaşılmaktadır. 1960’lardan beri, kauçuk sınıflarını tanımlamak için standart şartların uygulanmasından dolayı, doğal kauçuğun kalitesi ve kıvamı gelişmiştir “.

Kauçukların pek çok alanda kullanım yeri bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak; araç lastikleri, havalı körükler, yakıt ve fren hortumları, transmisyon kayışları, contalar, konveyör bant imalatı, biyolojik dokular, ayakkabılar, balonlar vb. verilebilir [14-15,19]. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’te kauçuğun elde edildiği ağaç “Hevea Brasiliensis” gösterilmiştir.



**Şekil 1.6** Geleneksel bir bıçak kullanarak Hevea ağacından lateks akıtması (solda); mekanize edilmiş bir bıçak kullanarak (sağda) [22]



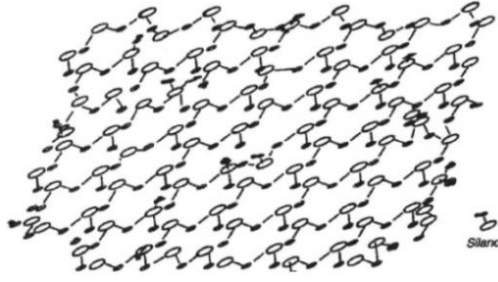
**Şekil 1.7** Kauçuk ağacı Hevea Brasiliensis’den lateks çıkarılması [23]

“Hevea Brasiliensis” isimli ağaç, genellikle Brezilya ormanlarında yetiştirilmekte olup bu ağacın özünde poliizopren isimli kimyasal bulunmaktadır. Bu kimyasal, kauçuk özellikle de vulkanizasyon işlemi ile kimyasal olarak değiştirildiği zaman, kauçuğa, önemli ölçüde uzadıktan sonra orijinal şekline geri dönme kabiliyeti kazandırır. Suzuki’nin belirttiği gibi, bu elastik özellik milyar dolarlık endüstriyi ortaya çıkarmıştır [24].

Kauçuk benzeri malzemelerin en önemli fiziksel karakteristiği, nispeten küçük gerilme davranışları altında gösterdikleri yüksek derecede deforme edilebilirliktir [20]. Kauçuk, özellikleri zamanla değişen ve çevreden etkilenen kompleks bir malzemedir. Kauçuğun özellikleri; ısı, yağ, kimyasallar, güneş ışığı ve hava ile temas ettiği zaman bozular. Sıkıştırılmayan malzemeler olarak kauçuklar, büyük şekil değiştirmelerinin altında doğrusal olmayan elastikiyet gösterirler [25].

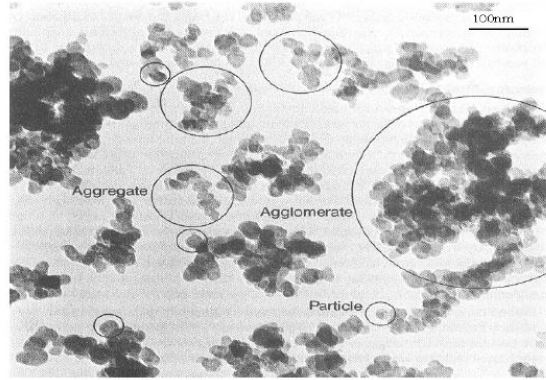
Tozlar, kauçuk karışımlar için, dolgu maddeleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. En popülerleri; karbon siyahı, silika, kaolin veya daha güncel olarak grafen, fulleren ve karbon nanotüplerdir. Karışımlardaki ana problemlerden birisi, dolgu maddelerinin kümeleşme eğilimidir. Yani, daha düşük seviyedeki dolgu maddeleri ile birleşen daha büyük ikincil yapıların oluşması problemidir. Tozların yüzey modifikasyonu, kauçuk matris ile dolgu maddeleri arasındaki etkileşimi iyileştirebilir. Bu amaç için düşük sıcaklıklı plazma muamelesi son zamanlarda gittikçe dikkat çekmektedir. Silika, kauçuk teknolojisinde kullanılan en popüler mineral dolgu maddelerinden birisidir. Amorf bir malzeme rastgele şekilde, fonksiyonel silanol grupları ile birlikte yerleşirken (Şekil 1.8) çevre moleküllerle kolaylıkla hidrojen bağı üretir [26].





**Şekil 1.8** Silika'nın yüzey kimyası [26]

Karbon siyahı, endüstride, kauçuğu güçlendiren dolgu maddesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Tamamlanmayan doğal gaz yanmasından oluşan karbon siyahı, yüzey üzerinde asidiktir. Karbon siyahı ayrıca, oksijen yokluğunda hidrokarbonların termal çatlamları ile de üretilebilir. Karbon siyahı parçacıkları, tipik olarak 20 nm'den 300 nm'ye değişen boyutlara sahiptir. Karbon siyahının; partikül, küme ve yığın olmak üzere kauçuk kompozitlerde mevcut olan üç biçimsel şekli vardır (Şekil 1.9) [6].



**Şekil 1.9** Karbon siyahının morfolojisi [6]

Karbon siyahı, elastisite modülü ve çekme mukavemeti gibi hem fiziksel hem de kimyasal olarak bağ kurduğu kauçuğu güçlendirme kabiliyetindedir. Karbon siyahı güçlendirmesi, polimerin zincir parçalarının kısmen sabitlenmesini sağlar. Vulkanizasyon ve karbon siyahı güçlendirmesi tarafından bir elastomerin modifikasyonu, yumuşak elastomeri güçlü elastik bir ürüne dönüştüren eşsiz bir üç boyutlu visko-elastik ağ oluşturur [22].



Kauçuklar, güçlendirilme işlemi gerçekleştirilmeksizin sınırlı kullanım alanına sahiptirler. Güçlendirilen kauçuk kompozitlerin mukavemeti, güçlendirilmeyenlerden 10 kat daha yüksek olabilir. Bu yüzden kauçuk kompozitler; araç lastiklerinden, contalara ve valflere kadar değişen çeşitli uygulamalarda, üstün mekanik elastik özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır. Silika ve karbon siyahı, kauçuk lastiklerde en yaygın kullanılan iki güçlendirme malzemesidir. Ancak onlar, yenilenemeyen malzemelerden meydana gelmekte olup, maliyetleri yüksektir. Üretimleri, büyük miktarda enerji gerektirmekte, sahip oldukları yüksek yoğunluk ise araç lastik uygulamaları için olumsuz etki oluşturmaktadır. Ayrıca, kullanılan lastikler yakılarak imha edildiği zaman silika büyük miktarda küle de sebep olmaktadır. Ucuz, yenilenebilir ve kolay kullanılabilir olan yeni bir güçlendirici dolgu malzemesine ihtiyaç vardır [6].

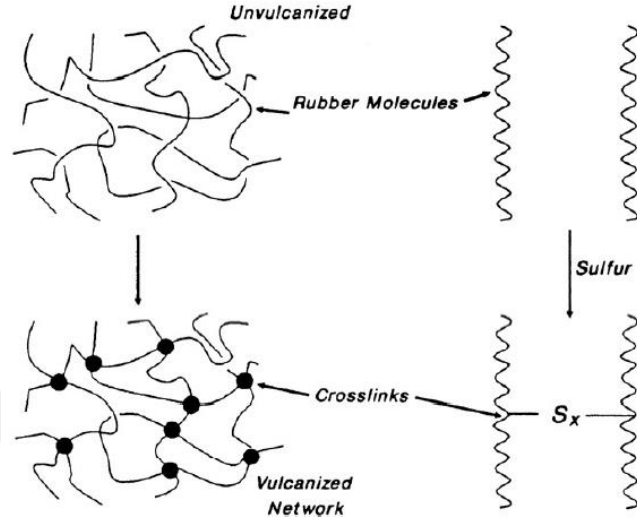
Kauçuklar; doğal kauçuk ve sentetik kauçuk olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sentetik kauçuklar ise; poliizopren kauçuk, stiren bütadien kauçuk, polibütadien kauçuk, akrilonitril bütadien kauçuk, kloropren kauçuk, bütül kauçuk, etilen-propilen kauçuk şeklinde gruplandırılabilir [27]. Bu tez kapsamında, doğal kauçuk kullanılmış olup, doğal kauçuğun mekanik özellikleri üzerinde durulmuştur.

### **1.3 Vulkanizasyon**

Vulkanizasyon veya çapraz bağlanma (crosslinking); kürleme işlemi yapılmamış, uzun zincirli kauçuk moleküllerinin üç boyutlu bir elastik ağa çapraz bağlanma ile bağlandığı kimyasal bir işlemi ifade etmektedir. Çapraz bağlanma, peroksit gibi başka kimyasalları kapsayabilse de, vulkanizasyon ifadesi genel olarak kükürt çapraz bağlarını işaret etmektedir [28]. Başka bir ifade ile vulkanizasyon, elastomerlerin çeşitli kimyasalların kullanılmasıyla pişirilmesi işlemidir. Bu sayede elastomerlerin arzu edilmeyen özellikleri uzaklaştırılmış olup ticari amaçlı kullanıma uygun bir hale gelirler [19].

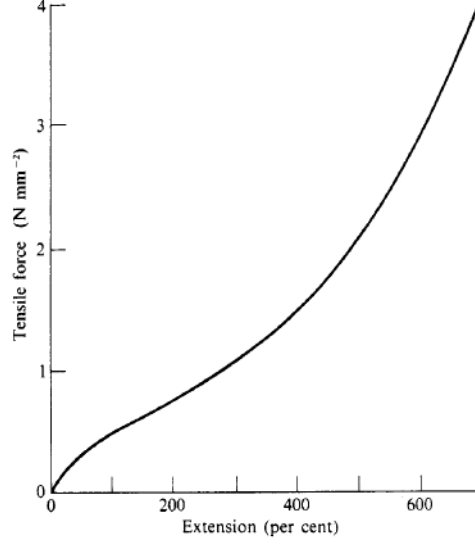
Vulkanizasyon, genel olarak kauçuk veya elastomer malzemelere uygulanan bir işlemdir. Bu malzemeler, mekanik olarak uygulanan, oldukça yüksek bir deformasyondan sonra, zorlayıcı şekilde yaklaşık olarak orijinal şekillerine dönerler. Vulkanizasyon, deforme edici kuvvetin çekilmesinden sonra devam eden kalıcı

deformasyonun miktarını azaltan ve geri çekilebilme kuvvetini arttıran bir işlem olarak tanımlanabilir. Böylece vulkanizasyon işlemi, plastisiteyi azaltırken elastisiteyi arttırmaktadır. Bu durum genellikle çapraz bağlanmış moleküler bir ağ oluşumu ile gerçekleştirilmekte olup, bu olay Şekil 1.10’da gösterilmiştir [21].



Şekil 1.10 Ağ oluşumu [21]

Vulkanizasyon işlemi; araç lastiği ve mekanik ürünler gibi pek çok yararlı kauçuk maddesi üretmek için gereklidir. Vulkanize edilmemiş kauçuk, genel olarak güçlü değildir, büyük bir deformasyona uğradıktan sonra orijinal şekline geri dönmez ve çok yapışkan olabilir. Kısacası, vulkanize edilmemiş kauçuk sakıza benzer bir kıvama sahiptir [21]. Şekil 1.11’de vulkanizasyon işlemine uğramış bir kauçuğun çekme kuvvet-uzama diyagramı gösterilmiştir.



**Şekil 1.11** Vulkanize edilmiş kauçuk için tipik kuvvet-uzama eğrisi [20]

Vulkanizasyon işleminden sonra kauçuk zincirleri büyük bir ağ oluşturur. Vulkanize edilmiş kauçuk kompozitler organik çözücüde çözünmezler ve yüksek viskoziteye sahiptirler [6]. Doğal kauçuk ile vulkanize edilmiş kauçuğun genel olarak özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 1.4’te verilmiştir.

**Çizelge 1.4** Doğal kauçuk ile vulkanize edilmiş kauçuğun karşılaştırılması [29]

<i>Property</i>	<i>Raw rubber</i>	<i>Vulcanized rubber</i>
1. Resilience	good	much better
2. Quality	inherent	can be controlled by vulcanization
3. Elasticity	very high	low, depending on percentage of sulfur
4. Tackiness	marked	low
5. Resistance to organic solvents	low	much higher but swells
6. Tensile strength	200 kg/cm <sup>2</sup>	2000 kg/cm <sup>2</sup>
7. Durability	less	better
8. Insulation property	good	much better
9. Useful temperature range	10 °C to 60 °C	-40 °C to 100 °C
10. Chemical resistance	very bad	very good
11. Water absorption tendency	large	small

Kauçuk bileşenlerinin uygun şekilde karıştırılmasından ve kalıp içerisinde üretilmesinden sonra, onlar için uygun işlemlerden biri ile vulkanizasyon edilmelidir. Vulkanizasyon sırasında aşağıdaki değişiklikler meydana gelir:

1. Kauçuğun uzun molekül zincirleri, vulkanizasyon ajanları ile birlikte üç boyutlu yapılar oluşturacak şekilde reaksiyonlar vasıtasıyla çapraz bağlanır.

Bu reaksiyon, güçsüz ve yumuşak plastik benzeri malzemeyi, güçlü bir elastik ürüne dönüştürür.

2. Kauçuk yapışkanlığını kaybeder ve çözücüler içerisinde çözünmez bir hale gelir. Ayrıca ısı, ışık ve yaşlandırma işlemleri tarafından normal olarak sebep olunan bozulmaya karşı daha dirençli bir hal alır.

Bu değişiklikler genel olarak aşağıdaki vulkanizasyon sistemlerinin kullanımıyla meydana gelir [22].

### 1.3.1 Vulkanizasyon sistemleri

#### Kükürt vulkanizasyonu

Çizelge 1.5'deki verilerden, en yaygın kullanılan kauçukların, genel kullanım amaçlı olanlar olduğu açıktır. Bu kauçuklar, doymamış bağlar içerdiği için, kükürt ile vulkanizasyonları mümkündür. Ayrıca kükürt en yaygın kullanılan vulkanize edici ajandır [22].

**Çizelge 1.5** Tipik ticari kauçuklar [22]

<i>Common Name</i>	<i>ASTM Designation (D1418-81)</i>	<i>Consumption (U.S.) in Metric Tons (1983)<sup>a</sup></i>	<i>Price<sup>b</sup> (\$/lb)</i>
<b>General Purpose</b>			
Natural	NR	676,267	0.44
Polyisoprene	IR	*	0.72
Styrene-butadiene	SBR	887,005	0.66
Butyl	IIR	*	0.76
Ethylene-propylene	EPDM	141,490	1.01
Polybutadiene	BR	355,541	0.74
<b>Solvent Resistant</b>			
Polysulfides (Thiokol)	T	*	1.83
Nitrile	NBR	57,239	1.10
Polychloroprene (Neoprene)	CR	85,096	1.28
<b>Polyurethanes</b>			
Polyester	AU	N.A.*	3.00
Polyether	EU	N.A.*	3.70
Epichlorohydrin	CO	*	2.24
Epichlorohydrin-ethylene oxide	ECO	*	2.19
<b>Heat Resistant</b>			
Silicone	MQ	*	4.40
Chlorosulfonated-polyethylene (Hypalon)	CSM	*	1.32
Polyacrylates	ACM	*	2.66
Fluororubbers	CFM	*	15.10

<sup>a</sup>Natural Rubber News, April 1984.

<sup>b</sup>Average prices for most common grade, December 1984.

\*Total for all rubbers, excluding urethanes 334,420.

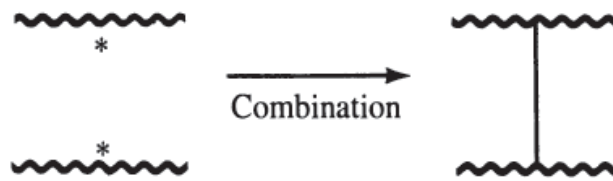
Total consumption, <sup>a</sup> synthetic rubbers	1,860,792
natural rubber	676,267
Total consumption	2,537,059

## Kükürtsüz vulkanizasyon

Bu işlemde vulkanizasyon, kükürt elementi olmaksızın gerçekleşir. Tiuram disülfid bileşenler (hızlandırıcılar), selenyum veya tellür kullanımı vasıtasıyla ısı yaşlandırmasına daha dirençli olan ürünler üretilir. Tiuram disülfid sayesinde, sadece 1 veya 2 kükürt atomu içeren etkili çapraz bağlar bulunmakta ve bu bağlar, hızlandırıcı bölümlere ek olarak antioksidan gibi davranır [22].

## Peroksit vulkanizasyonu

Doymuş kauçuklar, kükürt ve hızlandırıcılar ile çapraz bağlanmayabilir. Organik peroksitler, bu kauçukların vulkanizasyonu için gereklidirler. Peroksitler çözüldüğü zaman, polimer zincirler üzerinde serbest kökler oluşmaktadır ve bu zincirler daha sonra çapraz bağlar oluşturacak şekilde birleştirilebilirler [22]. Bu olay Şekil 1.12'de gösterilmiştir.



Şekil 1.12 Peroksitlerin çözünmesi ile oluşan çapraz bağlanmalar [24]

Bu tip çapraz bağlar sadece karbon-karbon (C-C) bağları içerir ve oldukça dengelidir. Bu bağlar ayrıca, gama ve X radyasyonu ile de oluşmaktadır [22].

### 1.3.2 Vulkanizasyon koşulları

Vulkanizasyon işlemlerinde; ilgili maddelerin kalınlığındaki farklılıklar, vulkanizasyon sıcaklığı ve kauçukların termal dengesi göz önüne alınmalıdır [22]

#### a) Kalınlık etkisi

Kauçuklar kötü ısı ileticileridir. Bu yüzden 0.25 inç'ten daha kalın maddeler vulkanize edileceği zaman; ısı taşınımı, ısı kapasitesi, kalıp geometrisi, ısı değişim sistemi ve belli bir bileşenin kütleme özelliklerini göz önüne almak gerekir [22].

## **b) Sıcaklık etkisi**

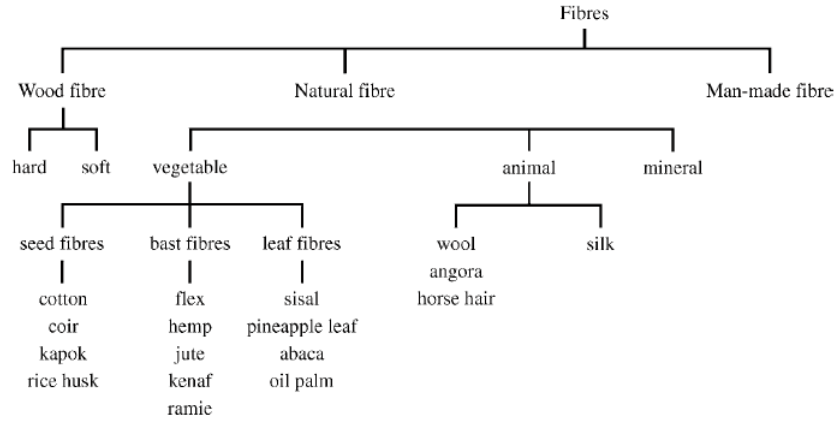
Vulkanizasyon sıcaklığı; üniform fiziksel özelliklere sahip, uygun şekilde kürlenmiş bir ürün üretmek için mümkün olan en kısa kalıplama zamanında seçilmelidir. Vulkanizasyon sıcaklık katsayısı, farklı sıcaklıklarda, farklı kür zamanları arasında var olan ilişkiyi tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu bilgi sayesinde, daha yüksek veya daha düşük sıcaklıklardaki en uygun kür zamanları pek çok kauçuk bileşeni için, bilinen vulkanizasyon katsayılarıyla tahmin edilebilir. Örneğin, çoğu kauçuk bileşeni yaklaşık 2 katsayısına sahiptir. Bu, kür zamanının her 10 °C'lik kür sıcaklığındaki artış için 2'lik bir faktörle azaltılması gerektiğini veya sıcaklık 10 °C azaltılırsa, kür zamanının iki katına çıkarılması gerektiğini gösterir [22].

## **c) Termal denge etkisi**

Her kauçuğun, vulkanizasyon için kullanılabilen belli bir sıcaklık aralığı vardır. Bu sıcaklıklar, bir dereceye kadar değişebilir fakat bozulmalardan kaçınmak için her kauçuk çeşidinin maksimum değeri aşmaması oldukça önemlidir. Termal etki ya bitmiş ürünün görünümüyle ya da onun fiziksel özellikleriyle kendini göstermektedir [22].

## **1.4 Takviyelendiriciler**

Doğal fiberler genel olarak incelendiği zaman, bu tekstil ürünlerinin kökeni: bitkiler, hayvanlar veya mineraller olmak üzere Şekil 1.13'de görüldüğü gibi üç ana gruba ayrılmaktadır. Bitki lifleri; hasır lifi, yaprak veya çekirdek lifi olabilir. Bitki lifleri, genellikle plastikleri takviyelendirmek için kullanılmaktadır. Bitki dünyası, hücre ve hücre gruplarının mukavemet ve rijitlik sağlamak için tasarlandığı örneklerle doludur. Selüloz, yüksek mukavemet ve rijitlik özellikleri olan doğal bir polimer olup, uzun lif hücrelerinin yapı malzemesidir. Bu hücreler bitkinin gövdesinde, yapraklarında veya tohumunda bulunabilir. Ayrıca, odun lifleri de selüloz tabanlı lifler içermekte olup, bu lifler bitki liflerinden farklıdır [30].



**Şekil 1.13** Fiberlerin sınıflandırılması [30]

Fiberler, diğer takviyelendirici malzemelerden daha güçlü ve rijittir. Fiberler, matris bileşeninin özelliklerini, istendiği gibi iyileştirdiğinden dolayı, takviyelendirmenin önemli bir sınıfıdır. Genel olarak lif; uzunluğu, genişliğinin veya çapının en az 200 katı olan ve sürekli olan tek bir malzeme anlamına gelir [29].

Fiberler, sürekli filament olan veya farklı uzunluklu parçalar olan bir malzeme sınıfıdır. Onlar; filamentlere, sicim veya ipe eğrilebilir. Fiberler, doğal ve sentetik olmak üzere iki çeşittir. Kompozitlerde kullanılan farklı fiberlerin tümü farklı özelliklere sahiptir ve bu yüzden kompozitlerin özelliklerini farklı şekillerde etkilerler. Pek çok takviyelendirici fiberin mekanik özelliği, takviyelendirilmemiş sistemlerinkinden önemli ölçüde daha yüksektir. Bu yüzden, fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, fiberlerin, kompozit malzemeye olan katkısını açıkça göstermektedir. Fiberlerin katkısını kontrol eden dört ana faktör şunlardır: 1) fiberlerin temel mekanik özellikleri; 2) fiber ve reçinenin yüzey etkileşimi; 3) kompozitteki fiber sayısı ve 4) kompozitteki fiberlerin yönü [29].

Bu fiberler, sürekli olarak uzunlamasına veya süreksiz (kısa) olarak matris ile birleşebilir. Hem doğal hem de sentetik fiberlerin bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Doğal fiberler; düşük aşınma direncine, düşük yoğunluğa, yüksek tokluğa, iyi termal özelliklere, geliştirilmiş enerji kazanımına, biyo-bozunabilirliğe vb. özelliklere sahiptirler. Doğal fiberler; çevre dostu olması, fiberlerin yenilenebilirliği, iyi ses azaltma kapasitesi ve parçaların ağırlıklarının azaltılmasından doğan gelişmiş yakıt verimliliği gibi avantajlar sunan kompozitler üretilmesini sağlar. Diğer yandan,

sentetik fiberlerle takviyelendirilen kompozitler; yüksek mukavemetleri ve neme karşı gösterdikleri daha iyi direnç sebebiyle ilgi çekmektedir [29].

#### 1.4.1 Doğal fiberler

Doğal fiberlerin iki ana kaynağı bitkiler ve hayvanlardır. Hayvan tabanlı fiberlerin ana bileşeni çeşitli proteinlerdir. Örnek olarak tiftik, yün, ipek, alpaka, angora vb. verilebilir. Bitki fiberlerinin bileşenleri, lignin ve yarıselülozun amorf bir matrisle dağılmış selüloz mikrofibrilleridir. Örnek olarak pamuk, jüt, keten, sisal, kendir vb. verilebilir [29].

Doğal fiber takviyeli polimerler, son yıllarda otomotiv endüstrisinde ilgi uyandırmışlardır. Doğal fiber takviyeli kompozitlerin uygulamaları; kapı iç panel, arka koltuk, çatı iç paneli vb.'dir. Doğal fiberler, otomotiv sektöründe aşağıdaki sebeplerden dolayı kullanılmaktadır:

- a) Doğal fiberler cam ve karbon fiberlere kıyasla çok düşük maliyetlidir.
- b) Doğal fiberler, biyo-bozunabilir ve çevre dostudur. Cam ve karbon fiberlerin aksine, onları üretmek için gereken enerji çok düşüktür.
- c) Doğal fiberlerin yoğunluğu  $1.25-1.5 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Oysa E-cam fiberleri ve karbon fiberlerinin yoğunlukları sırasıyla  $2.54 \text{ g/cm}^3$  ve  $1.8-2.1 \text{ g/cm}^3$ 'dür.
- d) Doğal fiberlerin, otomotiv uygulamalarında gittikçe önemli hale gelen ses sönümleme kabiliyeti, cam veya karbon fiberlerden daha iyidir.

Yukarıdaki avantajlarının yanında, doğal fiberlerin aşağıdaki gibi bazı sınırlamaları da mevcuttur:

- a) Doğal fiberlerin mukavemeti nispeten düşüktür.
- b) Nemi absorbe ederler.
- c) Doğal fiberler, cam veya karbon gibi sentetik fiberlere kıyasla daha düşük bir sıcaklıkta çözünmeye başlarlar [29].

#### 1.4.2 Sentetik fiberler

Bor, silisyum karbür ve alüminyum oksit sınırlı miktarlarda kullanılsa da ticari kullanımdaki temel sentetik fiberler; cam, karbon veya aramidin çeşitli tipleridir. Sentetik fiberler genel olarak boyut bakımından daha tekdüze, daha ekonomik olup daha tahmin edilebilir şekilde hareket eder. Seramik, cam fiberler, grafit-karbon, bor



karbür ve silisyum karbür gibi en güçlü ve rijit fiberleri yapı malzemesi olarak kullanmak zordur. Ancak bununla birlikte, bu gibi malzemeleri kırılğan bir matrisle yerleştirme (bir polimer veya metal), onların daha güçlü, rijit ve tok bir malzeme olarak davranmasına imkan verir [29]. Çizelge 1.6’da sentetik ve doğal fiberlerin bazı mekanik özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 1.6** Bazı sentetik ve doğal (bitkisel) fiberlerin mekanik özellikleri [4]

<i>Fibre type</i>	<i>Density</i> ( $Mg\ m^{-3}$ )	<i>Young's modulus</i> ( $GN\ m^{-2}$ )	<i>Tensile strength</i> ( $MN\ m^{-2}$ )	<i>Failure strain</i> (%)
<i>Synthetic fibres</i>				
E-glass	2.56	76	2000	2.6
high strength carbon	1.75	230	3400	3.4
Kevlar™ (aramid)	1.45	130	3000	2.3
boron	2.6	400	4000	1.0
<i>Natural fibres</i>				
flax	1.4-1.5	50-70	500-900	1.3-3.3
hemp	1.48	30-60	310-750	2-4
jute	1.4	20-55	200-450	2-3
sisal	1.45	9-22	80-840	3-14
cotton	1.5	6-10	300-600	6-8

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde fiber takviyeli kompozitler üzerine yapılan pek çok çalışma mevcuttur. Burada, özellikle sürekli fiber takviyeli kauçuklar ve diğer fiber takviyeli kauçuk kompozitler incelenmiş olup kısa özetler halinde verilmiştir.

### 2.1 Sürekli Fiber Takviyeli Kompozitlerle İlgili Çalışmalar

Abadi, tek eksenli sürekli fiberlerle takviyelendirilen sonlu şekil değişikliğine uğrayan elastomer malzemelerin mekanik davranışlarını belirlemek için yapısal bir model geliştirmiştir. Heterojen mikroyapıyı, eşdeğer makroskobik deformasyonlara maruz kalan örnek bir hacim eleman ile tanımlamıştır. Mikromekanik sonuçların, tek eksenli fiber takviyeli elastomerlerin şekil değiştirme enerjisinin, ilave analiz ile izotropik ve anizotropik modellere tanımlanabileceğini göstermiştir [5].

Li ve arkadaşları, doğal bir kauçuk/stiren bütadien kauçuk matrise yapışmayı ve mekanik özellikleri iyileştirmek için, sürekli bazalt fiberleri, birleştirici bir silan maddesi işlemiyle ve silan olmaksızın, resorçional-formaldehide-latex (RFL) sistemine daldırmışlardır. Bir test makinesi yardımıyla, iplerin kopma kuvvetini ve kopmadaki uzamasını test etmişlerdir. Yapışma özelliklerini hem statik hem de dinamik (yorulma) modları ile H-şekilli kauçuk fiber numuneleriyle değerlendirmişlerdir [31].

Herrera-Franco ve arkadaşları, sürekli doğal fiberlerle takviyelendirilen yüksek yoğunluklu polietileni (HDPE)'yi incelemişlerdir. Fiber-matris etkileşimini; ilk olarak temas alanını arttırmak, selüloz mikrofibrillerini ortaya çıkarmak ve fiber ıslaklığını ve emilimini iyileştirmek için, fiberin yüzey özelliklerine müdahale ederek değiştirmişlerdir. [32].

Wongsriraksa ve arkadaşları, sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozit üretimi için fiberleri, örgü tekniği ile güçlendirmenin yanısıra reçineli fiberleri dizerek de araştırmışlardır. Doğal fiber ve reçine arasındaki arayüzey özelliklerinin düşük olduğunu, bu yüzden poliüretan ve flex epoksi kullanarak arayüzey özelliklerini iyileştirmek için sürekli fiberler üzerinde yüzey işlemi gerçekleştirmişlerdir. Sürekli

doğal fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde yüzey işleminin etkisi incelenmiştir [33].

Lahellec ve arkadaşları, sürekli fiberlerle hiper-elastik kompozitlerin periyodik davranışlarını teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Ponte Castaneda'nın, "doğrusal olmayan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin etkinliği için ikinci dereceden tahminler" teorisini ele almışlardır. Yaptıkları çalışma sayesinde, kompozit malzemelerin davranış tahminlerinin, sonlu eleman yöntemleriyle yaptıkları karşılaştırmalara kıyasla, sıkıştırılabilen malzemeler için sıkıştırılamayanlardan çok daha doğru olduğunu göstermişlerdir [34].

Oman ve arkadaşları, kauçuk-fiber kompozit malzemesinden yapılan havalı körüklerin içerisindeki gerilme-gerinim durumlarını belirlemek için sonlu eleman analizini kullanmışlardır. Havalı körükler üzerindeki yorulma deneyleri, körük kompozit üzerindeki en kritik katmanın, iç kauçuk katmanı olduğunu göstermiştir. İç katman üzerindeki çatlakların, havalı körükten basınçlı havanın sızmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir [35].

Oman ve arkadaşları, havalı körük yorulma ömrü tahmini için geliştirilmiş bir metot kullanmışlardır. Ayrıca fiber açısının havalı körüklerin dış özellikleri ve yorulma ömrü üzerindeki etkisini de araştırmışlardır. Hasarı, yorulma ömrünü ve deneysel yorulma verisini sonlu eleman analizleri ile hesaplamak için ABAQUS yazılımını kullanmışlardır. Araştırma, fiber açısının havalı körük ömrü ve dış özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir [36].

Tsai ve arkadaşı, polyester lastik-fiber katmanlarının ve yönlerinin değişiminin, kloropren kauçuk kompozitler üzerindeki mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmanın deneysel sonuçları, kloropren kauçukların vulkanizasyon için uygun sıcaklık ve ısıtma zamanının 170 °C ve 35 dakika olduğunu göstermiştir. Lastik fiberleri ve kloropren kauçuğun uzama yönü dikey olduğu zaman kauçuğun eğilme-yorulma direncini azaltan çatlak oluşumu ve ilerlemesi kolayca devam etmektedir [37].

Mankovits ve arkadaşı, bir kauçuk tamponun havalı körüklerde uyguladığı büyük yer değiştirmeler ve deformasyonlar için bir temas probleminin çözümünü analiz etmişlerdir. Doğrusal olmayan yüke karşılık yer değiştirme eğrisi belirlenmiştir. Hemen hemen sıkıştırılmayan, aksel olarak simetrik kauçuk parçaların analizi için FORTRAN'da yazılan bir FEM kodu geliştirilmiştir [38].

Wei-min ve arkadaşları, fiber takviyeli kauçuk kompozit olan bir havalı körüğün statik rijitlik özellikleri ve deformasyon davranışı için analiz gerçekleştirmişlerdir. Bu analizin sonuçları, fiber açısının ve kumaş elastisite modülünün deformasyon üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, bu faktörlerin havalı körüğün statik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır [39].

Lee ve arkadaşları, malzemesi fiber takviyeli kauçuk kompozit olan diyagram tipi havalı körüklerin deformasyon davranışı için analizler yapmışlardır. Takviyelendirilen havalı körüklerin şişme altında analizi için, temas durumları göz önüne alınarak güncellenmiş bir Lagrange sonlu eleman kodu geliştirilmiştir. Malzeme özellikleri, Halpin-Tsai eşitlikleri ve eleman boyutuna bağlı olan karışım kuralı ile hesaplanmıştır. Deforme olmuş şekil üzerinde fiber açılarının etkisini incelemek için maksimum fiber açısının değişimiyle birlikte beş analiz modeli seçilmiştir. Gerçek bir ürün ölçüsünden modellenen, 684N diyagram tipi havalı körük referans model olarak seçilmiştir. Analiz sonuçları, 45°'lik maksimum fiber açısı ile modelin dış çapının en çok arttığını ve deformasyon davranışının 45°'lik maksimum fiber açısı için hemen hemen simetrik olduğunu ortaya koymuştur [40].

Soo-Kim ve arkadaşı, havalı körükleri analiz etmek için yeni bir metot önermişlerdir. Geleneksel metotların aksine, araç süspansiyon sistemlerinde kullanılabilen bazı güvenilir tasarım parametreleri elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada, araçların kalitesinin yükselmesi için potansiyeli olan bir analiz modeli olarak, kol tipi havalı körüklere yoğunlaşmıştır. Çeşitli fiber açılarının takviyelendirmesine bağlı olarak maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirmeleri bulmak için MARC programı kullanılmıştır. Fiber açılarının değişimleri için, maksimum iç gerilmeler ve deformasyonlar elde edilmiştir [41].

Hölscher ve arkadaşları, bir pnömatik lastiği, sonlu eleman model kullanarak analiz etmiş ve simülasyonunu yapmışlardır. Yapılan çalışmada lastik ve yol arasındaki farklı sürtünme durumları için, yola temas eden pnömatik bir lastiğin temas alanındaki elastik deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu karşılaştırma, lastik-yol temas alanındaki sürtünme davranışının yanısıra, tüm deformasyonun da sonlu eleman modelleri ile gerçekçi bir şekilde simüle edilebileceğini göstermiştir [42].

Tran ve arkadaşı, farklı yükleme tiplerine maruz kalan kauçuk-fiber kompozit malzemeden yapılan ince cidarlı silindirik havalı körük kabuğu incelemiştir. Biyolojik yumuşak doku ve sürücü koltuğunun titreşim sönümleyicisinde kullanılan, doğrusal olmayan anizotropik hiper-elastik malzemenin (havalı körük kabuğu) cevabı için nümerik simülasyona uygulanabilen yapısal bir ortotropik hiper-elastik model göstermişlerdir. Yapısal modelin şekil değiştirme enerji fonksiyon parametreleri, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi ile deney sonuçlarına uyduğu gösterilmiştir [43].

Lee, havalı körüğün yüksekliğini kontrol etmek için tasarlanan pnömatik sistemlerin bir modeli ile bağlantılı olan, histerisis ve rijitliğin temel karakteristiklerini gösteren havalı bir körüğün genel analitik modelini geliştirmiştir. Bu amaçla matematik model, termodinamik parametrelerin değişmediği varsayımıyla termodinamik temel üzerine kurulmuştur. Modelin analizi, rijitliğin hacim değişimi, ısı transferi, hava kütlesi ve etkin alan tarafından etkilendiğini göstermiştir ancak histerisis çoğunlukla ısı transferi ve etkin alanın değişimi tarafından etkilenmiştir [44].

Pidaparti ve arkadaşları, tek katmanlı kauçuk kompozitlerin mekanik davranışını belirlemek için kauçuk eleman ve fiber-kauçuk eleman olmak üzere iki tip sonlu eleman kullanarak bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Sonlu eleman modeli büyük şekil değişikliklerini ve kauçuğun doğrusal olmayan davranışını, bimodüler malzeme davranışını ve fiberlerin yeniden yönelmesinden dolayı geometrik olarak doğrusal olmayan davranışı göz önüne almaktadır. Yüke bağlı yer değiştirme sonlu eleman çözümleri, malzeme modeli etkileri, fiber şekil değiştirmeleri ve deforme olan şekiller, tek katmanlı kompozitlerin genel davranışını göstermektedir [45].

Nam ve arkadaşı, ortotropik kompozit malzemenin büyük deformasyonları için doğrusal olmayan hiper-elastik temel eşitlikleri, sonlu şekil değiştirme analizine sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla katmışlardır. Malzeme parametreleri deneylerden belirlenmiştir. Kauçuk matris ve tekstil fiberleri ile takviyelendirilen kompozitten yapılan şişirilmiş havalı körük kabuğunun deformasyon sonuçları verilmiştir [46].

## 2.2 Fiber Takviyeli Kompozitlerle İlgili Çeşitli Çalışmalar

Pidaparti ve arkadaşı, bir mikromekanik yaklaşıma dayalı olan hem iki hem de üç boyutlu genelleştirilmiş düzlem şekil değiştirmeyi sonlu eleman analizleri ile, gerilme alanlarının yanısıra kompozit malzemelerin doğrusal ve doğrusal olmayan etkilerini de incelemek amacıyla gerçekleştirmişlerdir. Etkin kompozit özelliklerini tahmin etmek için farklı yüklere maruz olan kompozit bir fiber-kauçuk birim hücre modelini incelemişlerdir [47].

Rao ve arkadaşları, lastik kemerlerinde kullanılan çelik fiber-kauçuk kompozitlerinin yorulma ve kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Farklı fiber yönleriyle birlikte tek kemerli katmanlar için; arıza mekanizmalarını, hasar gelişimini ve yorulma ömrünü belirlemişlerdir. Testleri, fiberlerin  $22^\circ$ ,  $72^\circ$  ve  $90^\circ$  değerleri için 10 Hz'lik bir frekansta, %8.3'lük silindirik bir şekil değiştirme genliği ile gerçekleştirmişlerdir [48].

Zhang ve arkadaşları, tek katmanlı naylon fiber-kauçuk kompozitin gerilme-gerinim davranışlarını, dikey gerilme yüklerinin mekanik davranışlarını ve iki eksenli çekme yükü oranları üzerindeki etkilerini ayrı ayrı, bir haç örneği kullanarak iki eksenli gerilme koşulları altında incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, uzunlamasına sabit çekme yüklerine sahip olan naylon fiber-kauçuk kompozitin çapraz mekanik özelliklerinin, tek eksenli enine gerilme mekanik özelliklerinden farklı olduğunu göstermiştir [49].

Rao ve arkadaşları, tekli kemerlerden oluşan çelik fiber takviyeli kauçuğun mekanik davranışlarını farklı fiber açılarında deneysel olarak belirlemişlerdir ve analitik model vasıtasıyla da tahmin etmişlerdir. Çeşitli fiber açılarıyla tekli kemerler üç

farklı deformasyon aşamasını (rijitliğin azalmasıyla içerde oluşan bir doğrusal olmayan deformasyon, doğrusal bir gerilme-gerinim davranışıyla ara aşama ve artan rijitlikle hemen hemen doğrusal bir deformasyon aşaması) gösterdiğini belirtmişlerdir [50].

Hassis ve arkadaşları, fiber-kauçuk kompozit malzemelerdeki bağlanma etkilerini incelemek için analitik bir model geliştirmişlerdir. Bu analitik modelde, fiber ve kauçuk matris malzemesi arasındaki rijitliğin uyumsuzluğunu ve dönme-uzama bağlantısını göz önüne almışlardır. Deformasyonu ve gerilme sonuçlarını, bazı tipik fiber-kauçuk kompozit plakalar için elde etmişlerdir ve sonuçları mevcut çözümlerle karşılaştırmışlardır [51].

Brun ve arkadaşları, büyük deformasyonlara maruz kalan, sıralanan silindirik fiberlerle takviyelendirilen elastomerlerin tüm mekanik davranışları için ikinci dereceden homojenleştirme metodunu temel alan bir homojenizasyon tabanlı yapısal bir model üretmişlerdir. Fiber takviyeli sıkıştırılabilir Gent elastomerleri ile düzlem dışı, düzlem içi ve düzlem içi-düzlem dışı bağlantılı yükleme şartlarına maruz olan fiberlerin kare ve altıgen dağılımı için tam sonuçları hesaplanmış ve sonuçları tartışılmıştır [52].

Agoras ve arkadaşları, fiber takviyeli elastomerlerin sonlu şekil değiştirmelerdeki etkin karşılığı için, yeni bir yapısal model oluşturmuşlardır. Modeli, uygun şekilde tasarlanmış, değişken temellerden yararlanan doğrusal bir kompozitle karşılaştırma fikrini kullanarak ikinci dereceden homojenleştirme teorisi vasıtasıyla üretmişlerdir. Bu model, Neo-Hookean'dan daha genel olan tüm durumlar için davranışların göz önüne alınabilmesine imkan vermektedir [53].

Moraleda ve arkadaşları, sıkıştırılmayan fiber takviyeli elastomerlerin düzlemdeki sonlu deformasyonunu hesaplamalı mikromekanik aracılığı ile incelemiştir. Kompozit mikroyapısı, dizilen rijit fiberlerin, hiper-elastik bir matris içerisinde rastgele ve homojen bir şekilde dağıtılmasıyla oluşturmuşlardır. Farklı matrisler (Neo-Hookean ve Gent), fiberler (tekil veya çoğul dağılımlı, dairesel veya eliptik kesitli) ve takviyelendirme hacim miktarı %10-40 arasında olan mikroyapının örnek bir hacim elemanı, sonlu eleman simülasyonu vasıtasıyla analiz etmişlerdir [14].

Ku ve arkadaşları, doğal fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Matris-fiber arayüzey bağıını geliştirmek için, kompozitlerin çekme özelliklerinin yükselmesi ile sonuçlanan için bir takım değişiklikler uygulamışlardır. Ayrıca Halpin-Tsai eşitliğinin, farklı tipte doğal fiberler içeren kompozitlerin Young Modülü'nü tahmin etmede en etkin eşitlik olduğunu belirlemişlerdir [54].





### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

##### 3.1.1 Vulkanize edilmiş numuneler

Analizlere başlanmadan önce, MEKLAS ARGE Merkezi'nden alınan fiber takviyeli kauçuklardan; çekme kuvvetine maruz bırakıldığında, fiberlerin doğrultusu boyunca yük taşıyacağı ve yük taşımayacağı şekilde farklı numuneler hazırlanmıştır. Fiberler doğrultusunda yük taşımayacak şekilde numune hazırlanmasının amacı, takviyelendirme etkisini sıfırlayarak, vulkanize edilmiş kauçuğun gerilme-gerinim değerlerini elde etmek ve bu değerleri ANSYS Workbench programında hiper-elastik malzeme tanımlamasında kullanmaktır. İkinci olarak, fiberlerin yük taşıyacağı şekilde numuneler hazırlanmasının amacı ise, çekme testi sonucunda ortaya çıkan kuvvet-deformasyon eğrisinin, ANSYS Workbench programından elde edilecek kuvvet-deformasyon eğrisi ile karşılaştırmaktır. Standart çekme numuneleri, Bursa Teknik Üniversitesi Kauçuk Plastik Test ve Analiz Laboratuvarı'nda bulunan Instron 6054.000 numune hazırlama makinesi kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 3.1). Hazırlanan numuneler DIN 53504-S2 standardına göre kalıpta kesilmiştir (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1** Numune hazırlama makinesi (Instron 6054.000) ve hazırlanan numuneler

## 3.2 Yöntem

### 3.2.1 Tek eksenli çekme testi

Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan, Şekil 3.2'de görülen Shimadzu AG-X Plus (250 kN) çekme makinesi ile hazırlanan numunelerin tek eksenli çekme testleri yapılmıştır. ASTM standardı bulunmadığından dolayı, fiber takviyeli kauçuklar için çekme testi, farklı çekme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Bu hızlar; 8.33 mm/s, 5 mm/s, 1 mm/s, 0.5 mm/s, 0.1 mm/s, 0.01 mm/s ve 0.001 mm/s olarak seçilmiştir. Yapılan testler neticesinde en uygun hız 0.5 mm/s olarak belirlenmiş olup bu hızla çekilen numune Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Çekme testlerinin ardından sonlu eleman analizleri ile doğrulama aşamasına geçilmiştir.



Şekil 3.2 Çekme testi makinesi (Shimadzu AG-X Plus 250 kN)



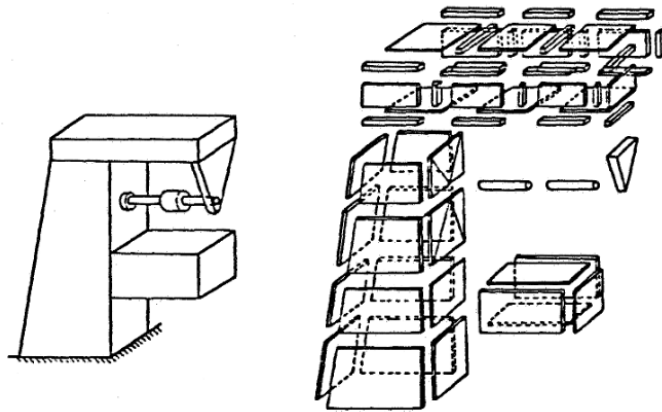
Şekil 3.3 0.5 mm/s hızda test edilen numunelerden birisi

### 3.2.2 Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi; karmaşık olan problemlerin çözümünü gerçekleştirebilmek için mevcut problemi, daha basit alt problemlere ayırarak, her bir problemin kendi içerisinde çözülmesiyle ana problemin çözümüne ulaşılan sayısal bir yöntemdir. İlk olarak 1956 yılında uçak gövdeleri üzerinde meydana gelen gerilmeleri analiz etmek için geliştirilmiş olan bu yöntemin, daha sonraki on yıl içerisinde, uygulamalı alanlar ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarı ile kullanılabileceği anlaşılmıştır. Sonraki yıllarda ise, sonlu elemanlar yöntemi ve çözüm teknikleri, hızla ilerlemeler kaydederek gelişmiş ve günümüzde pek çok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi yöntemlerden birisi olmuştur. Metodun farklı mühendislik alanları için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi, genel bir bilgisayar programının sadece giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir [55-56].

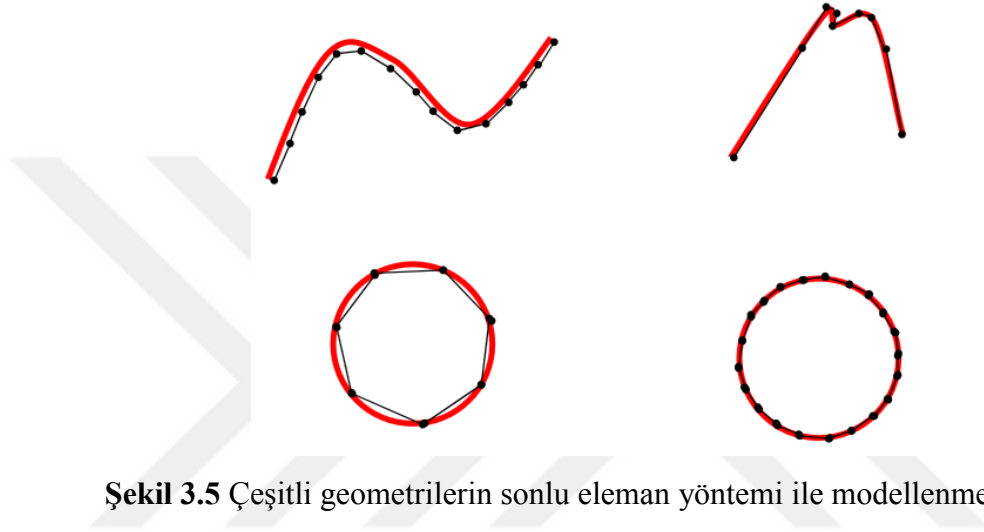
Sonlu elemanlar yöntemindeki temel mantık, karmaşık bir problemi çözebilmek için karşılaşılan problemi basitleştirerek çözüme ulaşmaktır. Karşılaşılan ana problem yerine, basite indirgenmiş bir problem sayesinde yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir [56].

Sonlu elemanlar yönteminde, çözüm bölgesi çok sayıda basit, küçük, birbirine bağlı olan ve “sonlu eleman” olarak adlandırılan alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu yöntemin, freze tezgahı gibi karmaşık bir geometriye sahip şekli modellemek için nasıl kullanılabileceği Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



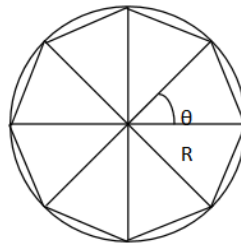
**Şekil 3.4** Freze tezgahının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi [56]

Örneğin, bir eğrinin boyu hesaplanmak istenirse veya bir dairenin çevre formülü kullanmadan çevresi hesaplanmak istenirse, eğri üzerinde, boyunun hesaplanabildiği doğrular çizilip bunlar toplanabilir. Bu yöntemle belli bir doğruluk derecesinde eğrinin boyu hesaplanmış olur. Kullanılan doğruların boyu ne kadar küçük olursa o kadar gerçeğe yakın sonuçlar elde edilir. Ayrıca dar köşelerde doğru boylarının küçültülmesi, daha hassas bir sonuç elde etmek için önemlidir. Şekil 3.5’de çeşitli geometrilerin sonlu eleman yöntemi ile modellenmesi gösterilmiştir [57].



**Şekil 3.5** Çeşitli geometrilerin sonlu eleman yöntemi ile modellenmesi [57]

Sayısal bir örnek için, Şekil 3.6’da verilen daire alanının hesabı ele alınabilir. Hesap, dairenin önce 8 dilime bölünmesi, daha sonra 36 dilime bölünmesi ile yapılabilir. Elde edilen nümerik hesapların analitik hesapla karşılaştırılması, yöntemin doğruluğunu gösterecektir.



**Şekil 3.6** Sekiz eş parçaya bölünen daire

Üçgenin alanı:  $S_i = 1/2 * R^2 * \sin\theta$ ’dır.

(Açı radyan cinsinden olmalıdır)

Dairenin alanı:  $S_N = \sum_{i=1}^N S_i = [1/2 * R^2 * \sin(2\pi/N)] N$

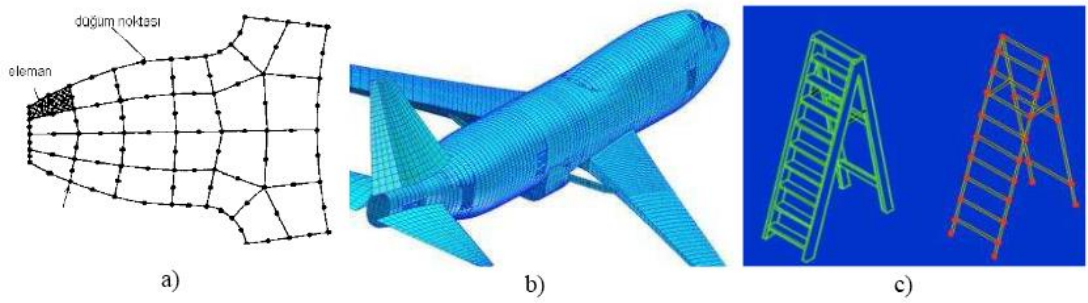
$N$ : Toplam eleman sayısı (üçgenlerin sayısı)

Daireyi şekildeki gibi 8 dilime bölmüş olursak ve yarıçapı 12 cm olursa çevresi nümerik olarak (sayısal hesaplama ile) ve analitik olarak (formülasyon kullanarak) şu şekilde olacaktır:

**Çizelge 3.1** Nümerik yöntem ile analitik yöntemin karşılaştırılması (Problem çözümü)

Nümerik Yöntem (Sayısal tekrarlı hesaplama yöntemi)	Analitik Yöntem (Formülasyon)
$N = 8$ için $S_N = [1/2 R^2 \sin(2\pi/N)] 1/2 12^2 \sin(2\pi/8) = 407.13 \text{ cm}^2$	$S = \pi R^2$ $= 3.14 * 12^2$ $= 452.16 \text{ cm}^2$
$N = 36$ için $S_N = 1/2 R^2 \sin(2\pi/N) 1/2 12^2 \sin(2\pi/36) = 449.87 \text{ cm}^2$	

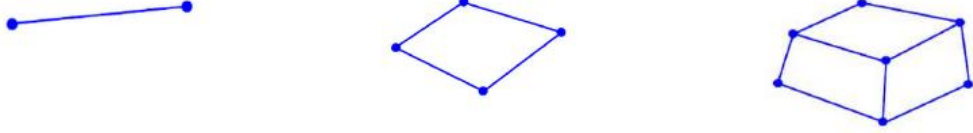
Buradaki mantık ve yöntemler, sonlu elemanlar yöntemi için de geçerlidir. Dairenin gerçek çizimi geometrik modeli temsil eder. Her bir doğru, elemanı temsil eder. Elemanların köşelerindeki noktalar da düğümleri (nodlar-nodes) temsil eder. Sonlu elemanlar yöntemi ile parça modellenirken, model ufak parçalardan oluşan temel elemanlara ayrılır, buna mesh işlemi denir. Her elemanın köşelerinde düğüm vardır. Hesaplamalar, bu düğüm noktaları üzerinde gerçekleşir. Bu yüzden fiziksel ortam önce elemanlara bölünür ve elemanların köşe noktaları ise fiziksel ortamı temsil eden noktalar uzayı olmuş olur. Elde edilen sonuçlar bu noktaların üzerindeki değerler olur [57]. Çeşitli geometrilere ait ağ yapıları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.7** Çeşitli mesh tipi örnekleri; a) Bir dişlinin iki boyutlu olarak mesh yapılmış hali, b) Bir uçağın üç boyutlu olarak mesh yapılmış hali, c) Bir merdivenin bir boyutlu çizgi elemanlar ile modellenmiş hali [57]

### Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak model oluşturmak

Sonlu eleman modeli tek boyutlu (çizgi şeklinde), iki boyutlu (düzlem şeklinde) ve üç boyutlu (katı model) olabilir. Modellemenin şekline göre eleman tipi atanır. Şekil 3.8'de eleman tipleri gösterilmiştir [57].



Şekil 3.8 Eleman tipleri [57]

Hesaplamalar, düğümler üzerinde gerçekleştirilirken, elde edilen sonuçlar ise bu düğümler üzerindeki değerler olmaktadır. Problemin büyüklüğüne ve çözüm hassasiyetine (mesh yapısı) göre binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle iyi bir hesaplama için öncelikle iyi bir eleman yapısı ve ona bağlı olarak düğüm yapısı önemlidir. En genel haliyle sonlu elemalar yönteminde, sistem temel olarak aşağıdaki matris formuna dönüştürülür [57].

$$[K] \cdot [D] = [R]$$

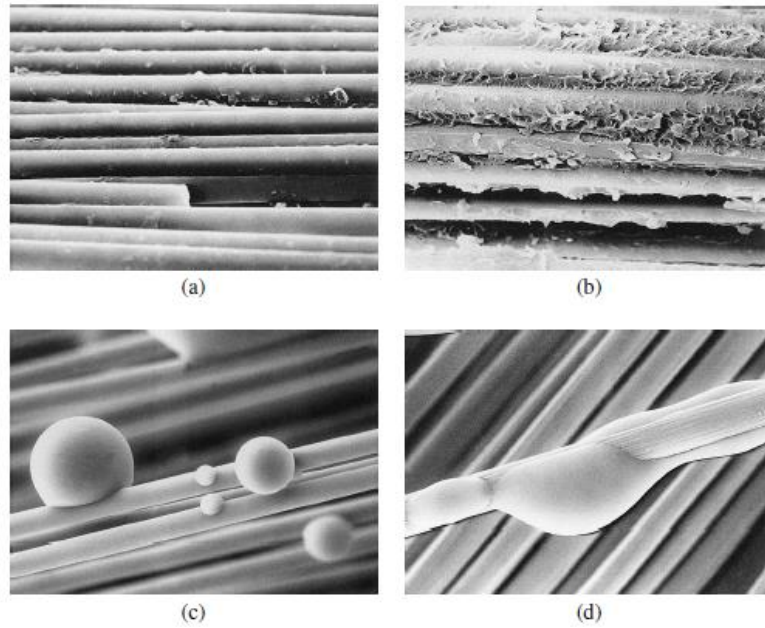
Burada [D], büyüklük alanının düğümlerdeki bilinmeyen değerleri temsil eden vektör (vektör matrisleri sütun şeklindedir), [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir. Daha basite indirgersek, R sınır şartlarını (dışarıdan etkiyen yükler vs.), K sistemin yapısını temsil eder (katı, akışkan, gaz vs. özellikleri), D ise aranan düğümler üzerindeki değerlerdir (gerilme, kuvvet, yer değiştirme vs.). Buradan anlaşılacağı üzere D matrisinin bulunabilmesi için sistemi temsil eden büyüklüklerin verilmesi gerekir (K matrisi), ayrıca dışarıdan etkiyen sınır şartlarının da bilinmesi gerekir (R matrisi) [57].



### 3.2.3 Fiber ve kauçuk arasındaki yapışma durumu

Fiberler iyi bir şekilde ıslatılmadığı durumda kuru kalacakları için, transfer edilen yükleri taşıyamazlar. Dolayısıyla, fiberler iyi bir şekilde ıslatılmadıkça matris görevini yerine getiremez. Matrisin görevlerinden bir diğeri, kompozitin tüm parçalarını bir arada tutan, sürekli bir faz oluşturmaktır [12].

Reçinenin viskozitesi, ıslanmada en önemli faktördür. Eğer viskozite çok yüksek olursa, bu durum reçinenin çok kalın olduğu anlamına gelir ve dolayısıyla fiber yığınlarının içine nüfuz edemez. Bu yüzden reçinenin viskozitesi kompozit hazırlama işleminde önemli bir parametredir [12]. Şekil 3.9, mikroskopik düzeyde çeşitli fiber-matris etkileşimlerini göstermektedir.



**Şekil 3.9** Yüzeysel yapışma durumları; a) Kötü yapışma durumu, b) İyi yapışma durumu, c) Kötü fiber-matris etkileşimi, d) İyi fiber-matris etkileşimi [58]

Çoğu polimer, doğada hidrofobik halde bulunmaktadır. Dolayısıyla fiber ve polimer arasındaki iyi yapışma, matrisin istenen özellikleri kazanmasında en önemli konudur. Buna ek olarak, kompozitlerdeki arayüzey, gerilmeyi, fiber vasıtasıyla matrise aktarmada kilit rol oynamaktadır. Fiberler ile matrislerin arasındaki arayüzey yapışmasını iyileştirmenin birkaç yolu bulunmaktadır. Örnek olarak, fiber yüzeylerine, matrislerle bağlantı ajanları olarak davranan farklı işlevli monomerlerle muamele yapılabilir. Ayrıca, fiber yüzeylerine uygulanan gama ışınımı veya plazma

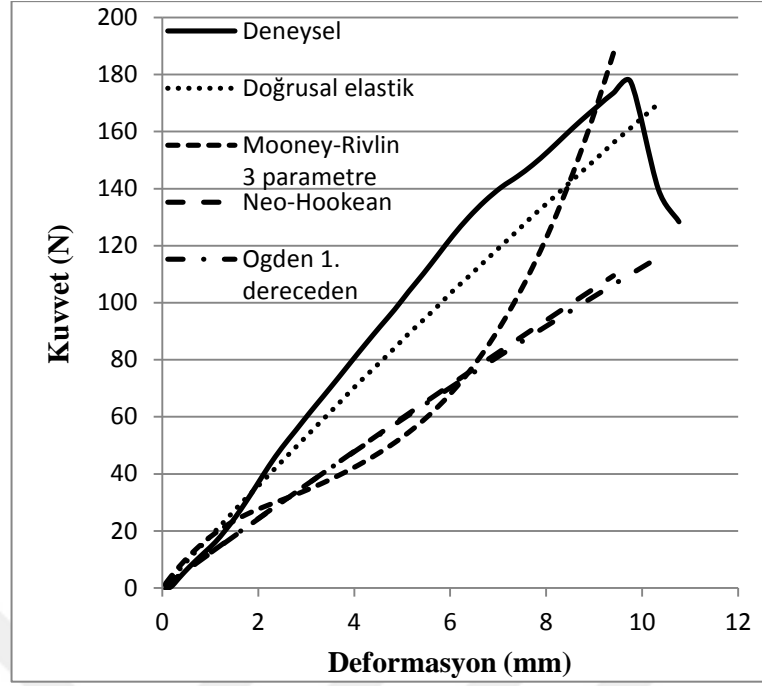
radyasyonu gibi radyasyon işlemleri, fiberlerin yüzeylerinin yanısıra polimerin yüzeyini de işlevsel hale getirmek için yararlı olabilir. Fiberlerin yüzey muamelesine ek olarak, uyumlulaştırıcı veya bağlantı ajanları da arayüzey boyunca gerilme aktarımını arttırabilir [3].

Bu çalışma kapsamında, fiber takviyeli kauçuk modellerinde kauçuk ile fiberler arasında “bonded contact” kullanılmıştır.

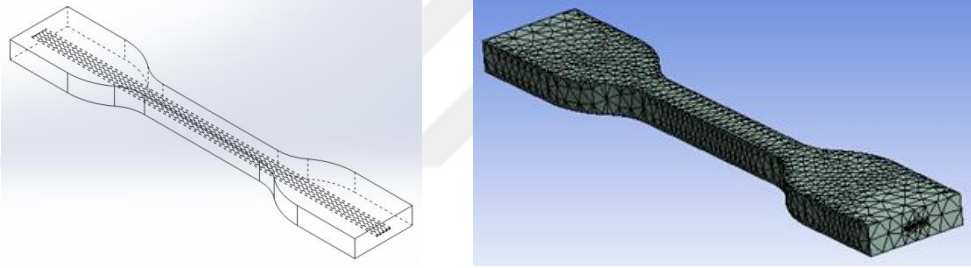
### **3.2.4 Sonlu eleman analizleri ile deneysel çalışmanın karşılaştırılması**

Bu tez kapsamında, çalışmalara başlamadan önce gerekli doğrulamayı yapabilmek amacıyla, çekme testlerini gerçekleştirmek üzere çeşitli numuneler hazırlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir (bkz. 3.2.1. ve 3.2.2. Bölüm). Yapılan çekme testlerinin ardından, gerekli doğrulama için sonlu eleman analizleri kullanılmıştır. Sonlu eleman analiz programı olarak, tüm dünyada yaygın şekilde kullanılan ANSYS Workbench tercih edilmiştir. Sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmek için numune, SolidWorks programında çizilmiş ve ANSYS ortamına aktarılmıştır. Matris malzemesi olarak, fiberlerin yük taşımayacağı şekilde hazırlanan numunelerin gerçekleştirilen çekme testlerinden sonra, gerilme-gerinim değerleri elde edilmiş ve bu değerler vulkanize edilmiş kauçuk değerleri olarak kullanılmıştır. Daha sonra, numunenin yük taşıyacağı biçimde gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri, testler ile karşılaştırılmış ve ayrıca farklı malzeme modelleri ile ilgili yapılan çalışmalar da Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Şekil 3.10’dan görüldüğü üzere, deneysel sonuçlara en yakın değerler, fiberler doğrusal elastik kabul edildiği zaman elde edilmiştir. Doğrulama işleminin gerçekleştirildiği fiber takviyeli kauçukların modeli ve ağ yapısı şekil 3.11’de gösterilmiştir. Vulkanize kauçuk, hiper-elastik malzeme modelleri ile, takviyelendirici fiber malzemeler ise doğrusal elastik malzeme olarak tanımlanmıştır.





Şekil 3.10 Fiber malzemesinin, FEM ve deneysel sonuçların karşılaştırılması



Şekil 3.11 Fiber takviyeli numune modeli ve ağ yapısı

### 3.2.5 Sonlu eleman analizleri için malzeme modellerinin belirlenmesi

ANSYS programı kullanılarak yapılan analizlerde, vulkanize kauçuğu tanımlamak için hiper-elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Program içerisindeki hiper-elastik malzeme modellerinden bazıları; Mooney-Rivlin-3 parametre, Neo-Hookean, Ogden 1. dereceden, Gent vb.'dir. Numune modelinin analizi yapılırken, hem malzeme modelinin belirlenmesi aşamasında (gerilme-gerinim diyagramına en uygun eğriyi oluşturması, çözüm kararlılığı vb.), hem de çözüm aşamasında yakınsama yapma olayında (converge), Mooney-Rivlin-2 parametre modeli, kullanılacak malzeme modeli olarak belirlenmiştir. Takviyelendirici fiber malzemeler ise, doğrusal elastik olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar yapılırken literatürden yararlanılmış olup gerekli değerler de yine literatürden elde edilmiştir. Takviyelendiricileri doğrusal

elastik olarak tanımlamak için gerekli olan özellikler Elastisite Modülü (E) ve Poisson Oranı ( $\nu$ )'dır. Takviyelendirici malzemelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

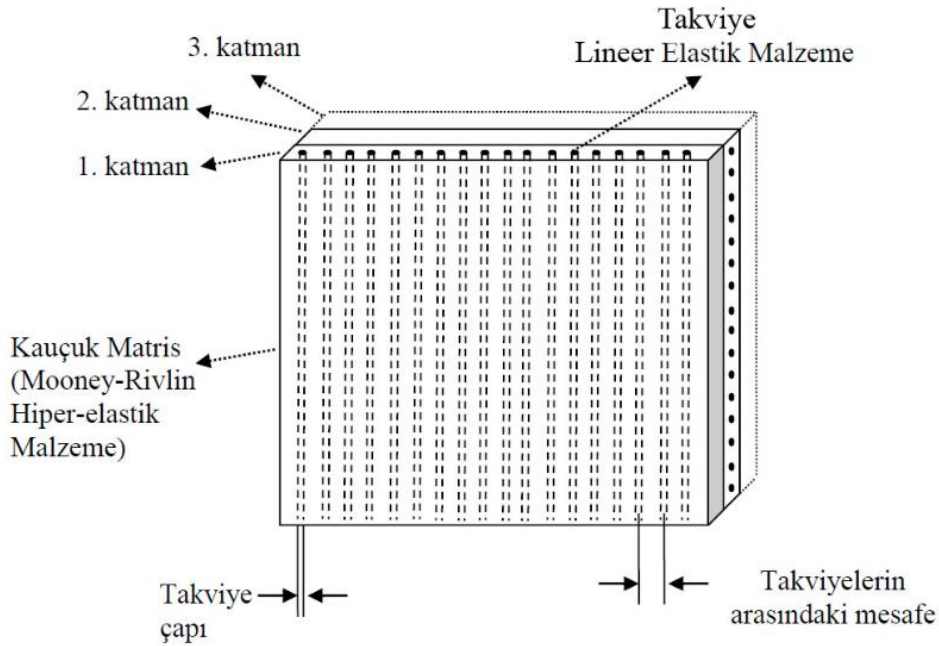
$$\text{Kendir: } E = 2.5 * 10e10 \text{ Pa} , \nu = 0.221 \quad [59-60]$$

$$\text{Naylon 6.6: } E = 1.46 * 10e9 \text{ Pa} , \nu = 0.41 \quad [61-62]$$

$$\text{Naylon 6: } E = 2.95 * 10e9 \text{ Pa} , \nu = 0.39 \quad [62-63]$$

### 3.2.6 Modellerin hazırlanması

Elde edilen deneysel veriler, analiz sonuçları ile doğrulandıktan sonra, SolidWorks programı ile analizi gerçekleştirilecek olan modeller hazırlanmaya başlanmıştır. Oluşturulan modeller, Şekil 3.12'deki çizime benzer mantıkla gerçekleştirilmiş olup iki adet fiber tabakası kullanılmıştır. Ayrıca bu aşamada Çizelge 3.2'deki gibi bir tablo oluşturularak, modeller bu doğrultuda çizilmiştir.

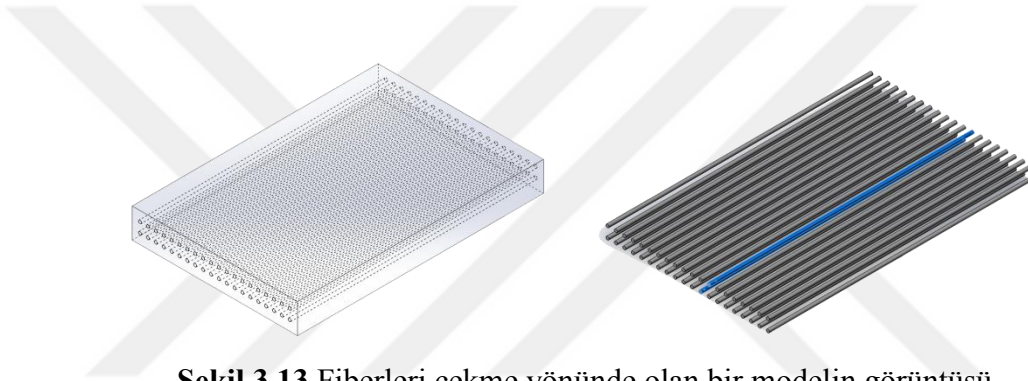


**Şekil 3.12** Farklı katmanlara sahip takviyeli kauçuk kompozit için tasarlanan katı model

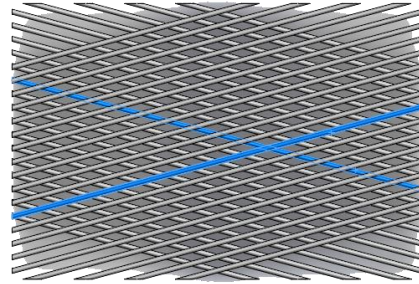
**Çizelge 3.2** Kullanılan fiberlerin parametre değerleri ve fiber malzemeleri

Fiber çapı (mm)	Fiber açısı (°)	Fiber aralığı (mm)	Fiber malzemesi
0.9	0	0.4	Naylon 6.6
1.2	30	2.4	Naylon 6
1.5	45	4.4	Kendir
1.8		6.4	
2.1		8.4	

Şekil 3.13'te çizilmiş bir modelin şeffaf görüntüsü ve yanında da fiberler gösterilmiştir (fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olduğu durum). Şekil 3.14'te ise açılı bir model gösterilmiştir.



**Şekil 3.13** Fiberleri çekme yönünde olan bir modelin görüntüsü

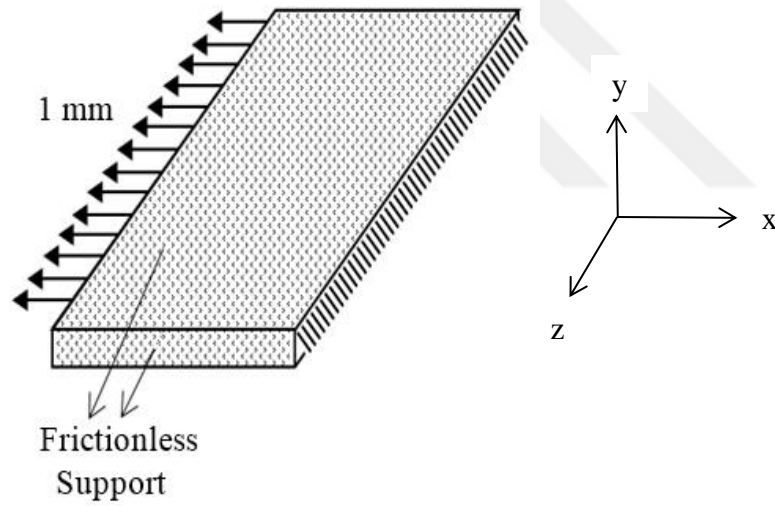


**Şekil 3.14** Çizilen açılı bir modelin görüntüsü

Bir sonraki bölümde, SolidWorks programında çizilen fiber takviyeli kauçukların, fiberler arası  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$ 'lik açılarla yerleştirilip ANSYS Workbench ortamında analiz edilerek, aksenal çekme yükünde ve düzlem dışı yükünde fiberler üzerinde meydana gelen normal ve kayma gerilmelerindeki değişimler yorumlanmıştır. Modeller oluşturulurken 0.9 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 1.8 mm ve 2.1 mm olmak üzere beş farklı fiber çapı kullanılmıştır. Fiber mesafesi olarak ise 0.4 mm, 2.4 mm, 4.4

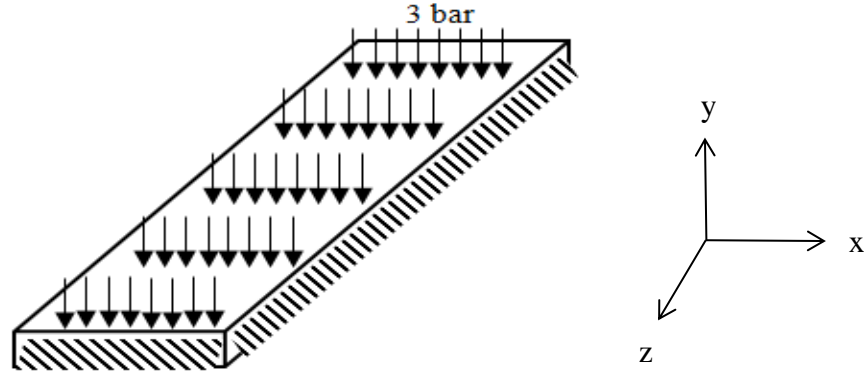
mm, 6.4 mm ve 8.4 mm'lik fiber aralıkları ve üç farklı takviyelendirici kullanılmıştır. Fiber tabakaları, alt ve üst katmanda 20'şer fiber olmak üzere toplam 40 fiber ve iki katman olacak şekilde oluşturulmuştur.

Yapılan analizler, çekme yükü ve düzlem dışı yükünde olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Çekme yükünün uygulandığı model ve sınır şartları Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Burada sınır şartları; kauçuğun sağ uzun kenarı ve fiberlerin kauçuğun bu kenarındaki kesit noktaları olmak üzere toplam 41 yüzeyden sadece x yönünde tutulmuş, diğer yönlere ise hareketi serbest bırakılmıştır. Kauçuğun, diğer uzun kenarından ise,  $-x$  yönünde 1 mm'lik deplasman verilerek, yine aynı şekilde diğer yönlerdeki hareketi serbest bırakılmış ve ortaya çıkan gerilmeler incelenmiştir. Ayrıca, kauçuğu analiz sırasında çarpılmalardan engellemek adına, üstten ve yan kısa yüzeylerin birinden "frictionless support" uygulanmıştır.

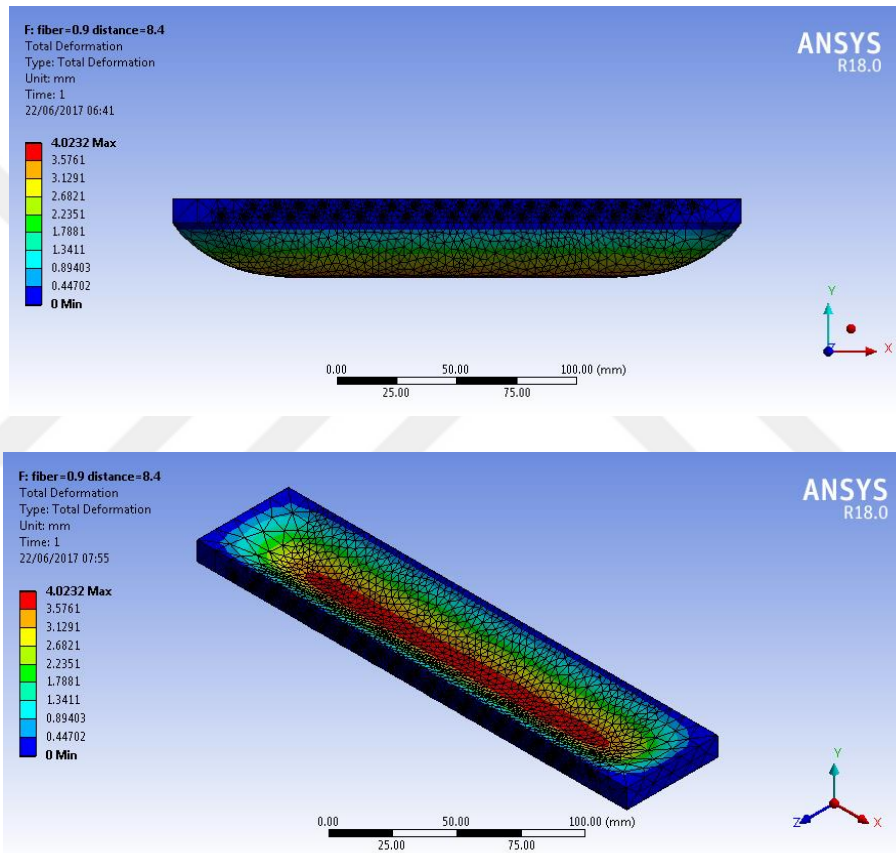


Şekil 3.15 Eksenel çekme yüküne maruz bırakılan model ve sınır şartları

Düzlem dışı yükü analizinde ise, kauçuğun uzun kenarları üzerinde bulunan fiber kesitleri de dahil, kauçuk dört kenarından, toplam 84 yüzeyden olmak üzere x, y ve z yönlerinde tutulmuş olup, kauçuk kompozite Şekil 3.16'da görüldüğü gibi yukarıdan aşağıya doğru tüm yüzeye 3 bar'lık basınç uygulanmıştır. Analiz sonucunda, oluşan toplam deformasyonların örnek gösterimi ise Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.16 Düzlem dışı yüklemeye maruz bırakılan model ve sınır şartları



Şekil 3.17 Düzlem dışı basınç uygulanmasının ardından modelde meydana gelen toplam deformasyon

Yukarıda bahsedilen sınır şartlarının haricinde, takviyelendirici malzeme olarak kendir, naylon 6.6 ve naylon 6 kullanılmıştır. Elde edilen sonuçları yorumlama aşamasında, fiberler üzerindeki gerilmeler incelenirken; normal gerilme-fiber çapı, normal gerilme-fiber mesafesi, kayma gerilmesi-fiber çapı, kayma gerilmesi-fiber mesafesi, farklı açılara karşılık normal gerilme, farklı takviyelendiricilere karşılık normal gerilme diyagramları verilerek yorumlanmıştır.

Kauçuk incelenirken ise; eşdeğer gerilme-fiber çapı, eşdeğer gerilme-fiber mesafesi, deformasyon-fiber çapı ve deformasyon-fiber mesafesi diyagramları verilerek yorumlanmıştır.

Aşağıda verilen grafiklerde, verilen durum için (fiberler arası açı, takviyelendirici türü vb.), fiber çapı ve fiber mesafesi değişimlerinin, karşılaştırılması üzerinde durulmuştur.



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

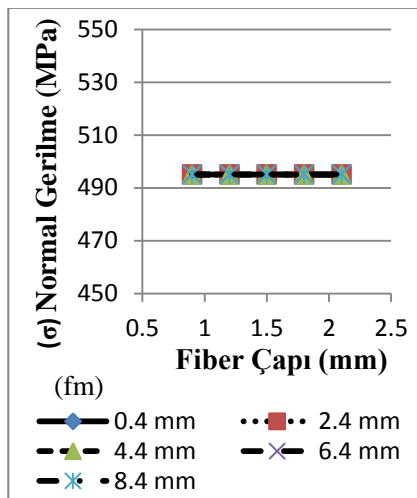
Yapılan analizler sonucunda, aşağıda verilen diyagramlardan elde edilen sonuçlar incelenerek yorumlanmıştır. Aşağıda farklı durumlar için çeşitli grafikler verilmiştir. İlk 2 grafikteki “fm” ifadesi fiber mesafesini, “fç” ise fiber çapını göstermekte olup diğer grafiklerde de aynı çap ve mesafe değerleri kullanılmıştır (Fiber çapları: 0.9 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 1.8 mm, 2.1 mm’dir. Fiber mesafeleri ise: 0.4 mm, 2.4 mm, 4.4 mm, 6.4 mm, 8.4 mm’dir). Aşağıdaki diyagramlarda, grafik çizgileri “fm” yi veya “fç” yi göstermektedir.

### 4.1 Çekme Yükünde

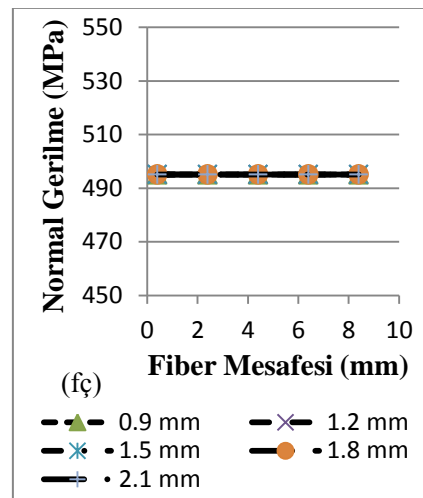
#### 4.1.1 Fiber çaplarının ve mesafelerinin değişim etkisinin incelenmesi

##### Takviyelendirici olarak kendirin kullanıldığı testler

Bu modellerde, takviyelendirici olarak kendir ipi kullanılmıştır. Kendirin malzeme özellikleri literatürden (59 ve 60. kaynak) elde edilmiştir. Şekil 4.1’de fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık fiberler üzerindeki normal gerilme değerinin yaklaşık 500 MPa seviyelerinde olduğu ve değişmediği görülmektedir. Şekil 4.2’de ise fiber mesafesinin artmasıyla fiberler üzerindeki normal gerilmenin değişmediği belirlenmiştir.



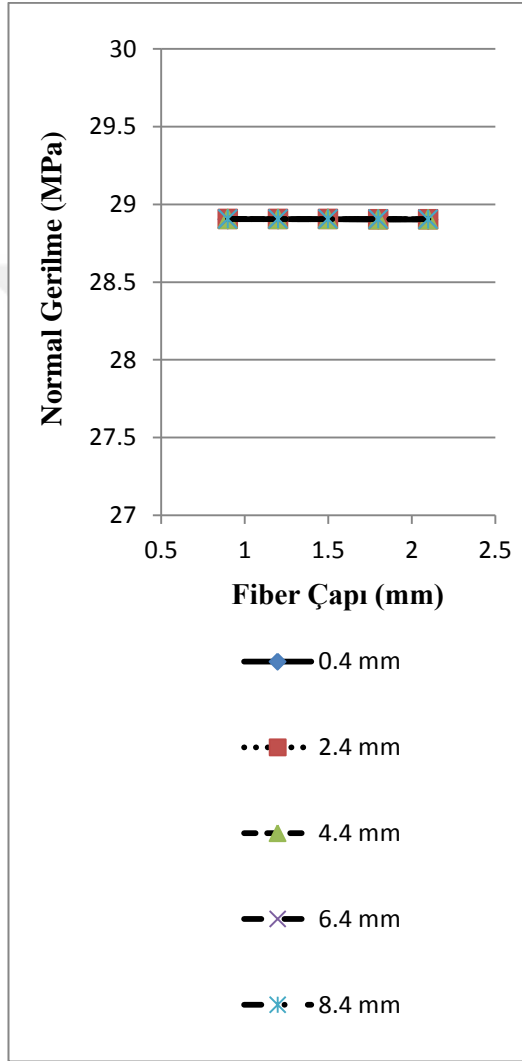
Şekil 4.1 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - eksenel çekme)



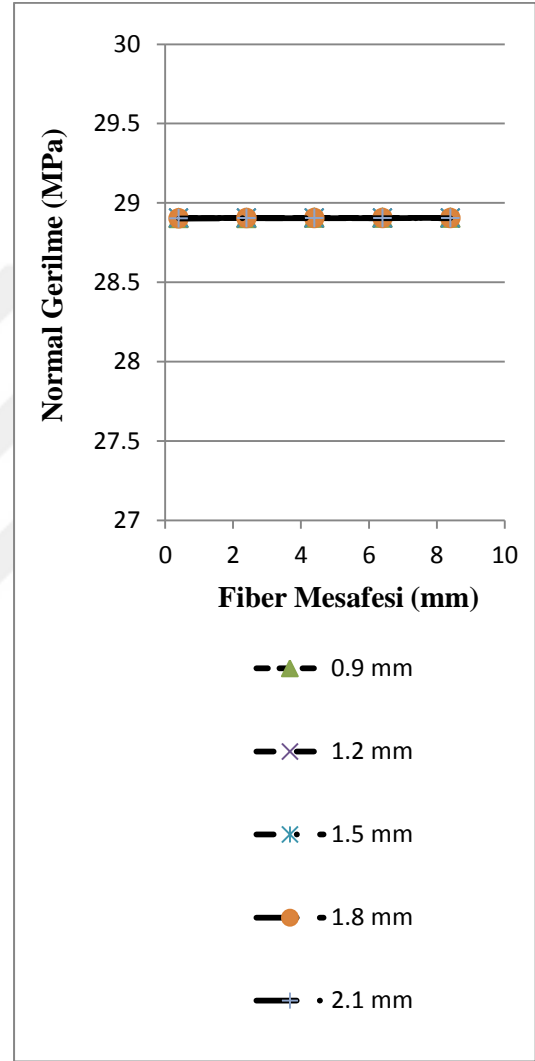
Şekil 4.2 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - eksenel çekme)

### Takviyelendirici olarak naylon 6.6'nın kullanıldığı testler

Bu modellerde takviye elemanı olarak naylon 6.6 kullanılmış olup malzeme özellikleri literatürden (61 ve 62. kaynak) sağlanmıştır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te fiber çapı ve fiber mesafesinin artmasına karşın, fiberler üzerindeki normal gerilmelerin değişmediği ve yaklaşık 29 MPa olduğu belirlenmiştir.



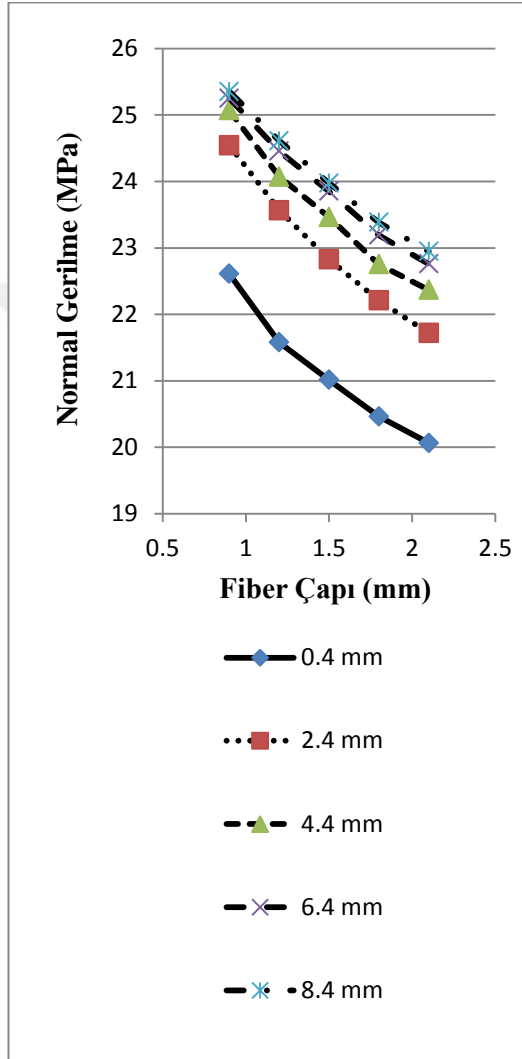
Şekil 4.3 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- aksenal çekme)



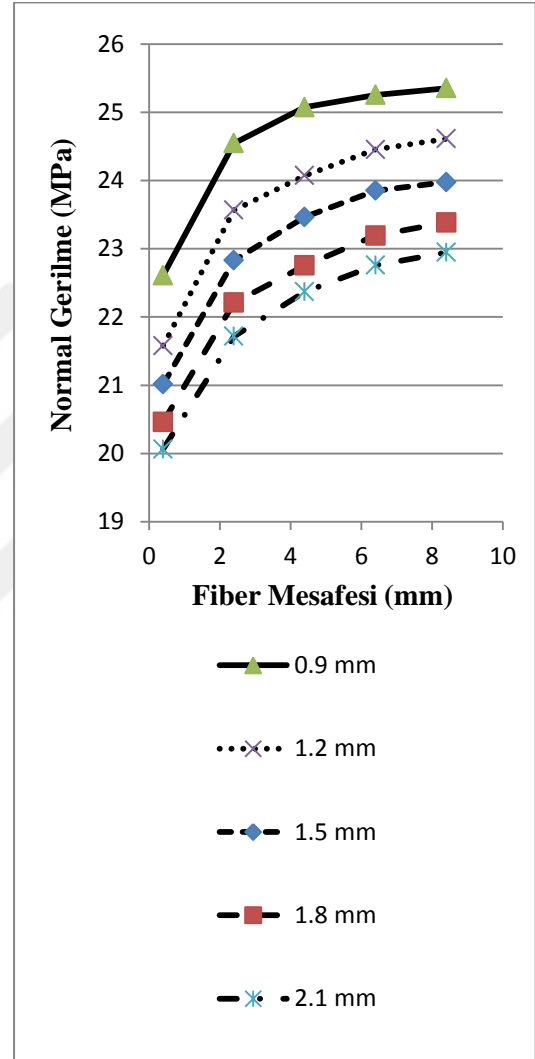
Şekil 4.4 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- aksenal çekme)



Şekil 4.5'deki modelde takviyelendirici olarak naylon 6.6 kullanılmış olup önceki modelden farklı olarak fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumundaki sonuçlar incelenmiştir. Şekil 4.5'de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.6'da ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

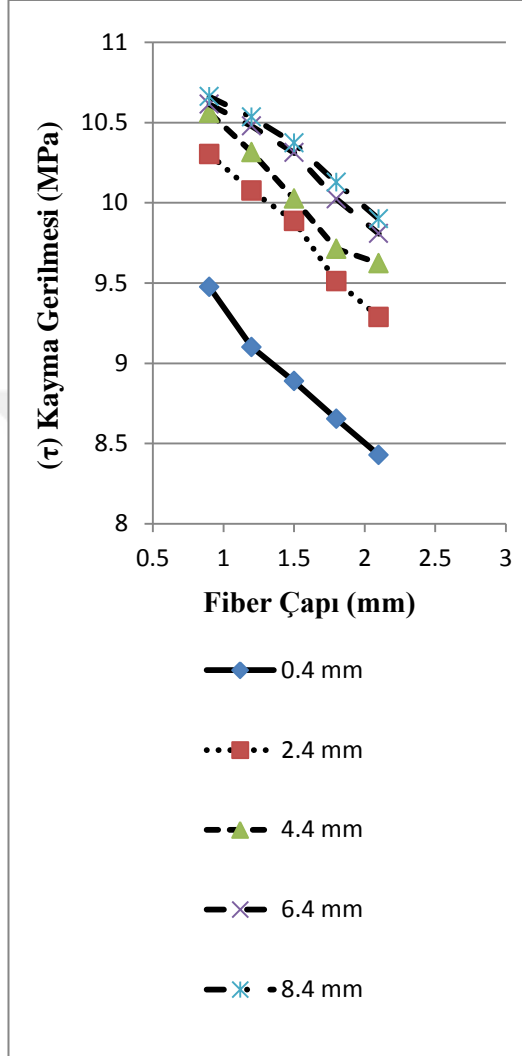


Şekil 4.5 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $30^\circ$ - aksenal çekme)

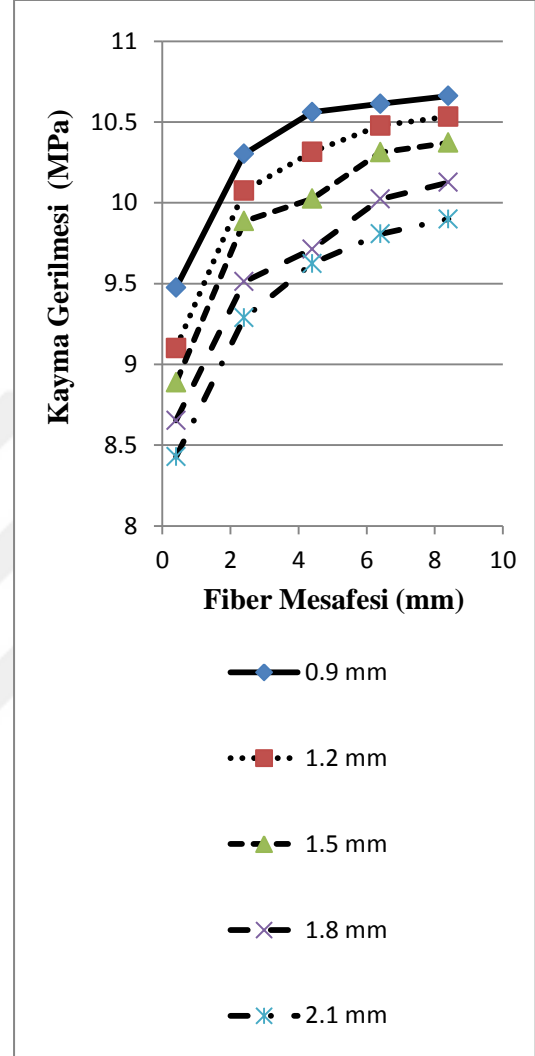


Şekil 4.6 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $30^\circ$ - aksenal çekme)

Şekil 4.7'deki modelde fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.8'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

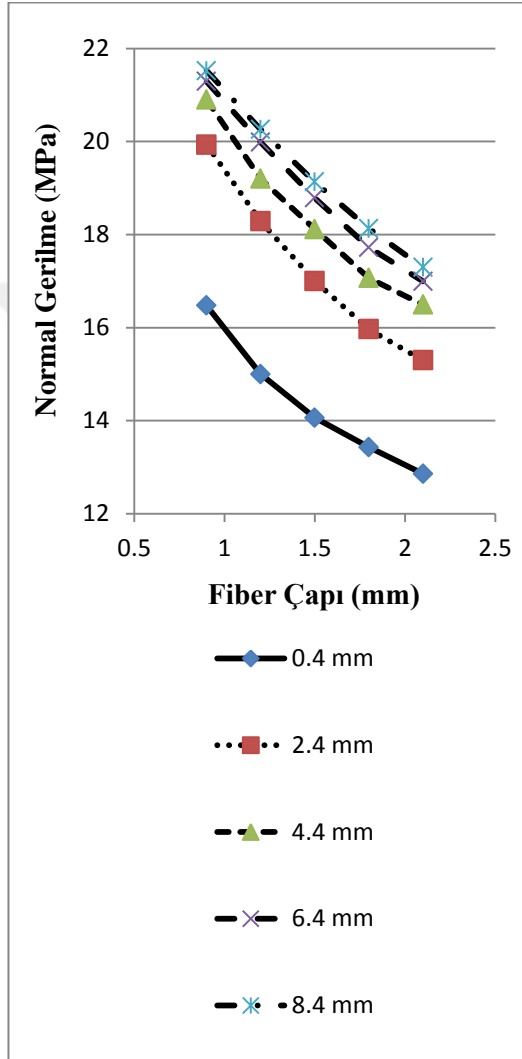


Şekil 4.7 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- aksenal çekme)

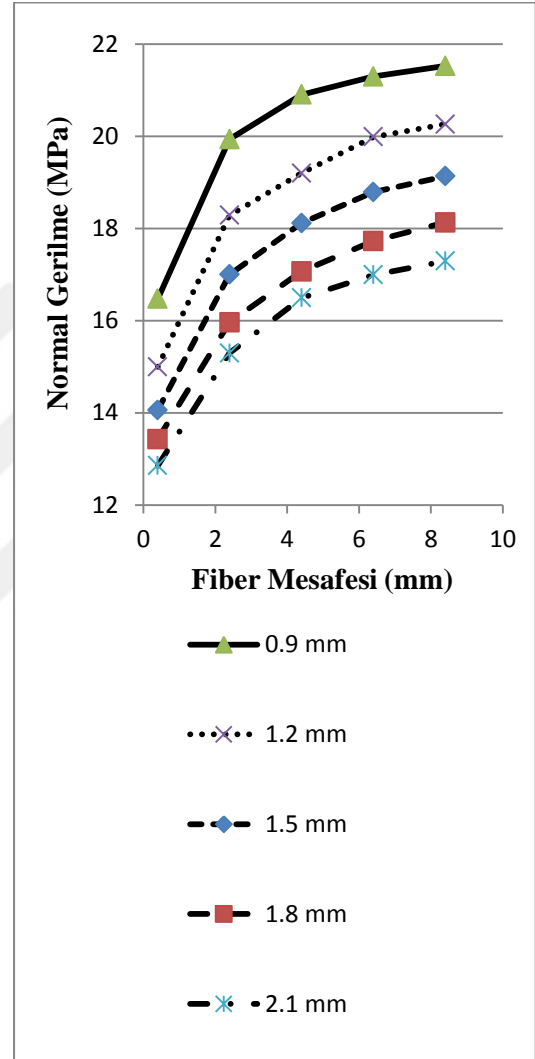


Şekil 4.8 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- aksenal çekme)

Şekil 4.9’da gösterilen sonuçlar, takviyelendirici olarak kullanılan naylon 6.6 fiberleri arasındaki açının  $45^\circ$  olduğundaki durumu göstermektedir. Şekil 4.9’da fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.10’da ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

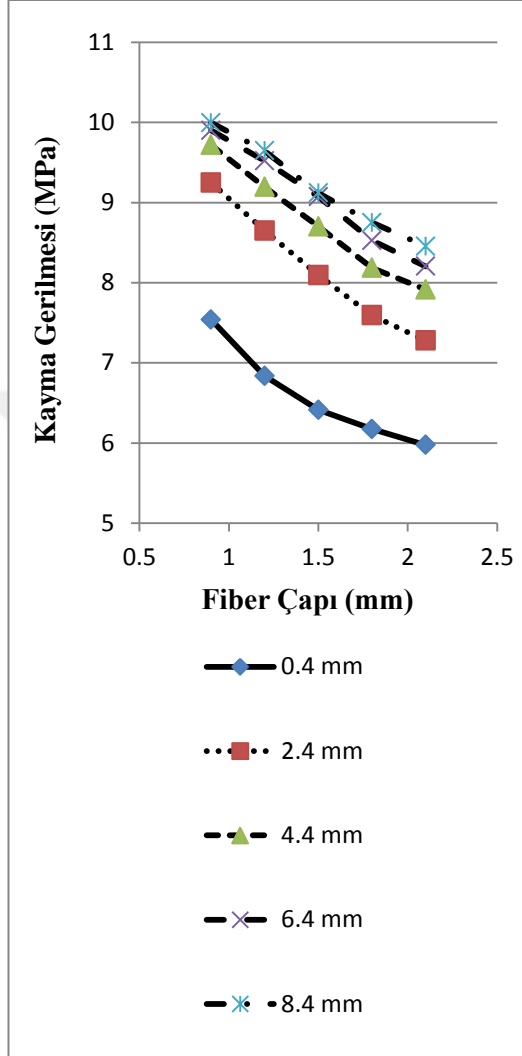


**Şekil 4.9** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $45^\circ$ - aksenal çekme)

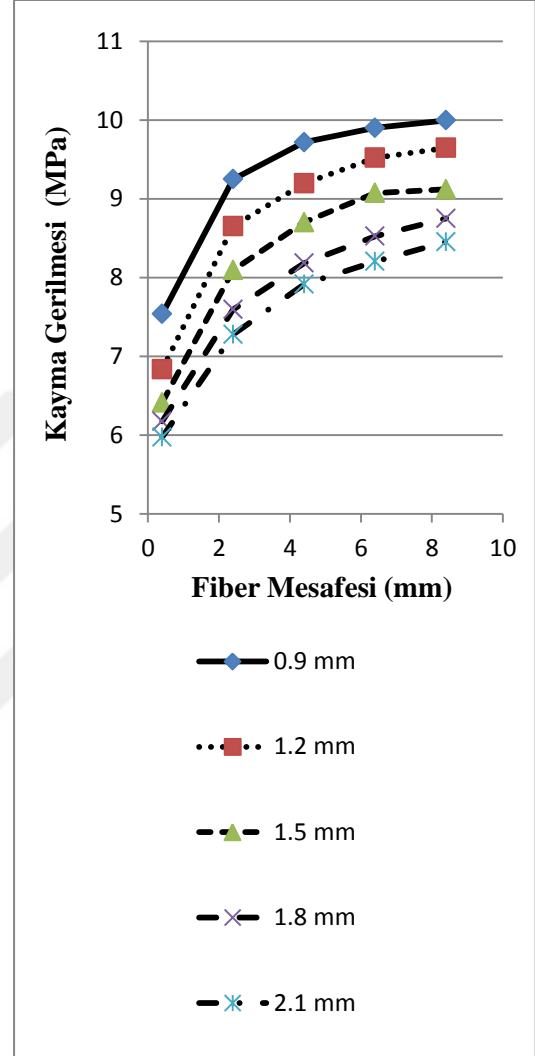


**Şekil 4.10** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $45^\circ$ - aksenal çekme)

Şekil 4.11'deki modelde fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.12'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.



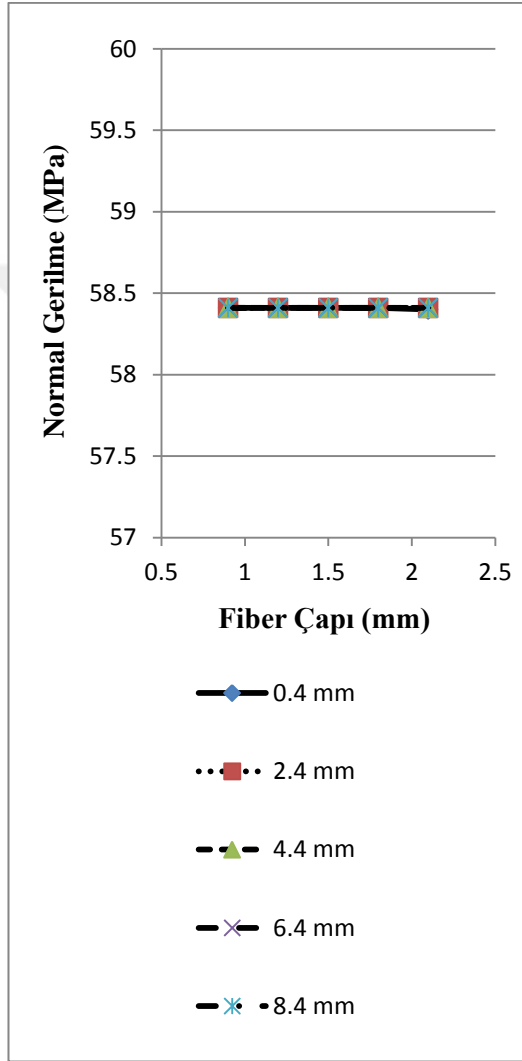
Şekil 4.11 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- eksenel çekme)



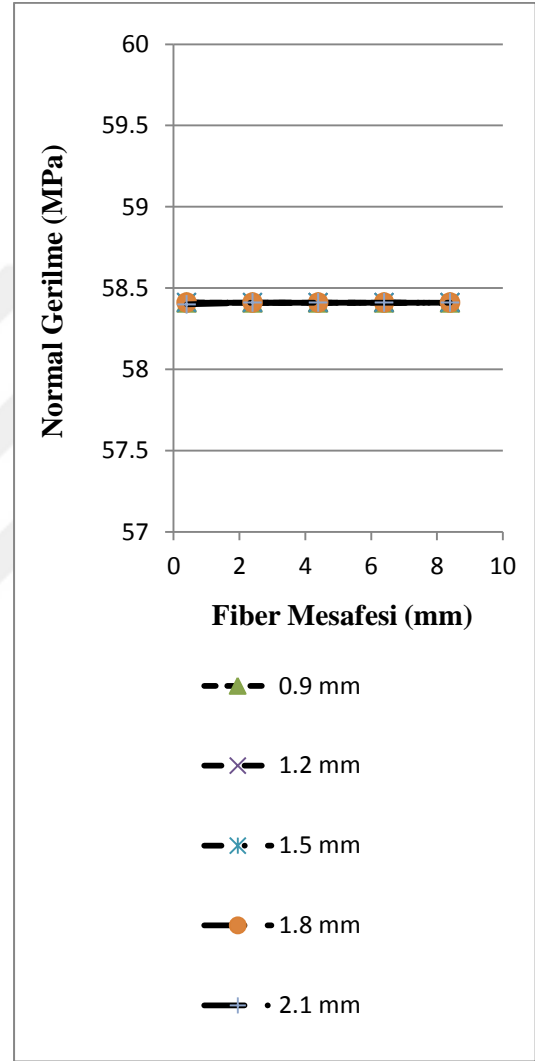
Şekil 4.12 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- eksenel çekme)

### Takviyelendirici olarak naylon 6'nın kullanıldığı testler

Bu modellerde takviye elemanı olarak naylon 6 kullanılmıştır. Bu malzemenin gerekli olan özellikleri literatürden (62 ve 63. kaynak) sağlanmıştır. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te fiber çapı ve fiber mesafesinin artmasına karşın fiberler üzerindeki normal gerilmelerin değişmediği ve 58.5 MPa civarında olduğu belirlenmiştir.

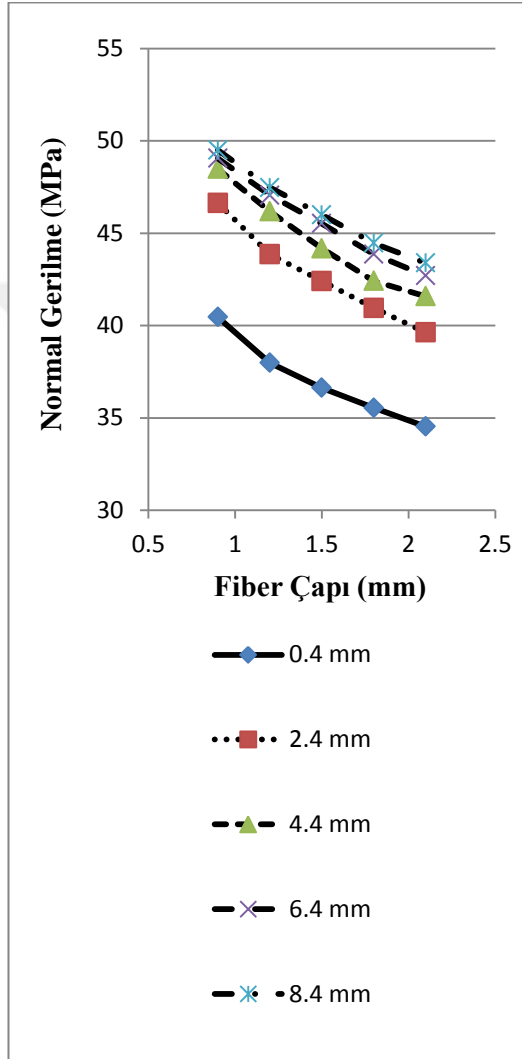


Şekil 4.13 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°- aksenal çekme)

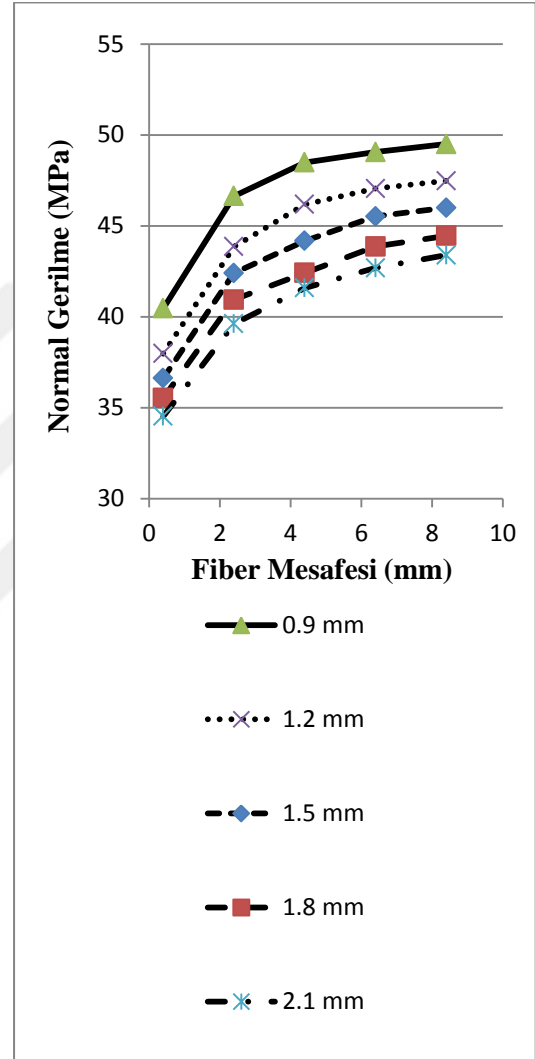


Şekil 4.14 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası aç 0°- aksenal çekme)

Şekil 4.15'deki modelde takviyelendirici olarak naylon 6 kullanılmış olup önceki modelden farklı olarak fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumundaki sonuçlar incelenmiştir. Şekil 4.15'te fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.16'da ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

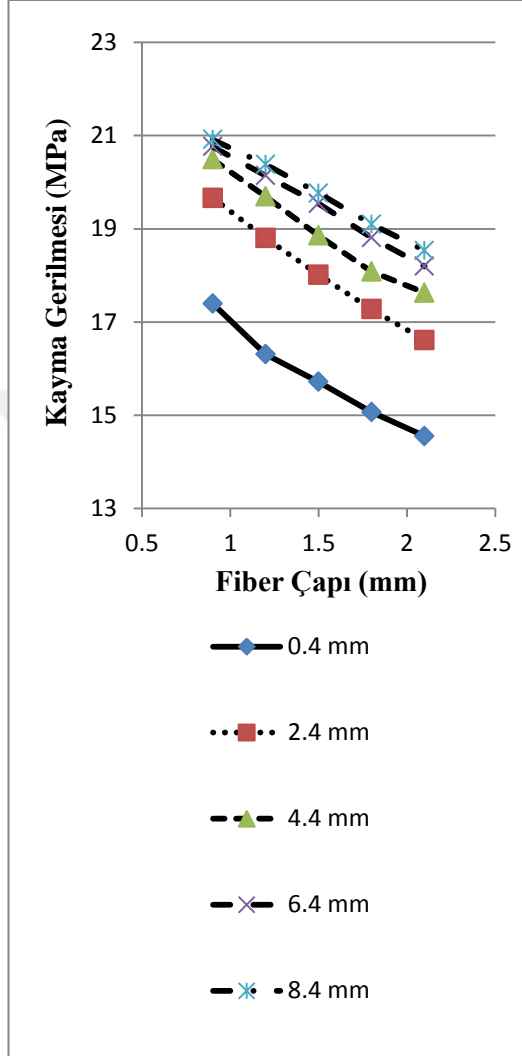


**Şekil 4.15** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $30^\circ$ - aksenal çekme)

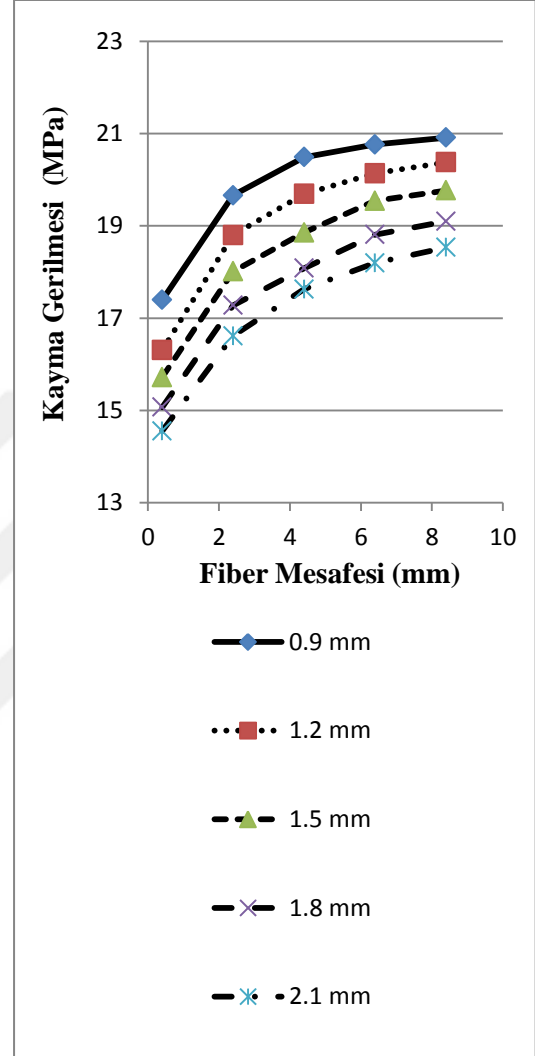


**Şekil 4.16** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası aç  $30^\circ$ - aksenal çekme)

Şekil 4.17'deki modelde fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.18'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

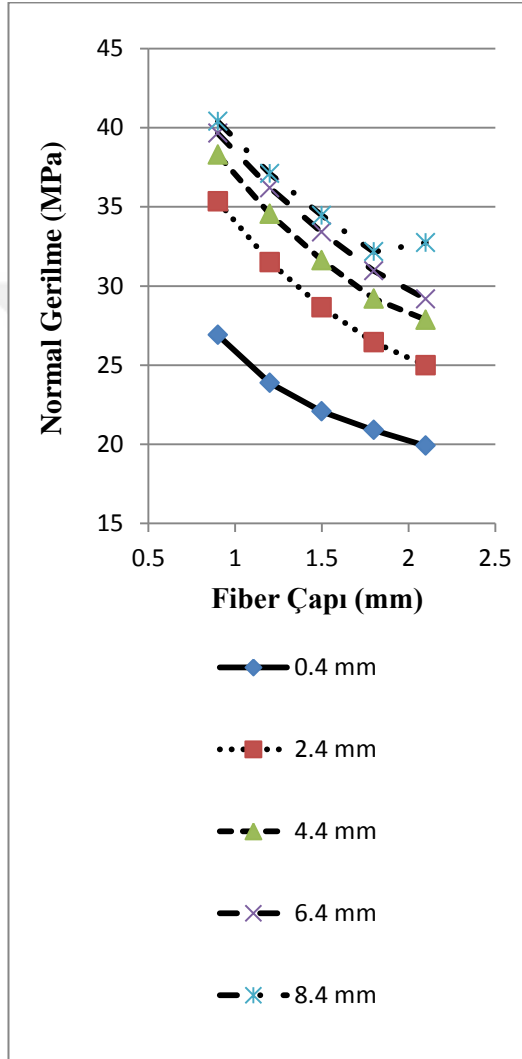


**Şekil 4.17** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°- eksenel çekme)

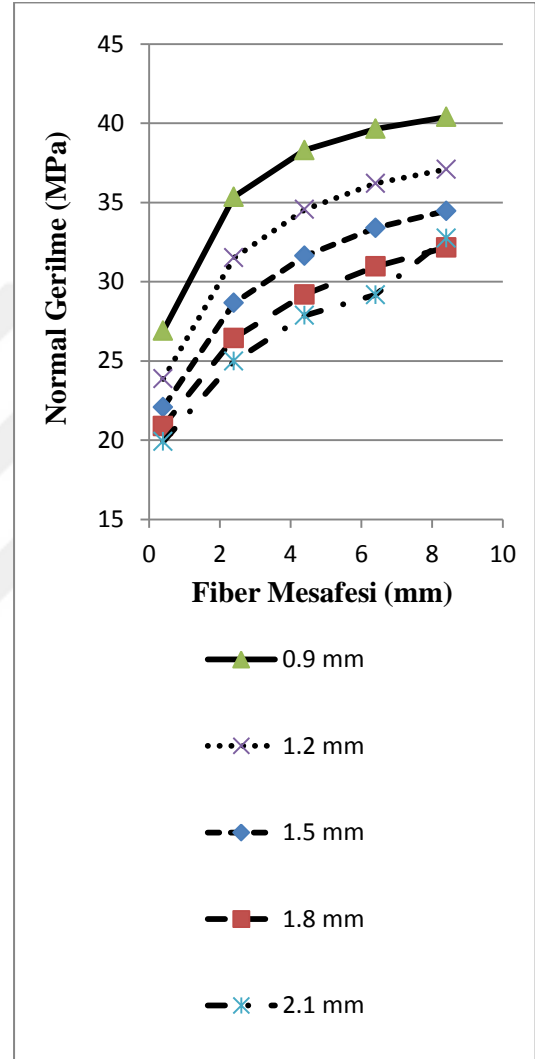


**Şekil 4.18** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°- eksenel çekme)

Şekil 4.19’da gösterilen sonuçlar, takviyelendirici olarak kullanılan naylon 6 fiberleri arasındaki açının  $45^\circ$  olduğundaki durumu göstermektedir. Şekil 4.19’da fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.20’de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.



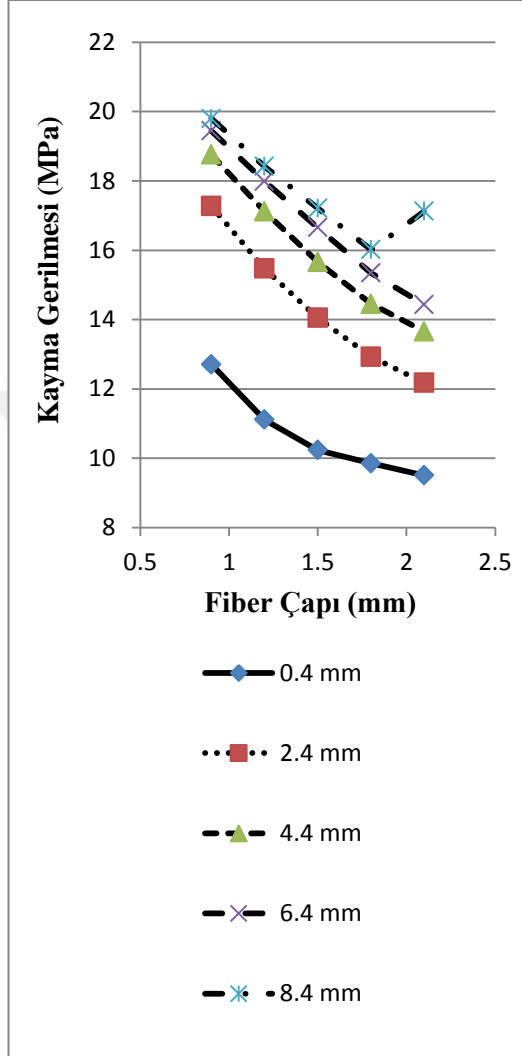
**Şekil 4.19** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $45^\circ$ - eksenel çekme)



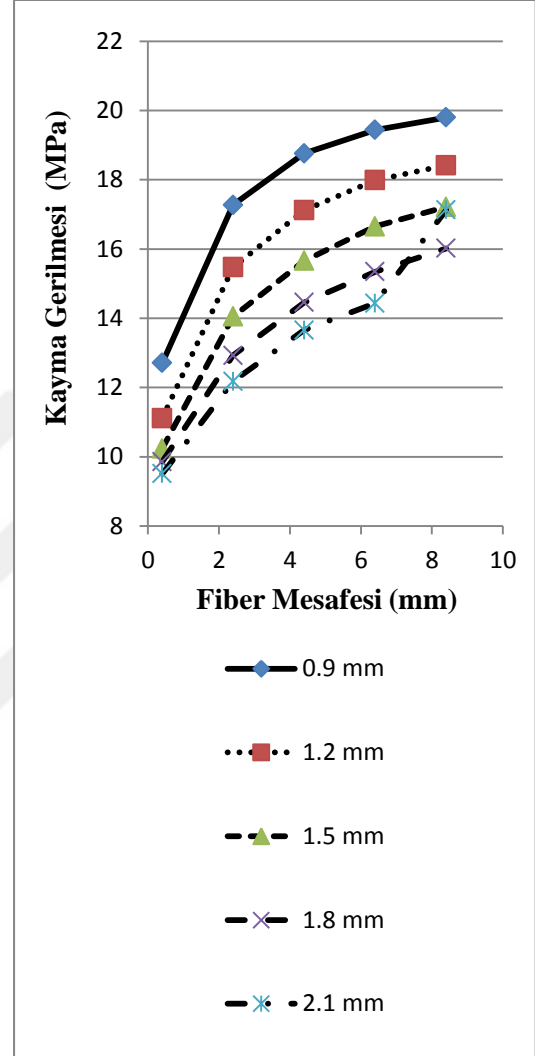
**Şekil 4.20** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası açı  $45^\circ$ - eksenel çekme)



Şekil 4.21’de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.22’de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.



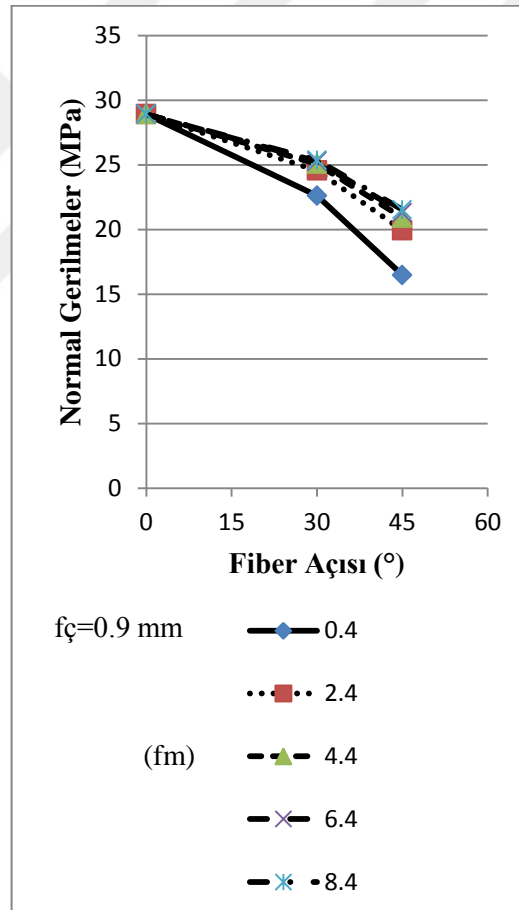
**Şekil 4.21** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°- aksenal çekme)



**Şekil 4.22** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°- aksenal çekme)

#### 4.1.2 Fiberler arasındaki açının değişim etkisinin incelenmesi

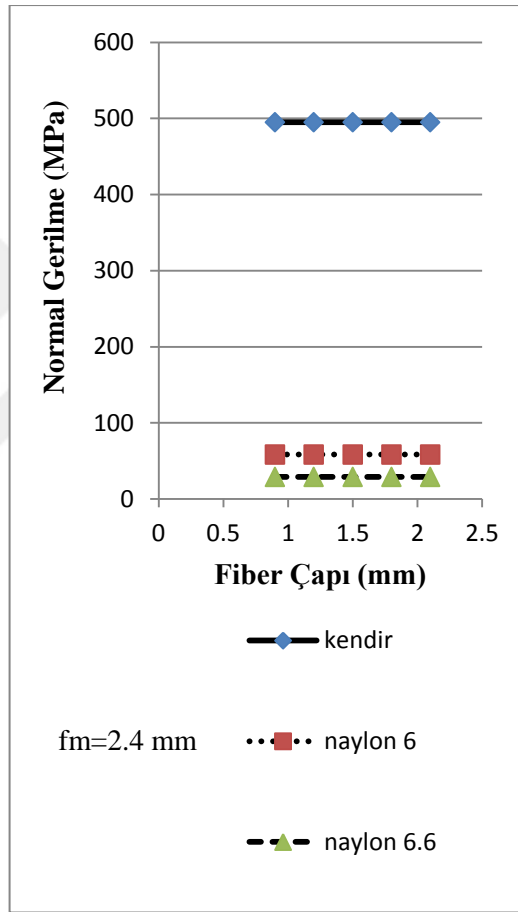
Bu bölümde, farklı fiber açlarına karşılık ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ), naylon 6.6 takviyelendiricisinin çeşitli fiber çapları ve fiber mesafeleri için, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 4.23'te, üç farklı açı değerine karşılık beş farklı model incelenmiş ve açı arttıkça normal gerilmenin azaldığı görülmüştür. Ortaya çıkan bu sonuç normalde de beklenen bir durumdur. Çünkü takviyelendirici olarak kullanılan fiberler, enlemesine değil boylamasına yük taşırlar. Dolayısıyla, fiberler arasındaki açı  $0^\circ$  olduğunda, fiberler üzerindeki normal gerilmeler maksimum olur. Şekil 4.23'ü incelediğimizde, açı büyüdükçe ve fiber çapları küçüldükçe normal gerilmelerdeki azalmanın daha fazla olduğunu görmekteyiz.



Şekil 4.23 Çeşitli çap ve mesafedeki fiberler için farklı açılara karşılık, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler

### 4.1.3 Fiber malzemesinin değişim etkisinin incelenmesi

Bu bölümde, 0° için farklı takviyelendiricilere karşılık (kendir, naylon 6.6, naylon 6), fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler incelenmiştir. Şekil 4.24'te, üç farklı takviyelendirme malzemesine karşılık beş farklı model incelenmiş ve fiberlerde oluşan normal gerilmelerdeki takviyelendirme malzemesinin değişim etkisi görülmüştür. Şekil 4.24'ten, elastisite modülü yüksek olan takviyelendirici üzerinde daha yüksek normal gerilmelerin ortaya çıktığı görülmektedir.



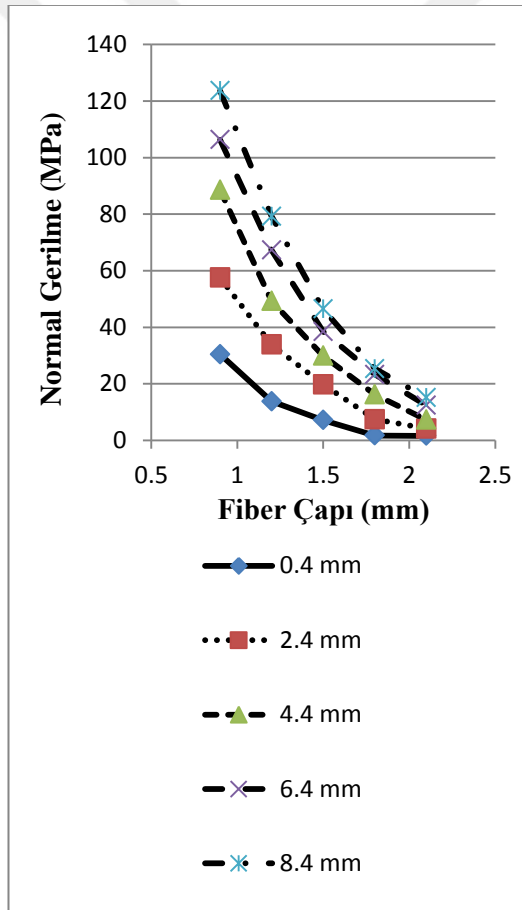
Şekil 4.24 Fiber malzemesinin değişimine karşılık fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler

## 4.2 Düzlem Dışı Yükünde

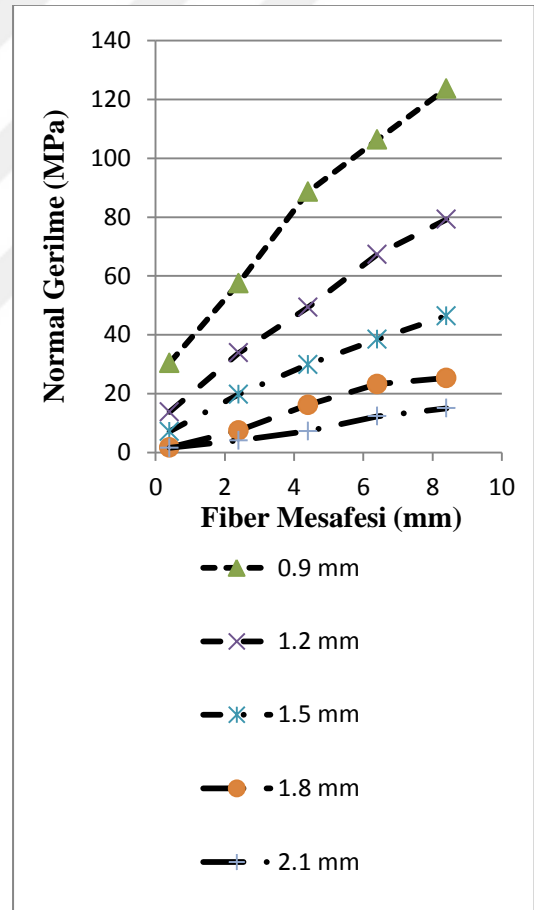
### 4.2.1 Fiber çaplarının ve mesafelerinin değişim etkisinin incelenmesi

#### Takviyelendirici olarak kendirin kullanıldığı testler

Bu modellerde takviyelendirici olarak kendir ipi kullanılmıştır. Şekil 4.25’de fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık fiberler üzerindeki normal gerilme değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.26’da ise, fiber mesafesinin artmasıyla fiberler üzerindeki normal gerilmenin arttığı gözlemlenmektedir.

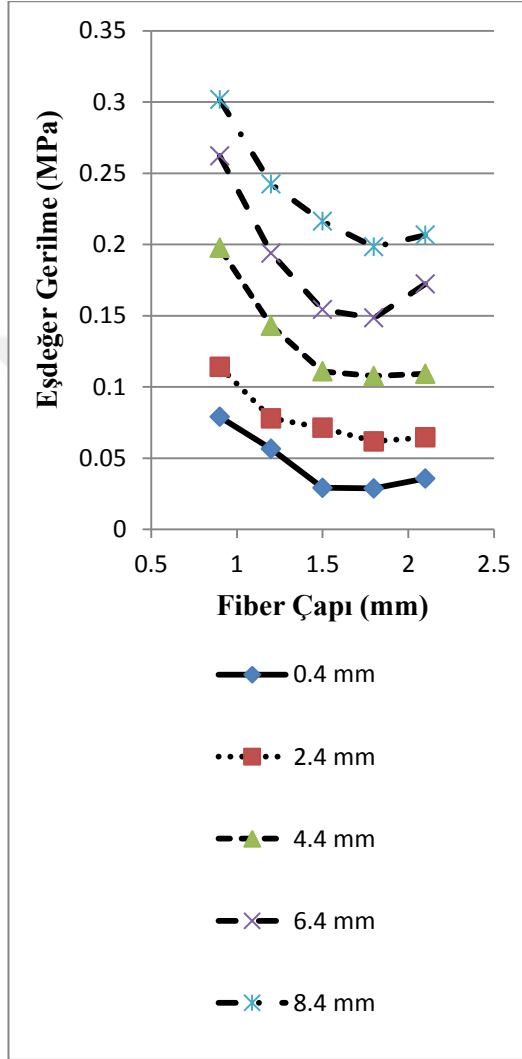


Şekil 4.25 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

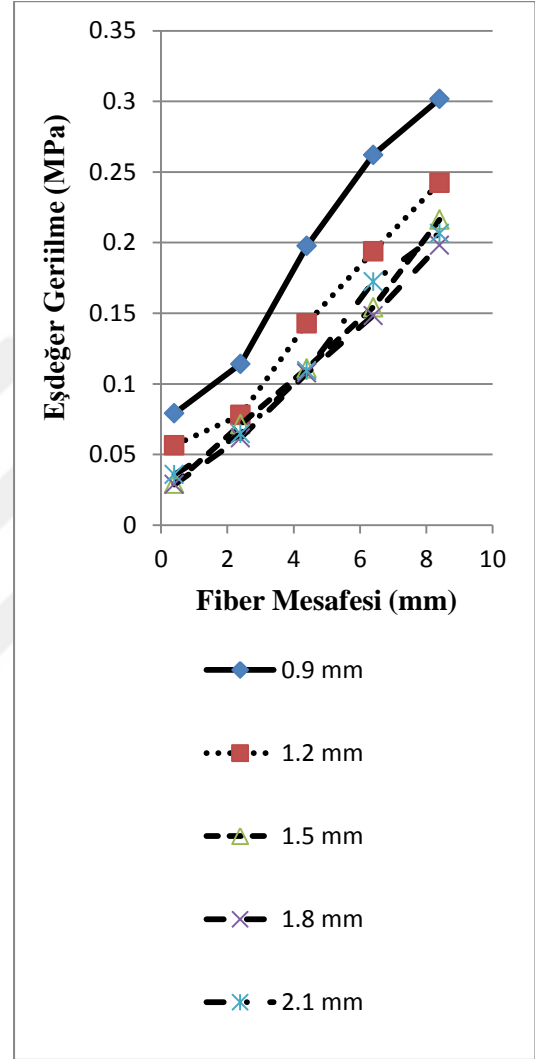


Şekil 4.26 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.27’de fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilme değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.28’de ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmenin arttığı görülmektedir.

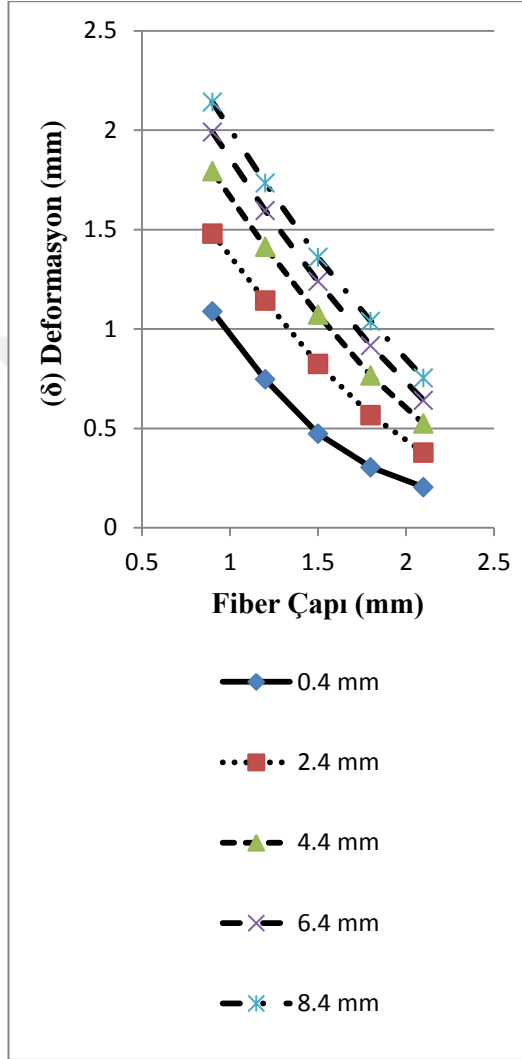


**Şekil 4.27** Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

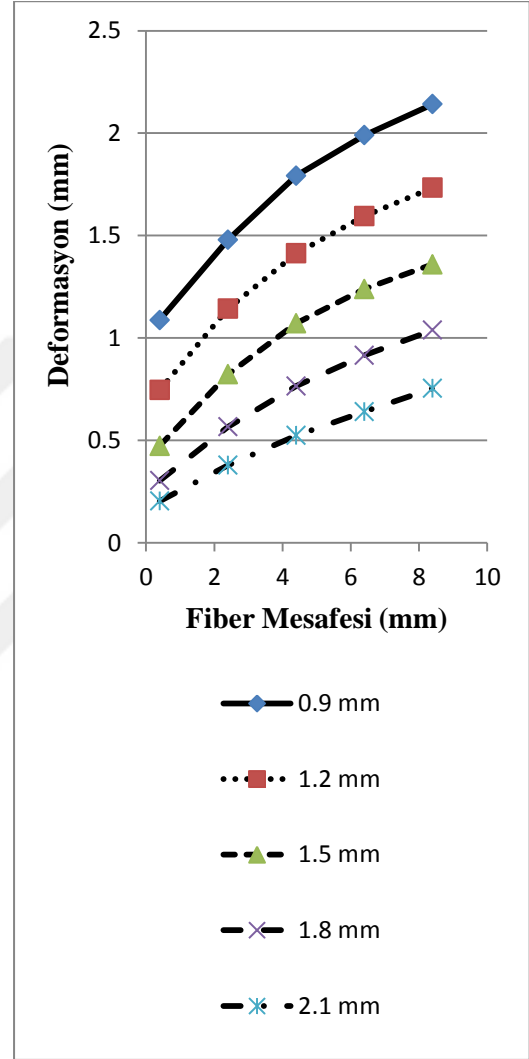


**Şekil 4.28** Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.29’da fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.30’da ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.

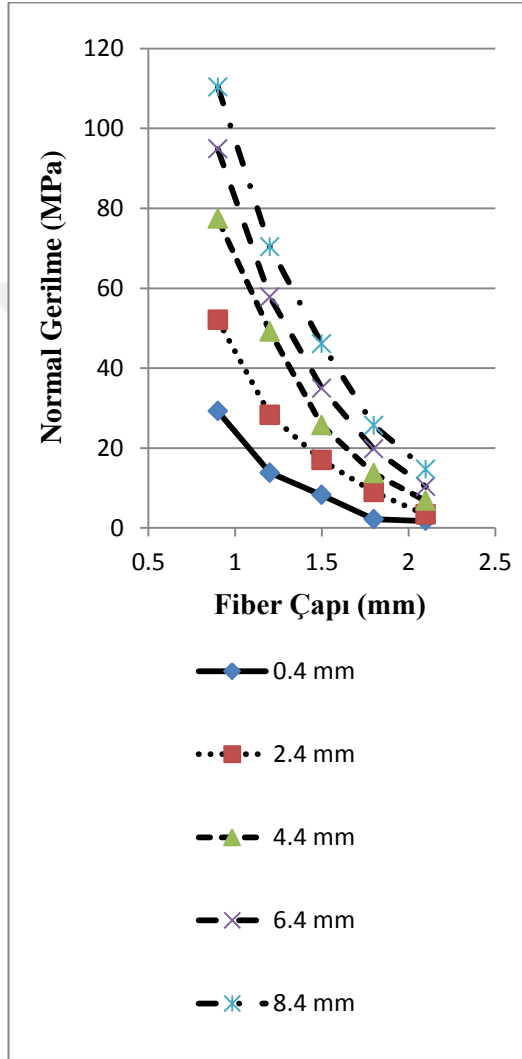


**Şekil 4.29** Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

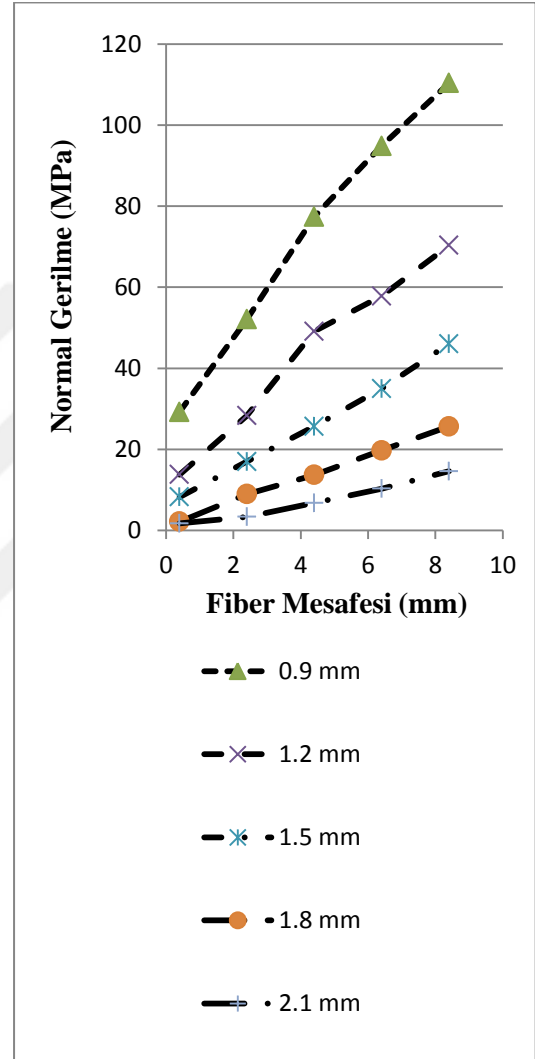


**Şekil 4.30** Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.31'deki modelde takviyelendirici olarak kendir ipi kullanılmış olup önceki modelden farklı olarak fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumundaki sonuçlar incelenmiştir. Şekil 4.31'de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.32'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

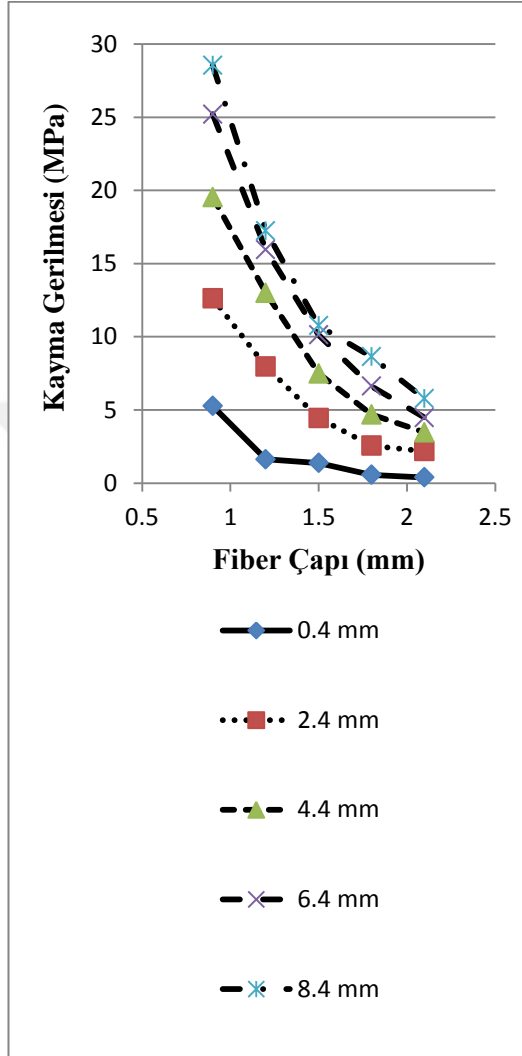


**Şekil 4.31** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

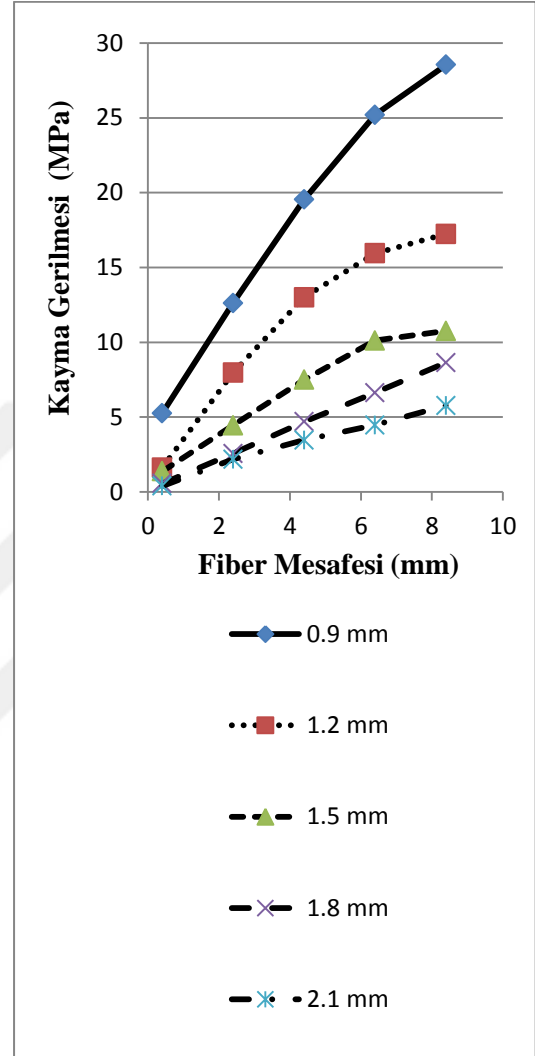


**Şekil 4.32** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.33'deki modelde fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.34'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.



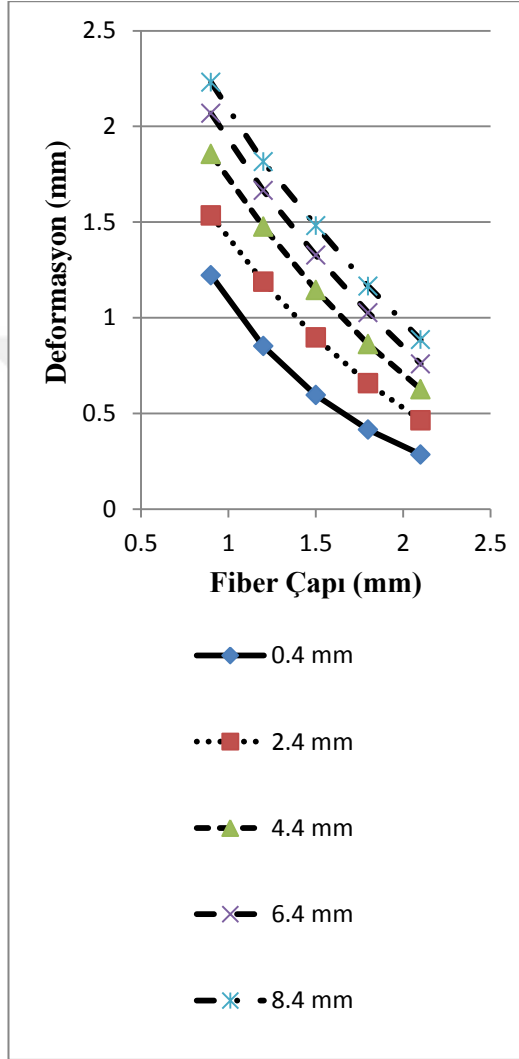
Şekil 4.33 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°- düzlem dışı)



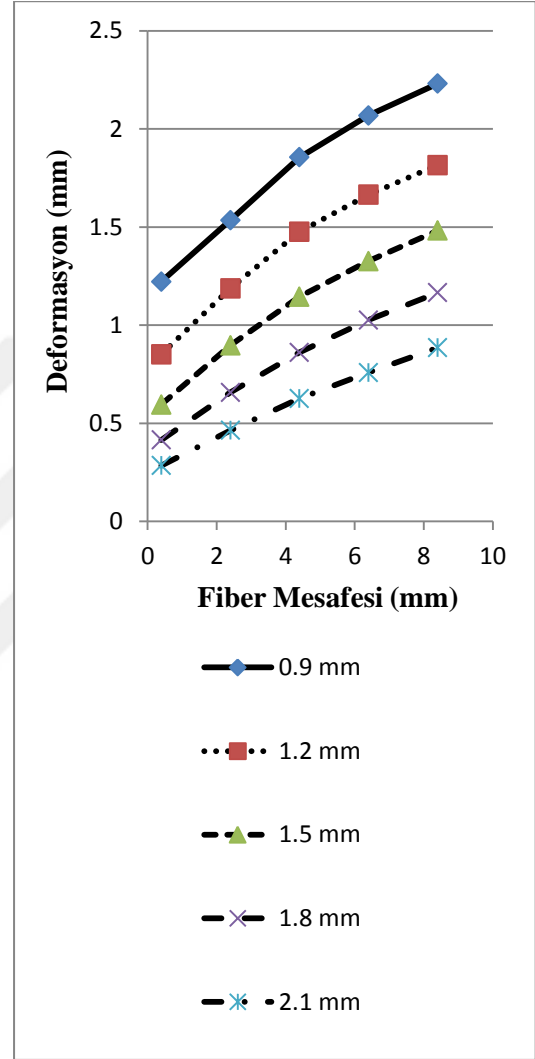
Şekil 4.34 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 30°- düzlem dışı)



Şekil 4.35’de fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.36’da ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.

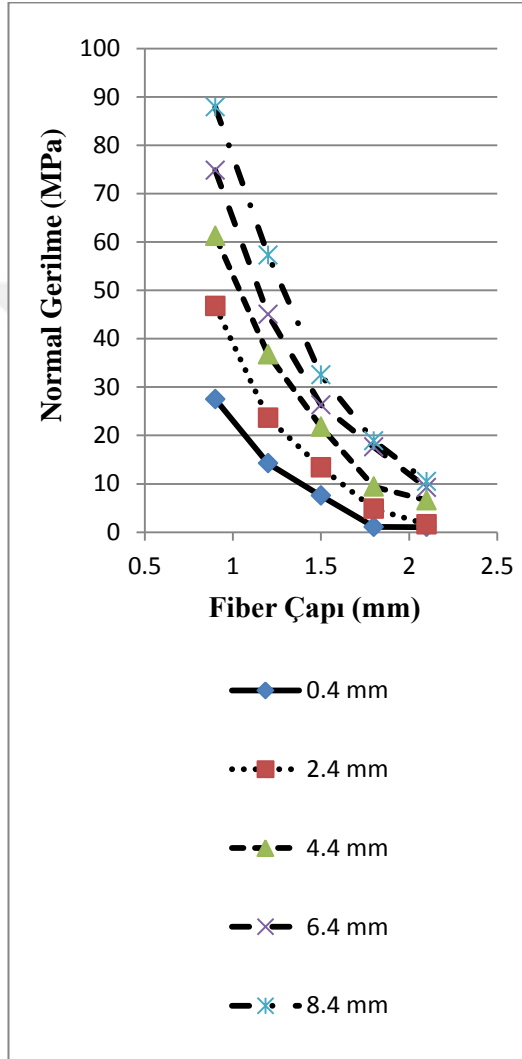


Şekil 4.35 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

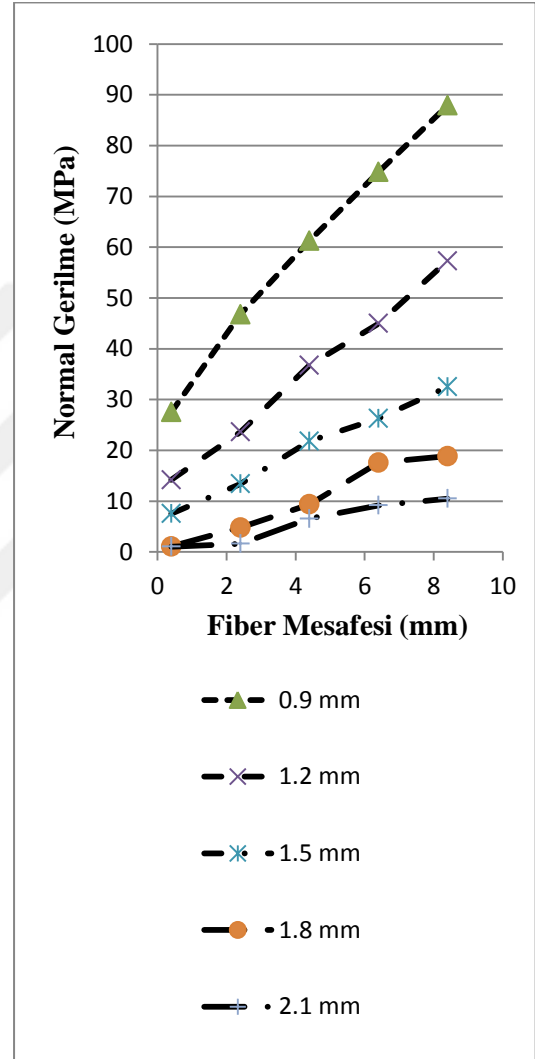


Şekil 4.36 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.37’de gösterilen sonuçlar, takviyelendirici olarak kullanılan kendir fiberler arasındaki açının  $45^\circ$  olduğundaki durumu göstermektedir. Şekil 4.37’de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.38’de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

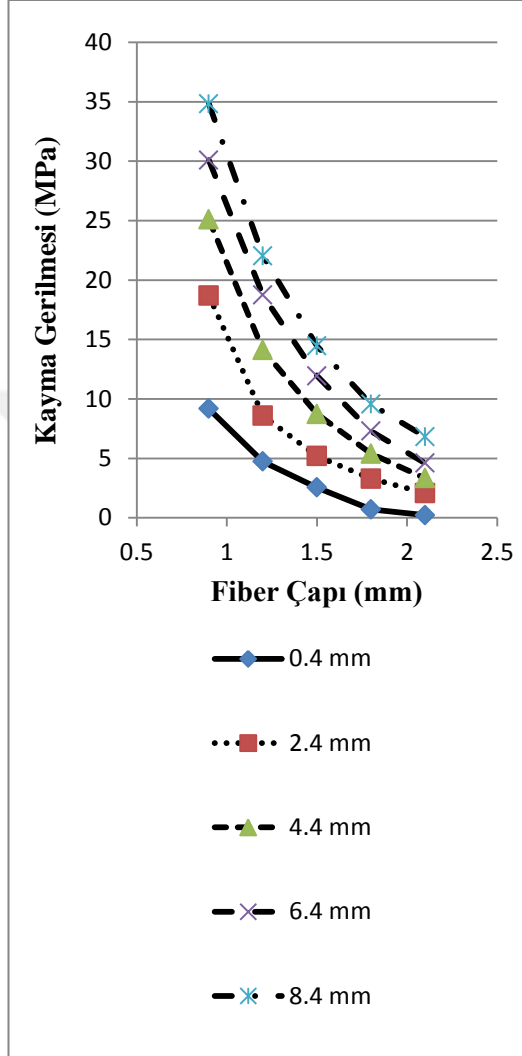


**Şekil 4.37** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

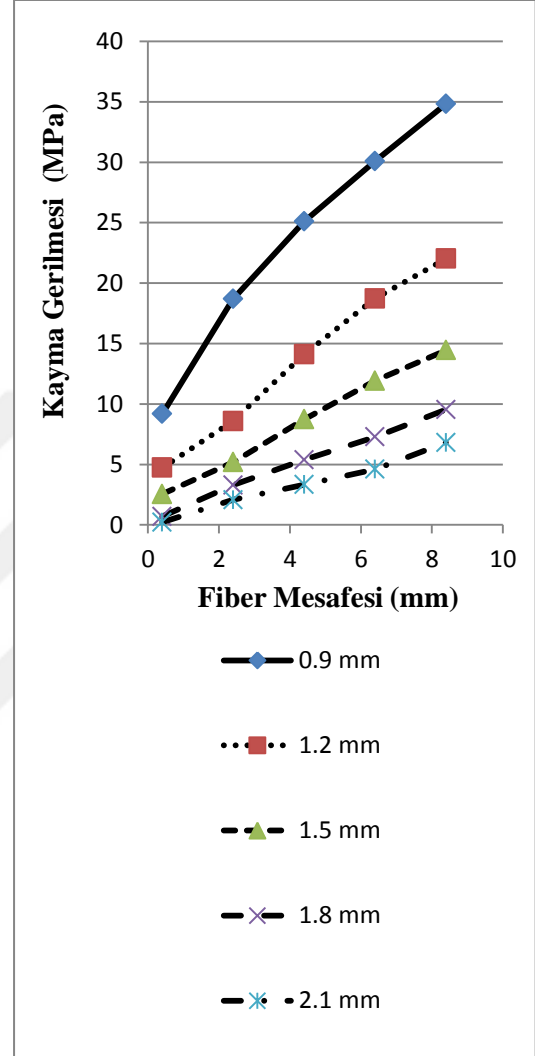


**Şekil 4.38** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.39'deki modelde fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.40'da ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

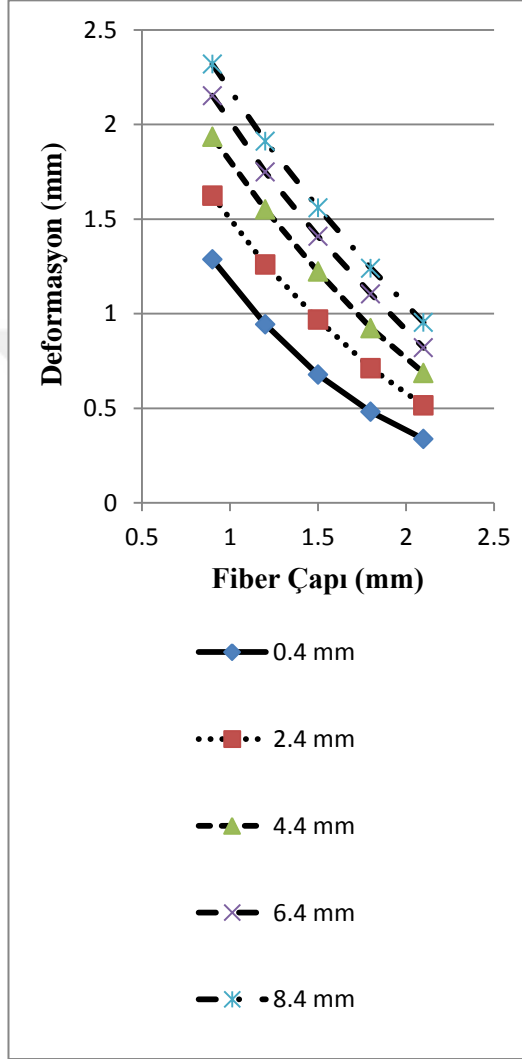


Şekil 4.39 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)

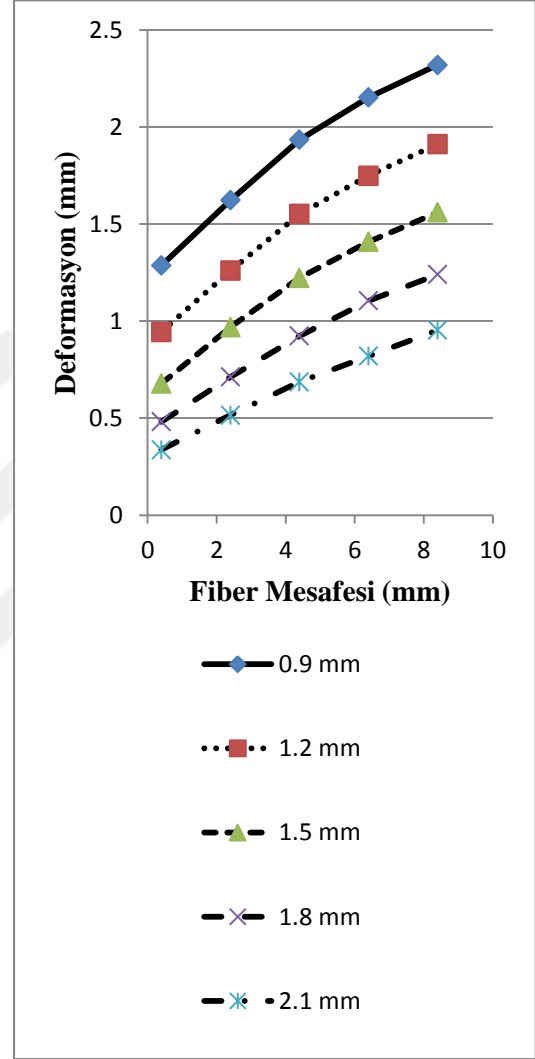


Şekil 4.40 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici kendir- fiberler arası 45°- düzlem dışı)

Şekil 4.41’de fiberler arasındaki açının  $45^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.42’de ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.



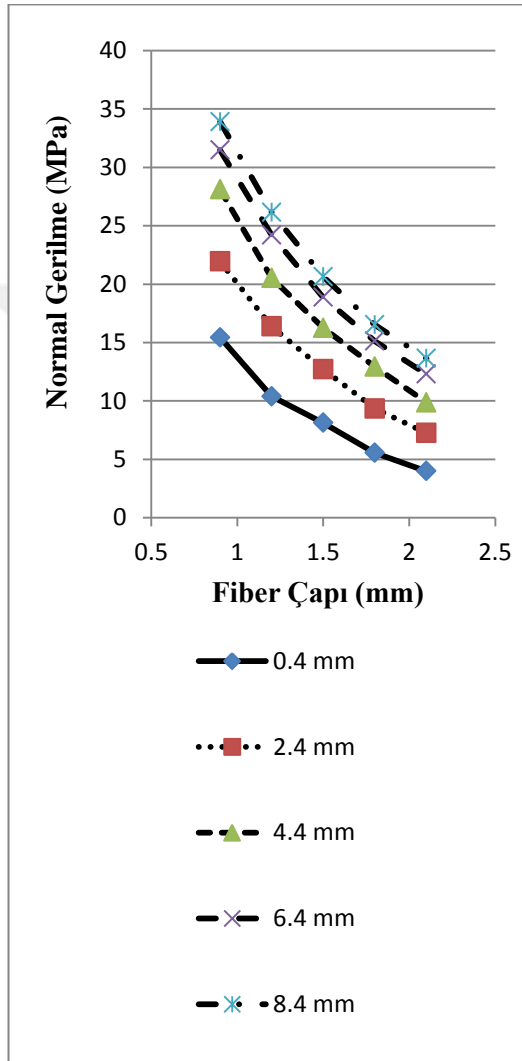
Şekil 4.41 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)



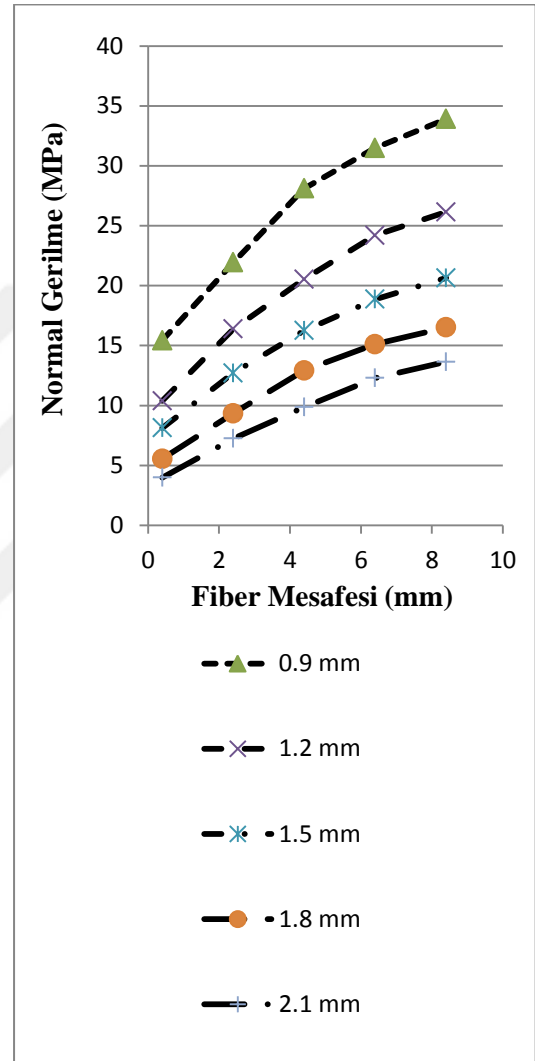
Şekil 4.42 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

### Takviyelendirici olarak naylon 6.6'nın kullanıldığı testler

Bu modellerde takviye elemanı olarak naylon 6.6 kullanılmıştır. Şekil 4.43'de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.44'de ise fiber mesafesinin artması ile birlikte fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

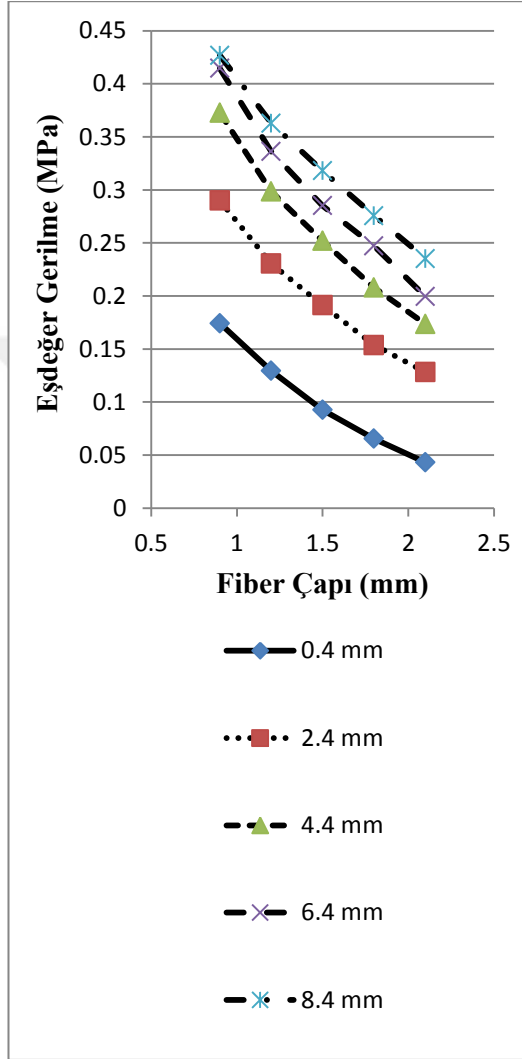


Şekil 4.43 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)

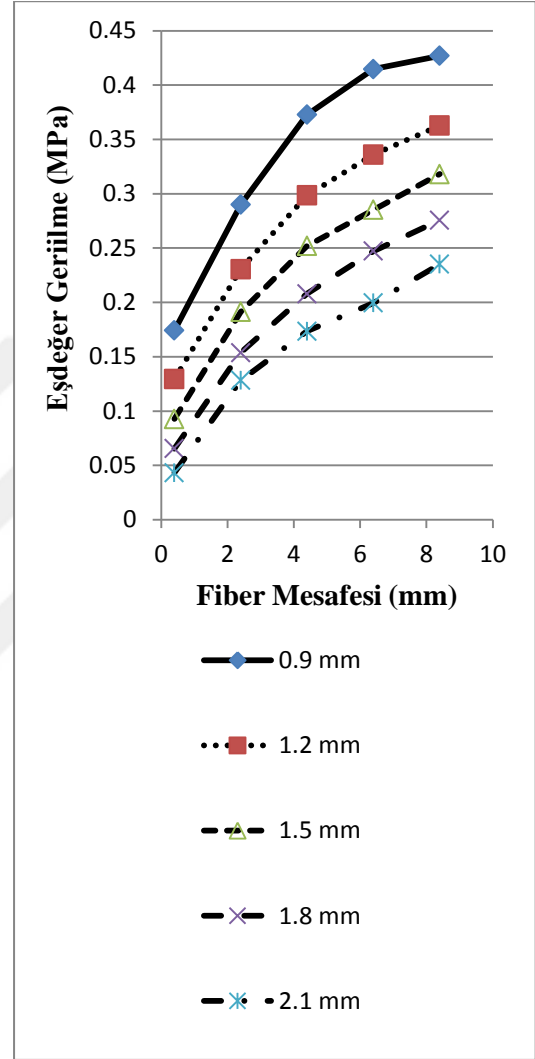


Şekil 4.44 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)

Şekil 4.45’de fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilme değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.46’da ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmenin arttığı görülmektedir.

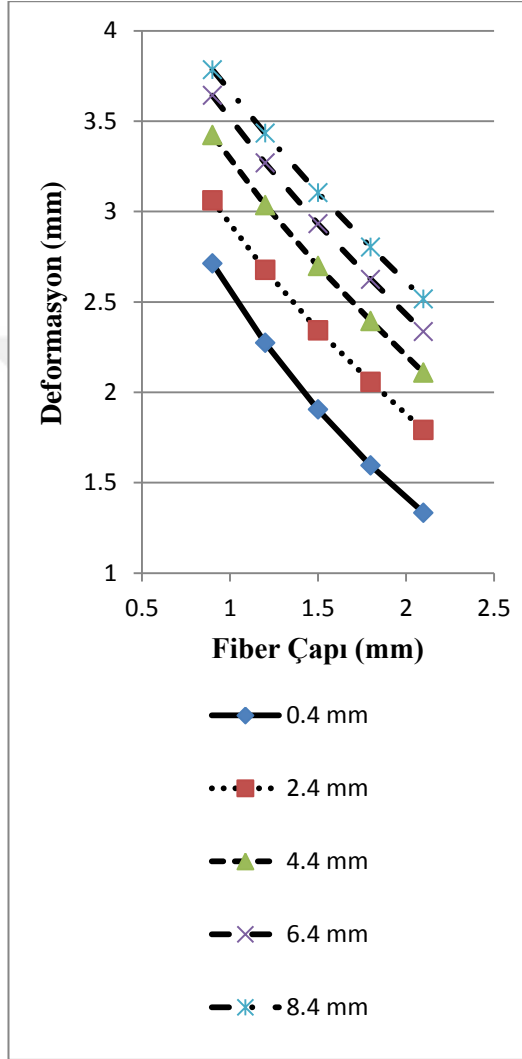


**Şekil 4.45** Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

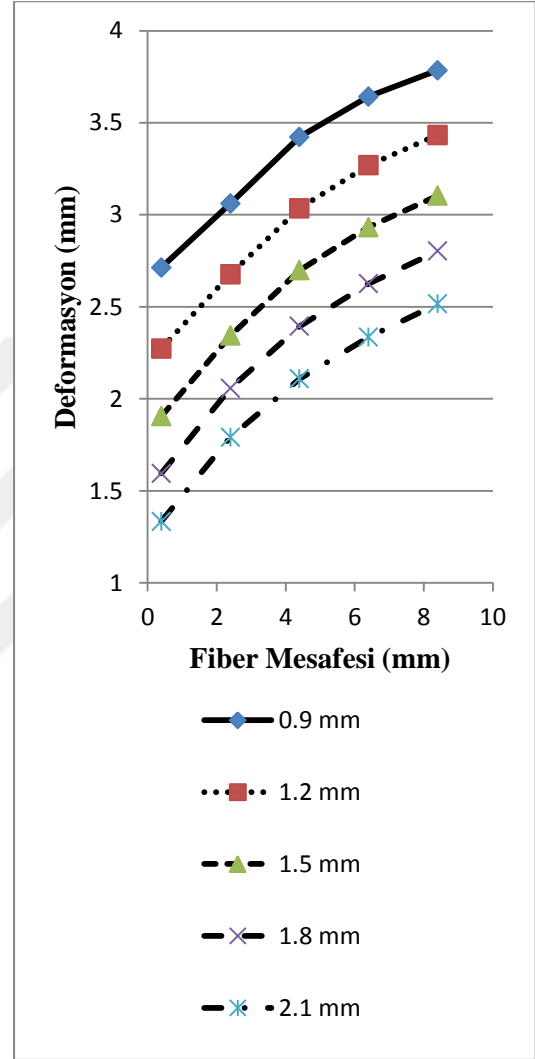


**Şekil 4.46** Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.47’de fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.48’de ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.

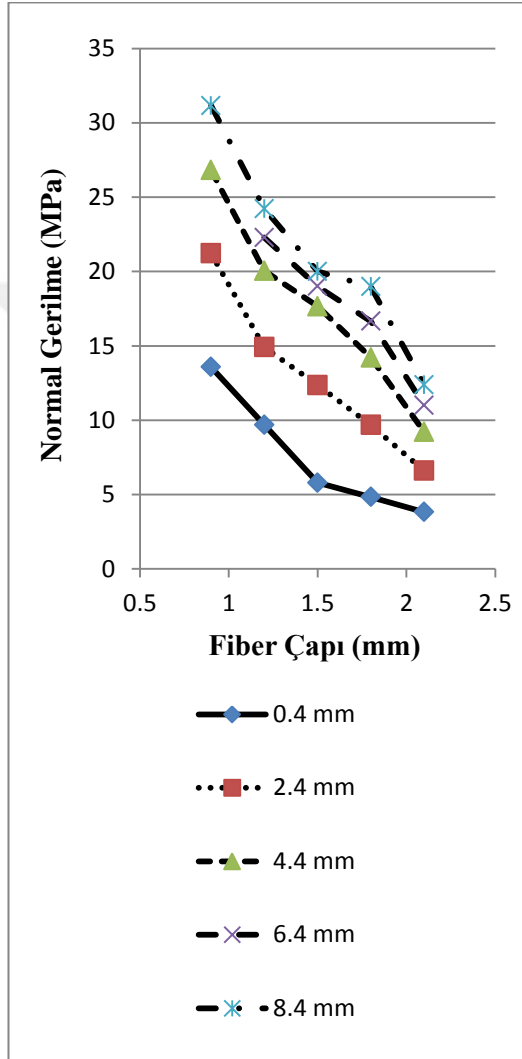


**Şekil 4.47** Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

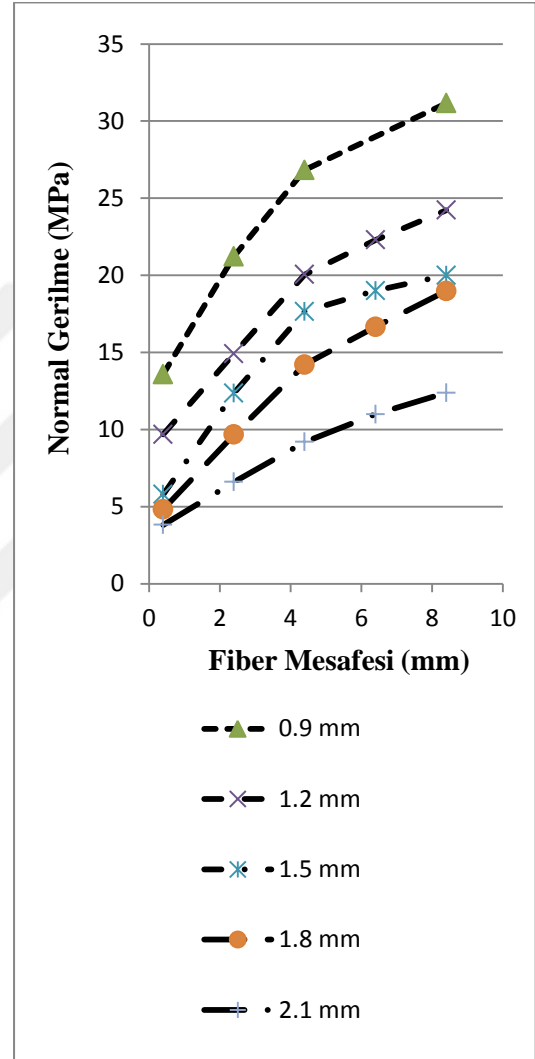


**Şekil 4.48** Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.49'daki modelde, takviyelendirici olarak naylon 6.6 kullanılmış olup önceki modelden farklı olarak fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumundaki sonuçlar incelenmiştir. Şekil 4.49'da fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.50'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.



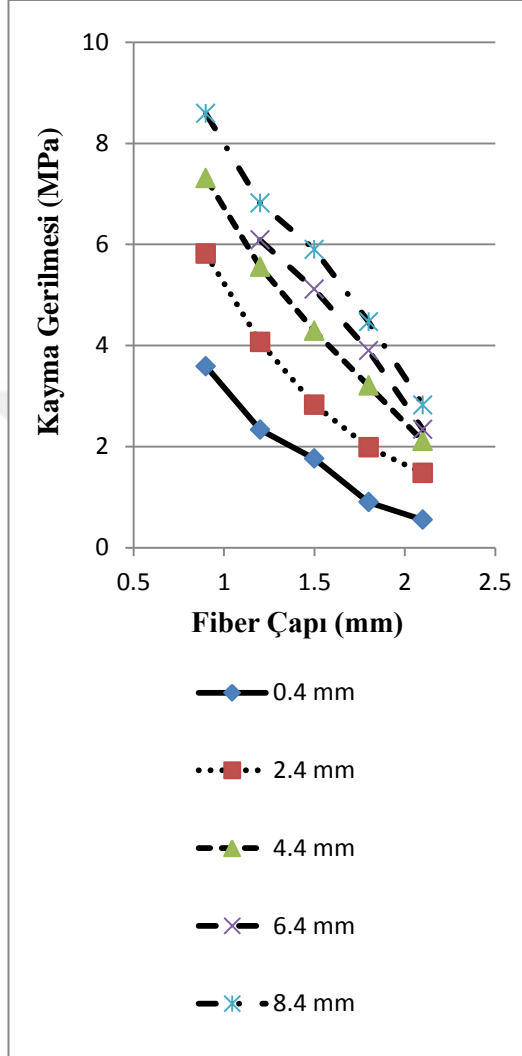
**Şekil 4.49** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)



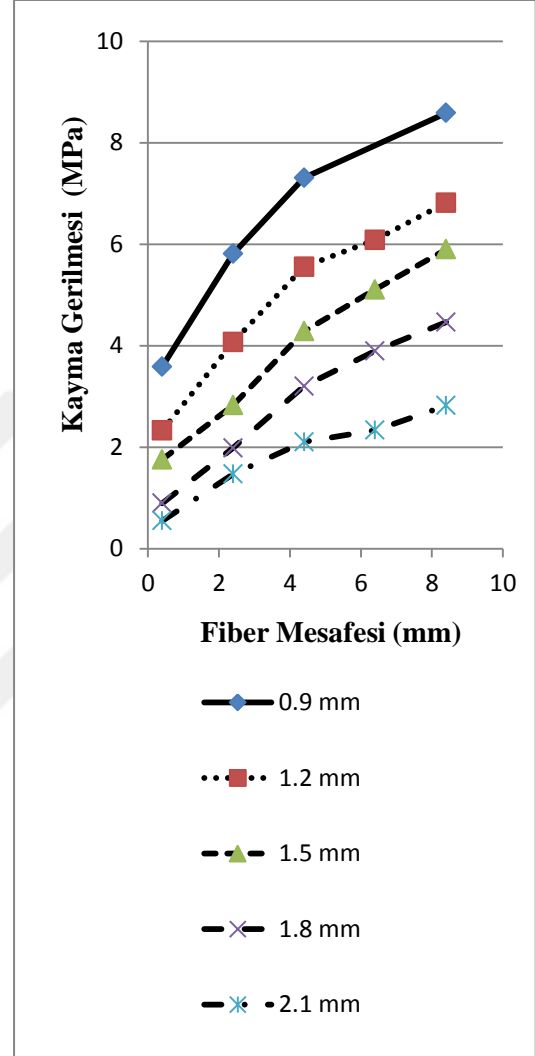
**Şekil 4.50** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)



Şekil 4.51'deki modelde, fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.52'de ise fiber mesafesinin artması ile birlikte fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

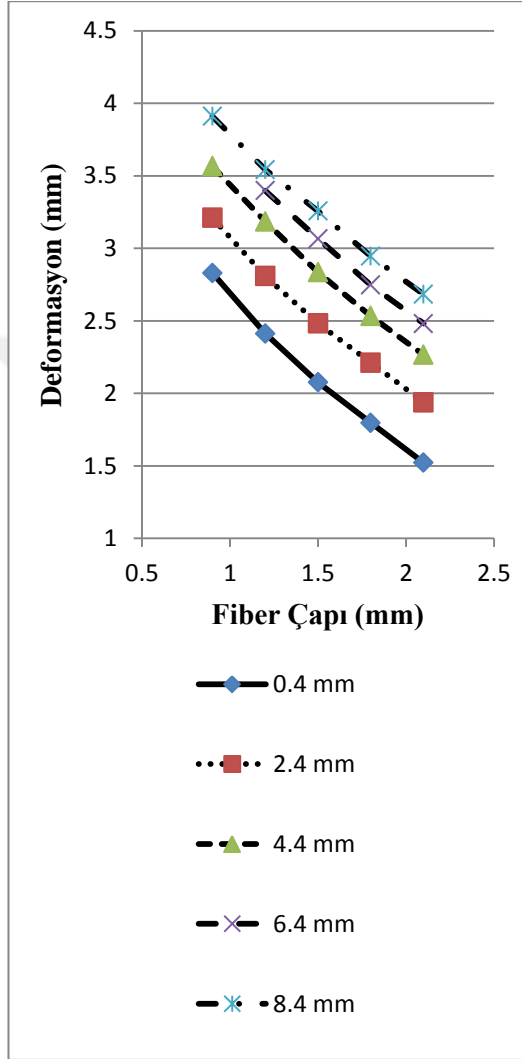


**Şekil 4.51** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)

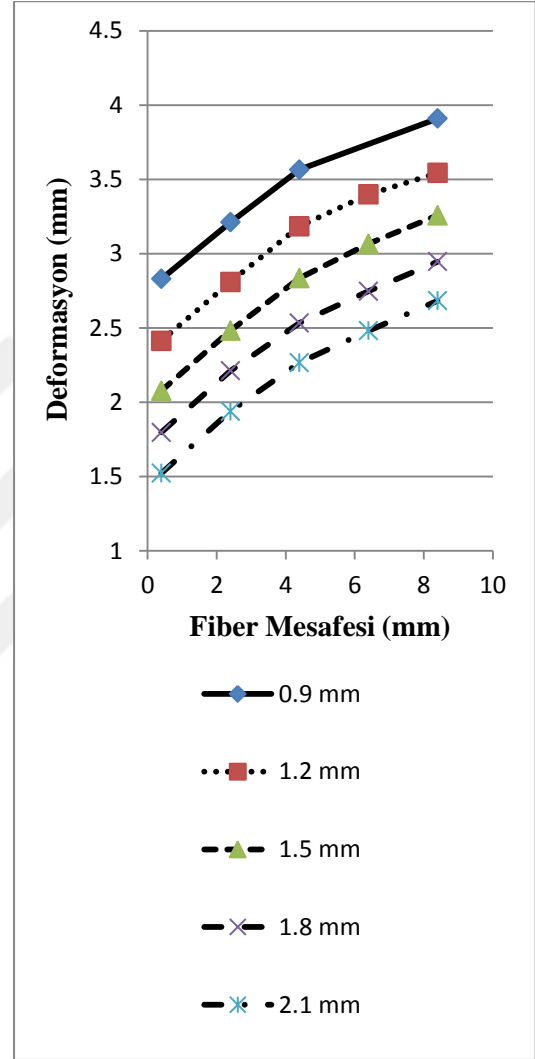


**Şekil 4.52** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)

Şekil 4.53’de fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.54’de ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.

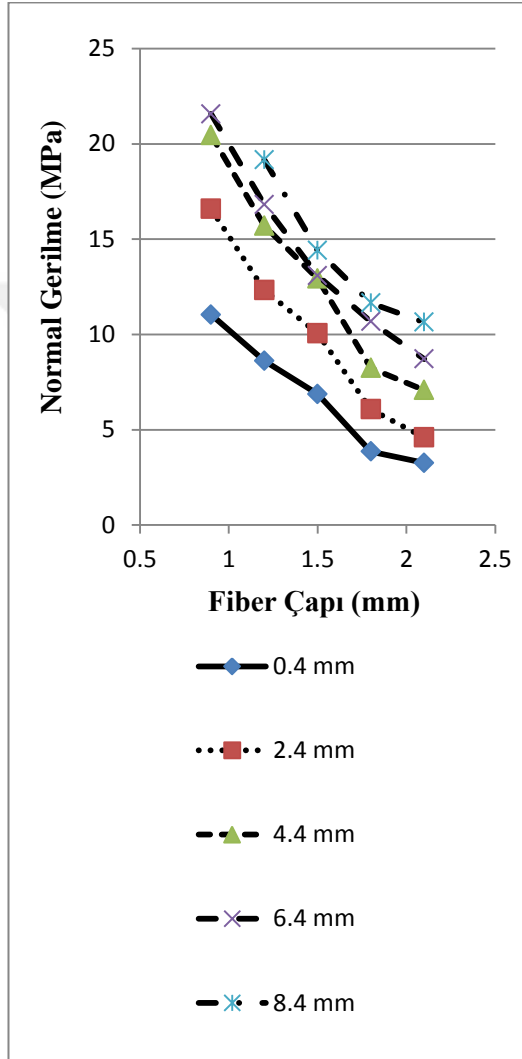


Şekil 4.53 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

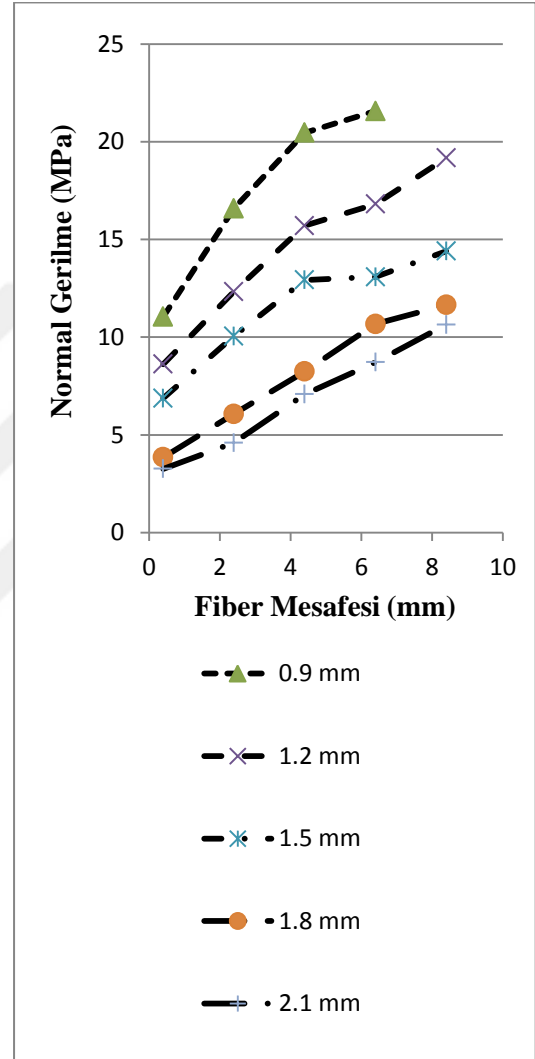


Şekil 4.54 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.55’de gösterilen sonuçlar, takviyelendirici olarak kullanılan naylon 6.6 fiberler arasındaki açının  $45^\circ$  olduğundaki durumu göstermektedir. Şekil 4.55’de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.56’da ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

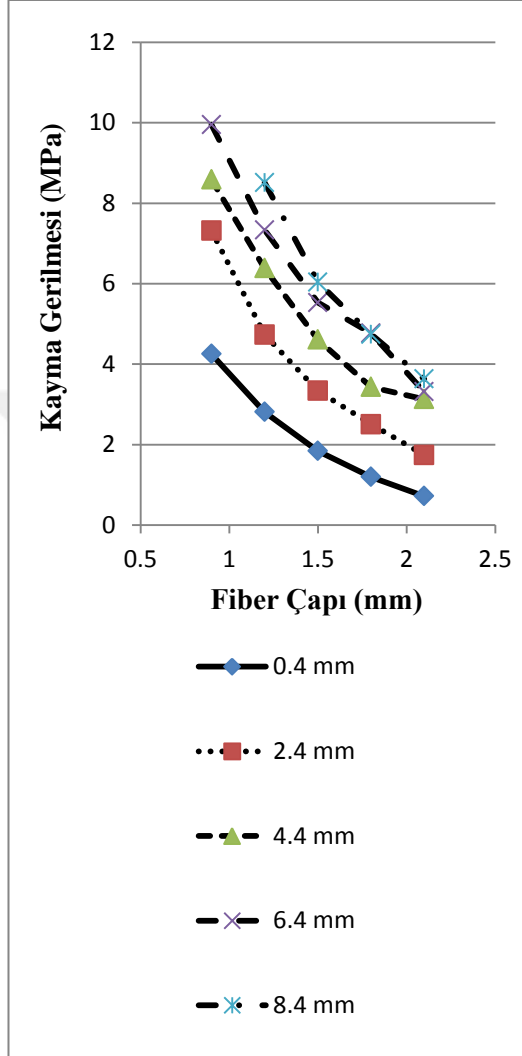


**Şekil 4.55** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

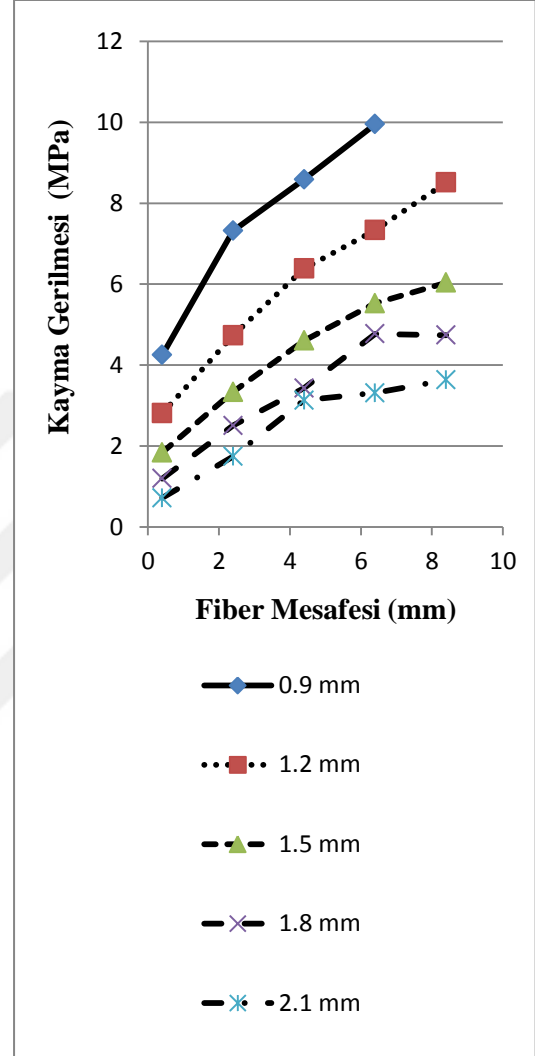


**Şekil 4.56** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.57'deki modelde fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.58'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

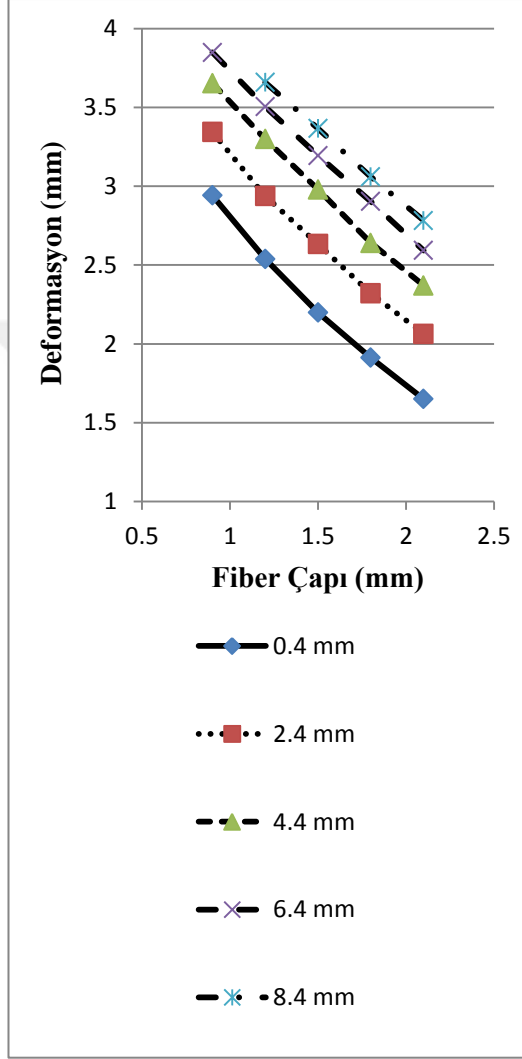


Şekil 4.57 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)

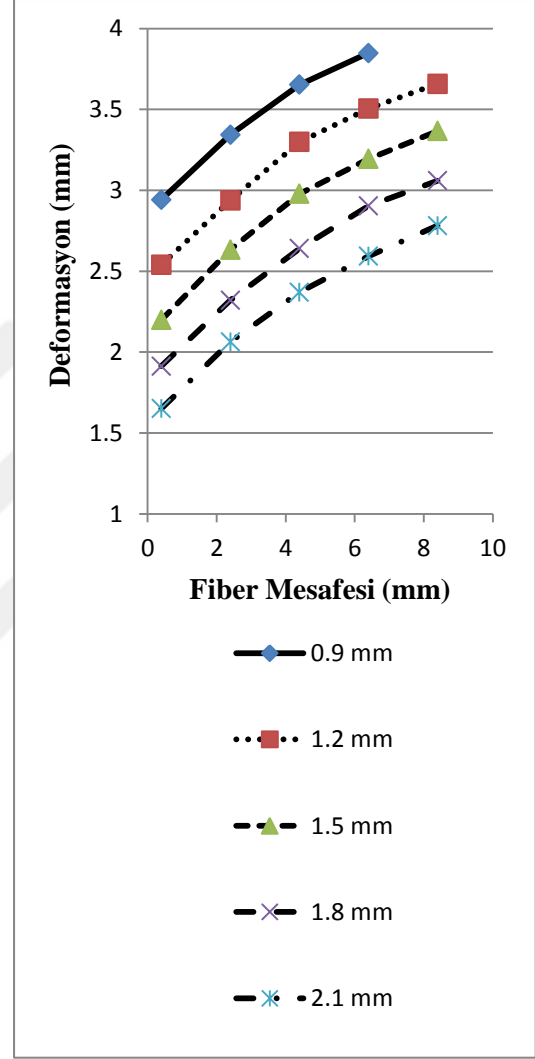


Şekil 4.58 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)

Şekil 4.59’da fiberler arasındaki açının  $45^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.60’da ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.



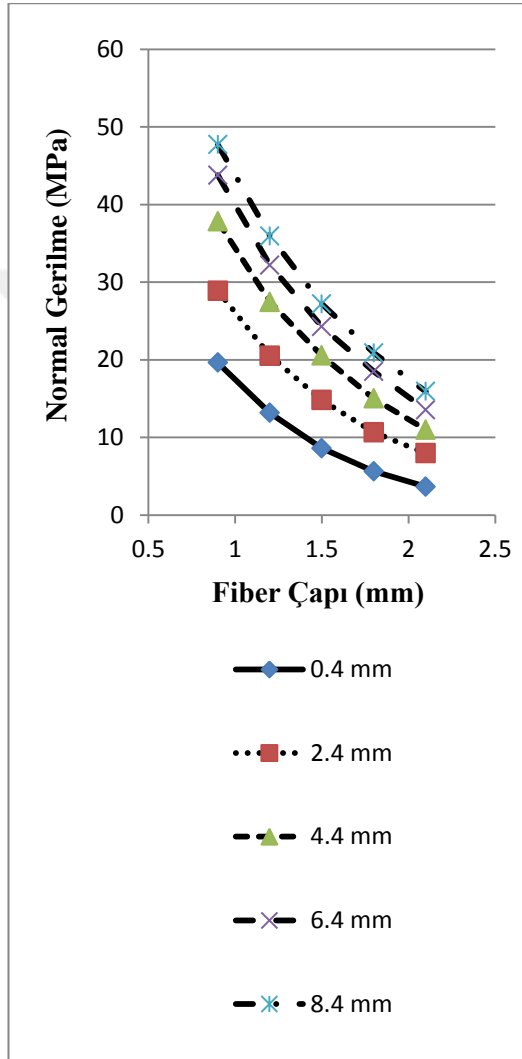
Şekil 4.59 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)



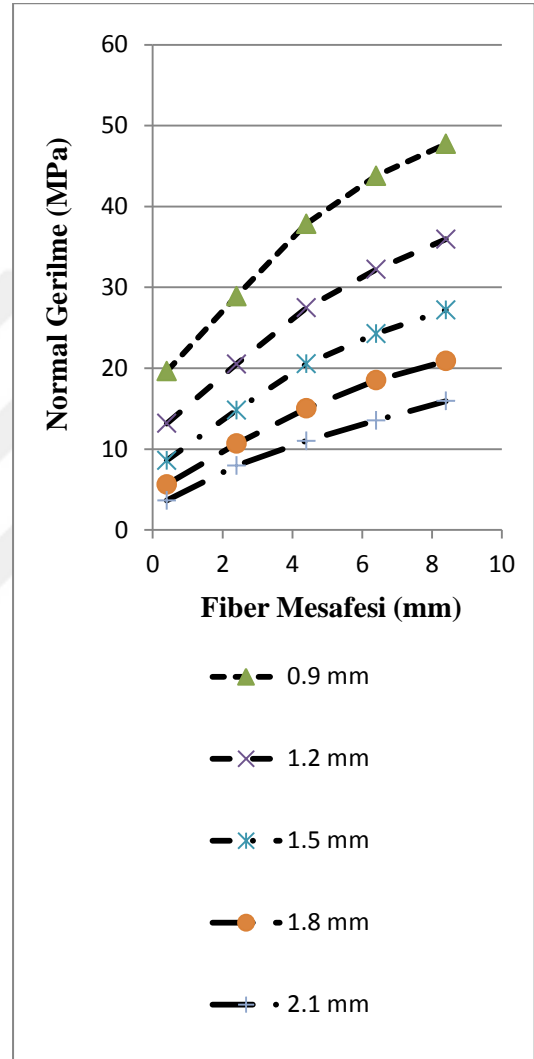
Şekil 4.60 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6.6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

### Takviyelendirici olarak naylon 6'nın kullanıldığı testler

Bu modellerde takviye elemanı olarak naylon 6 kullanılmıştır. Şekil 4.61'de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.62'de ise fiber mesafesinin artması ile birlikte fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

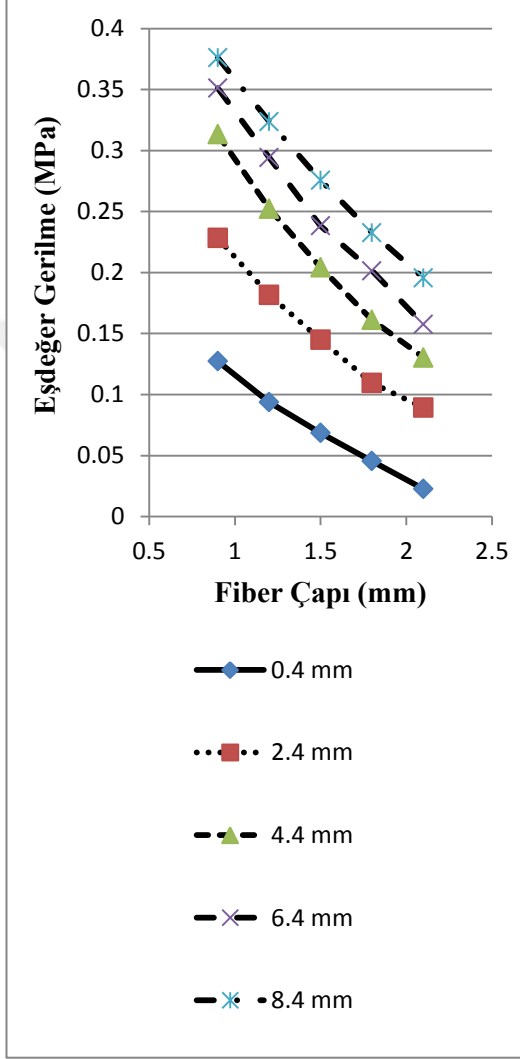


Şekil 4.61 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)

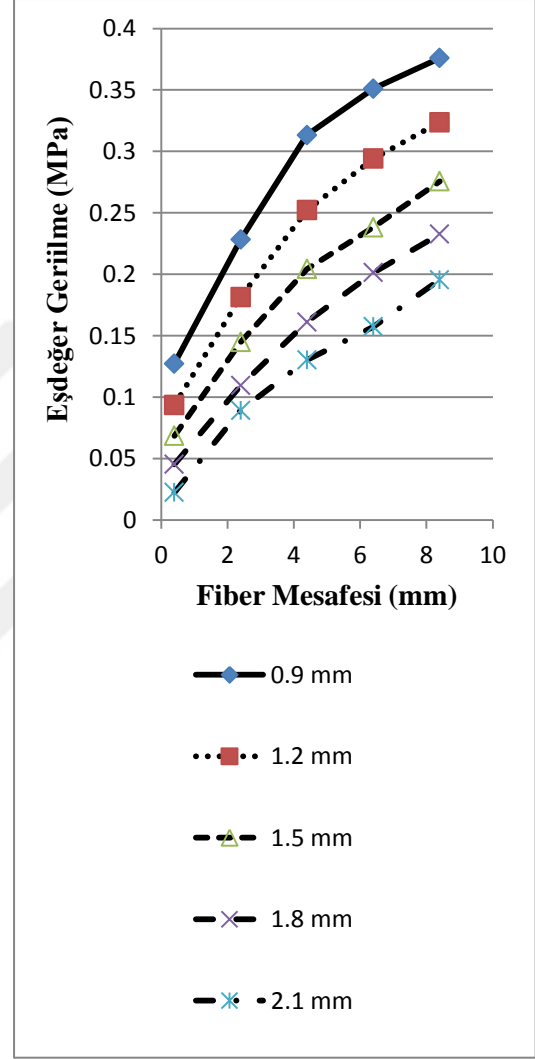


Şekil 4.62 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 0°- düzlem dışı)

Şekil 4.63’de fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilme değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.64’de ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmenin arttığı görülmektedir.

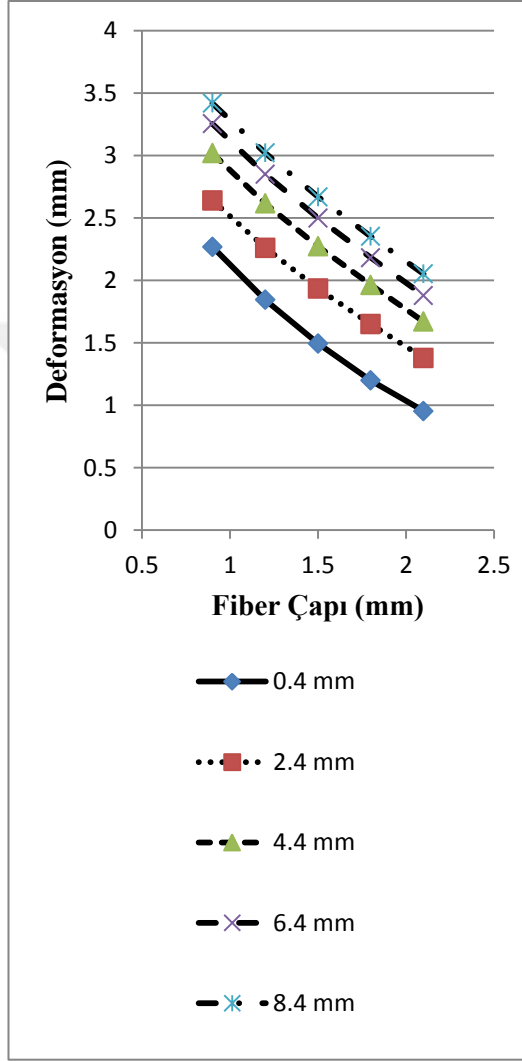


Şekil 4.63 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

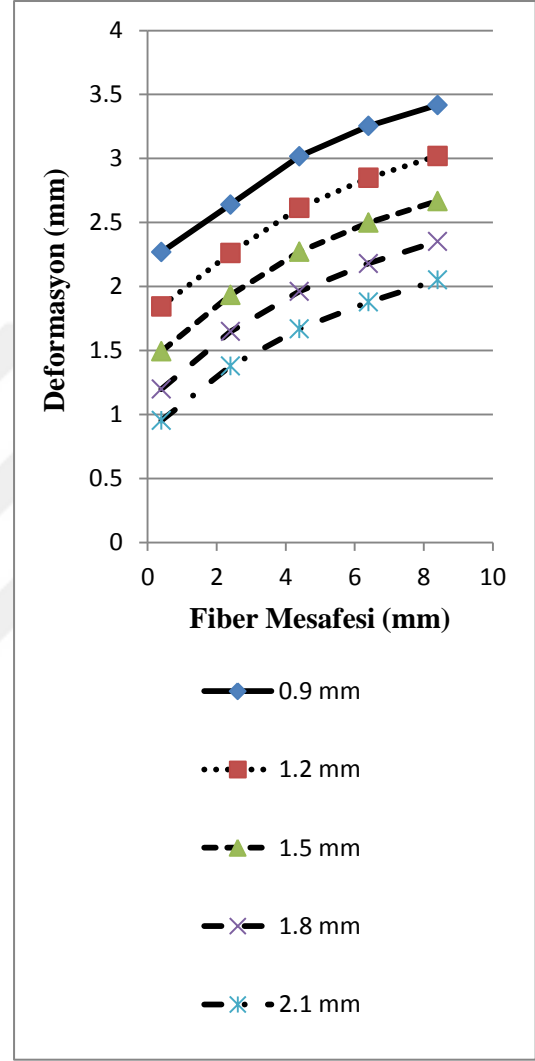


Şekil 4.64 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki eşdeğer gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.65’de fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.66’da ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.



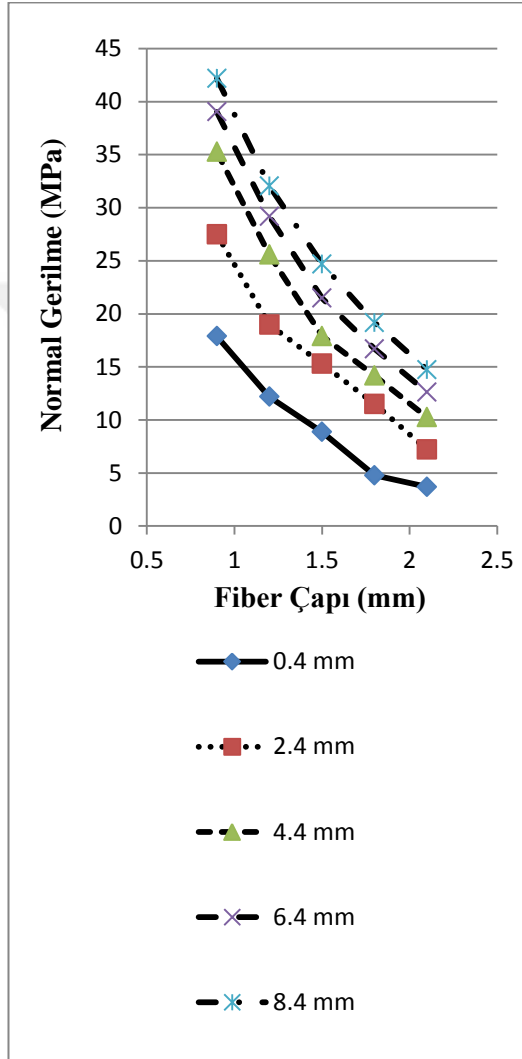
Şekil 4.65 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)



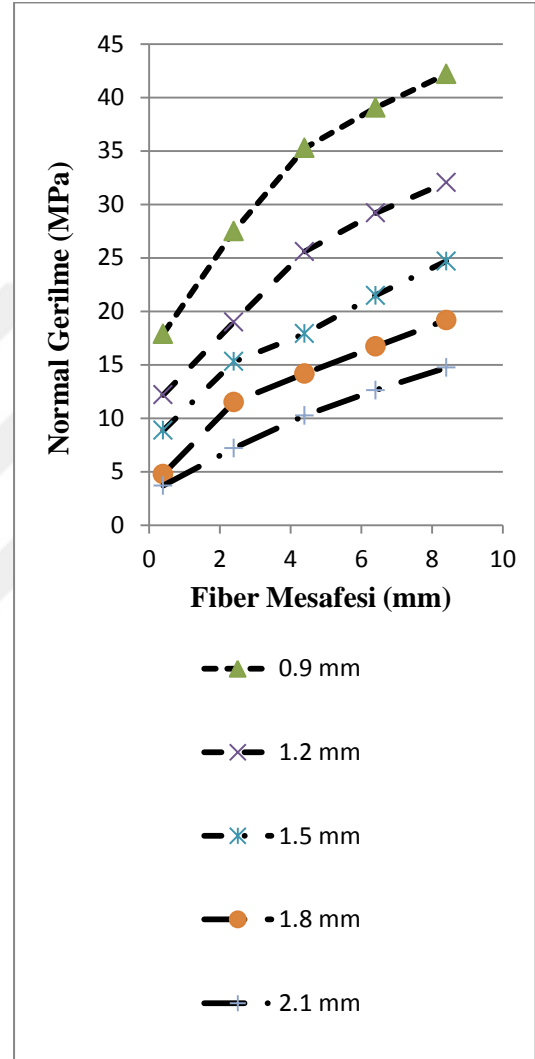
Şekil 4.66 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)



Şekil 4.67'deki modelde takviyelendirici olarak naylon 6 kullanılmış olup önceki modelden farklı olarak fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumundaki sonuçlar incelenmiştir. Şekil 4.67'de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.68'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

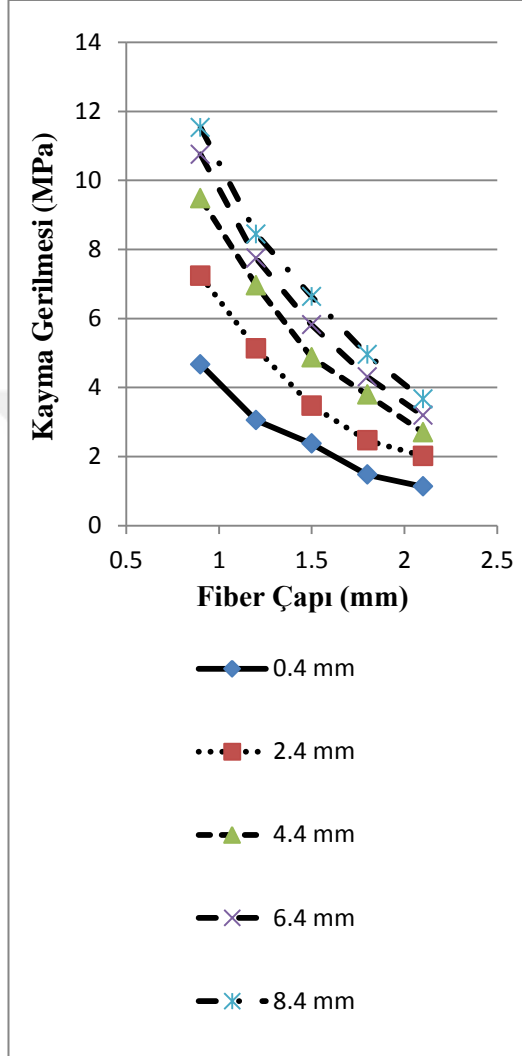


**Şekil 4.67** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

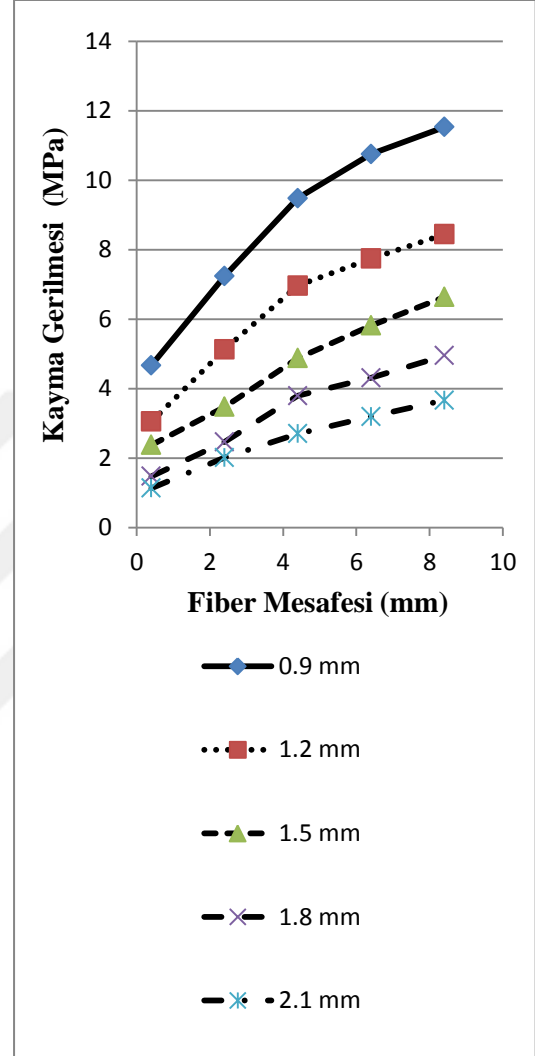


**Şekil 4.68** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.69'daki modelde fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.70'de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

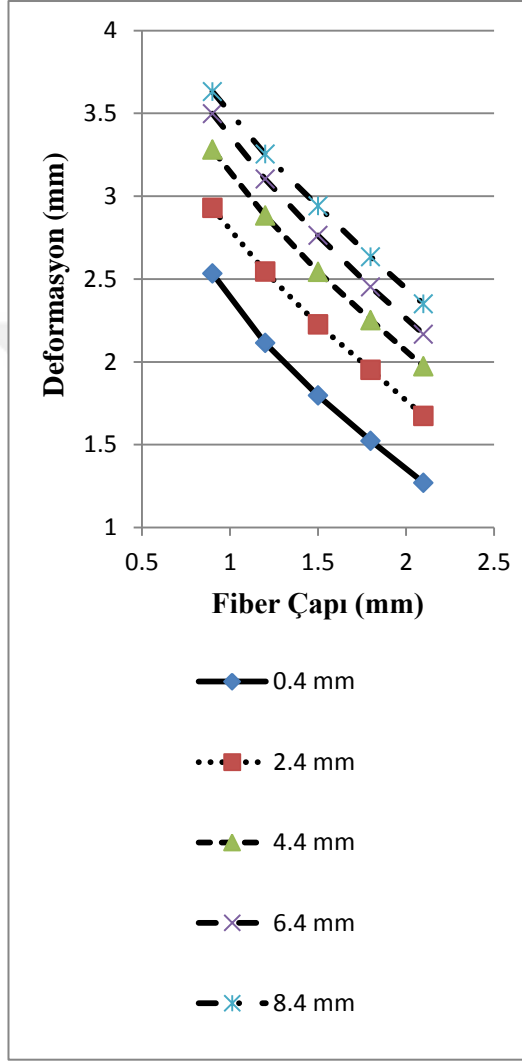


**Şekil 4.69** Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)

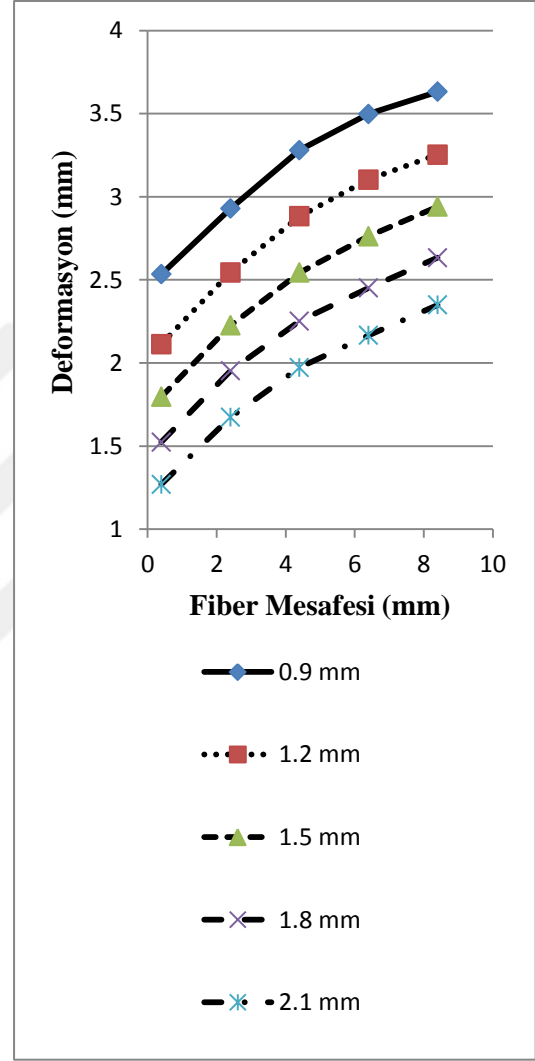


**Şekil 4.70** Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 30°- düzlem dışı)

Şekil 4.71’de fiberler arasındaki açının  $30^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.72’de ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.

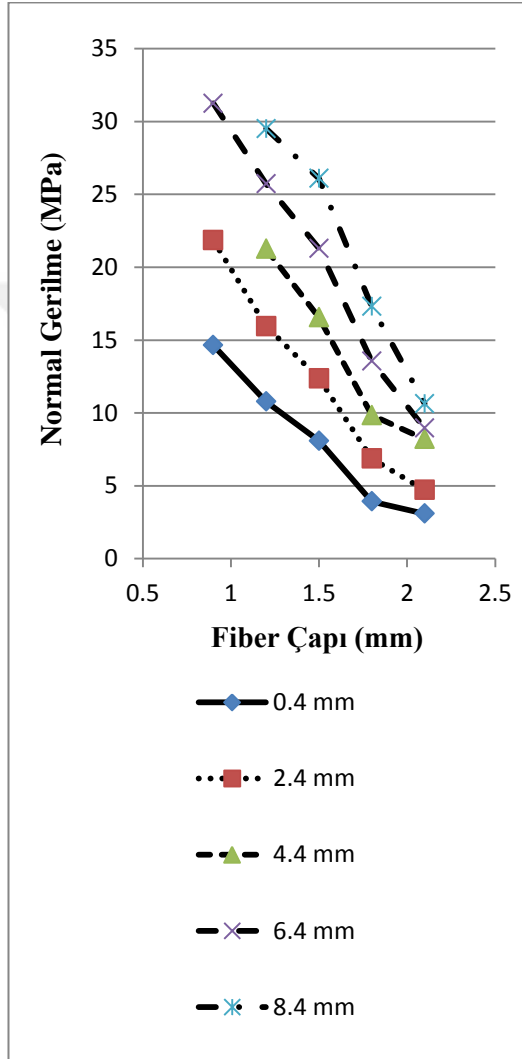


Şekil 4.71 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

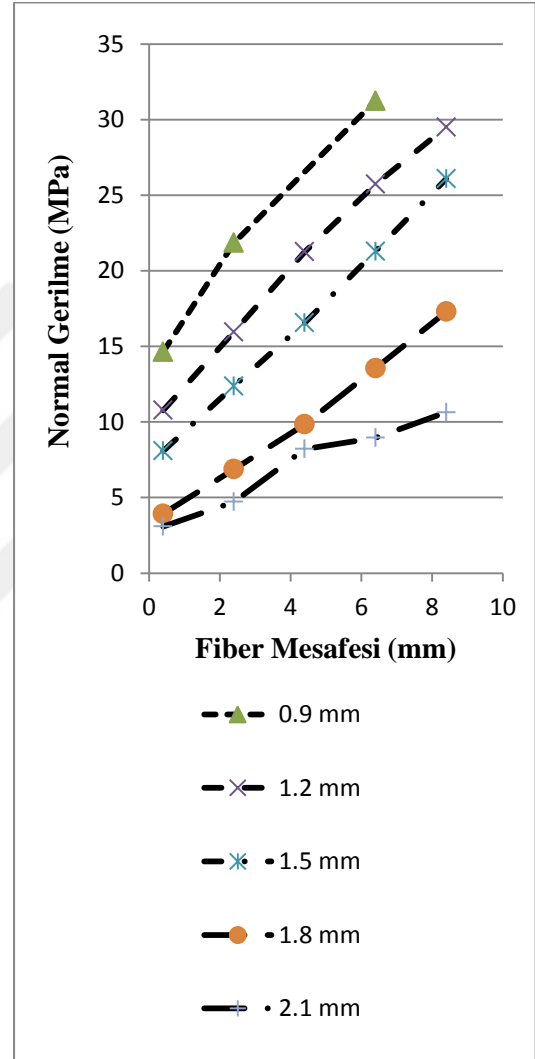


Şekil 4.72 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $30^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.73’de gösterilen sonuçlar, takviyelendirici olarak kullanılan naylon 6 fiberler arasındaki açının  $45^\circ$  olduğundaki durumu göstermektedir. Şekil 4.73’de fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.74’de ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki normal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

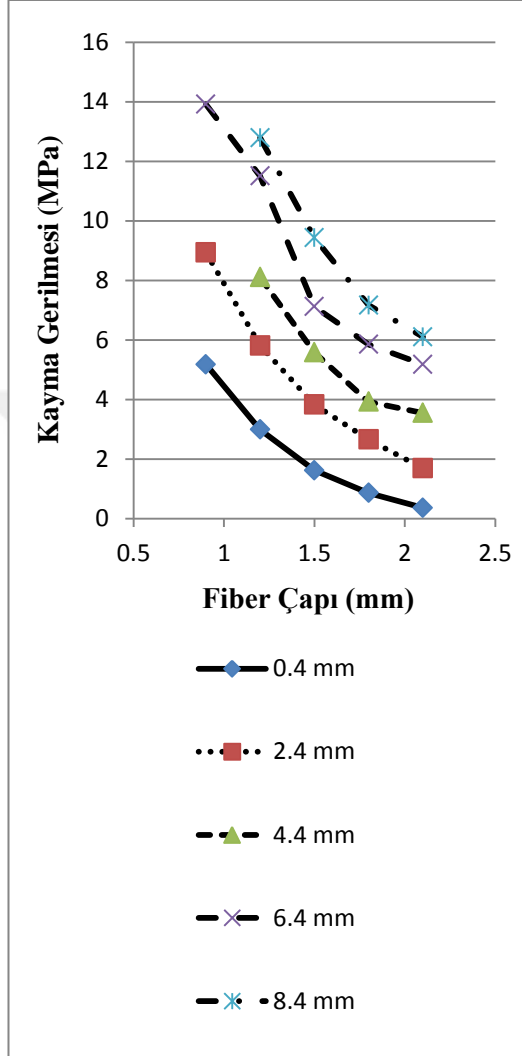


Şekil 4.73 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

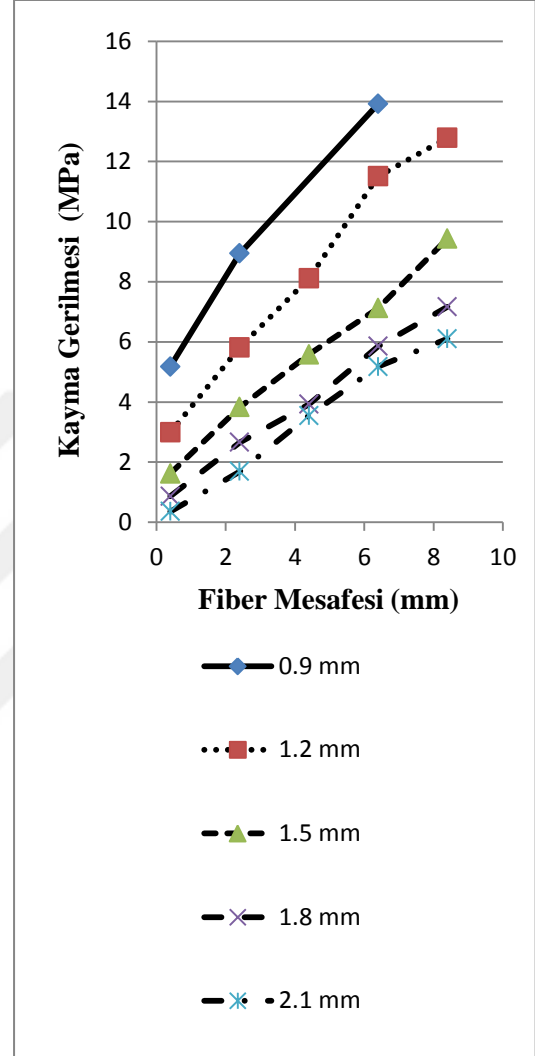


Şekil 4.74 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki normal gerilmeler (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

Şekil 4.75'deki modelde, fiber çapının artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.76'da ise fiber mesafesinin artması ile fiberler üzerindeki kayma gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

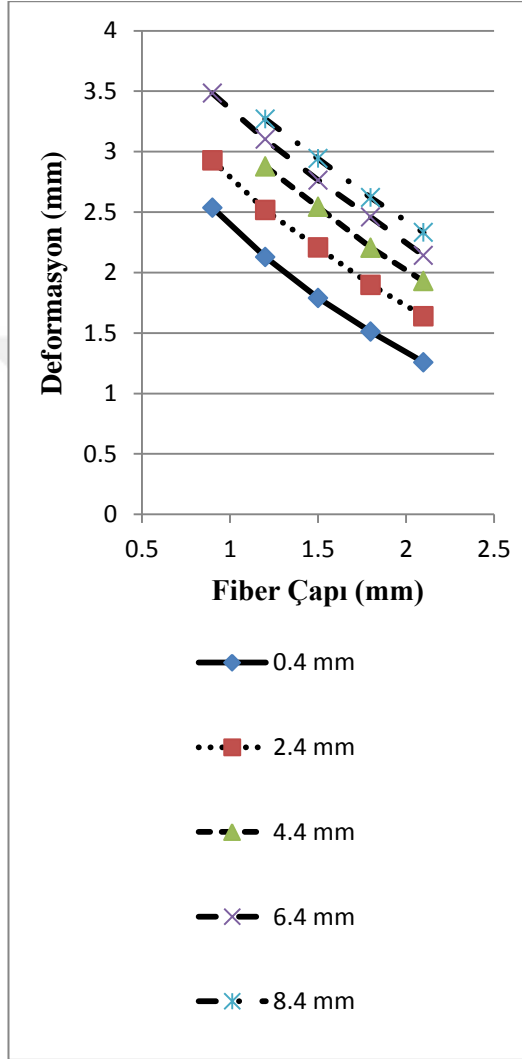


Şekil 4.75 Çeşitli fiber çapları için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)

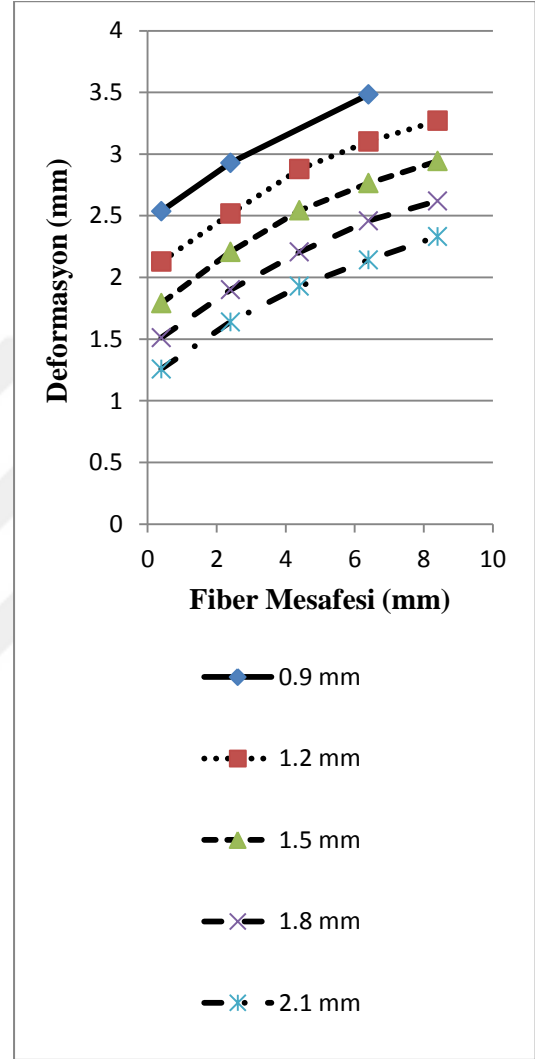


Şekil 4.76 Çeşitli fiber mesafeleri için fiberler üzerindeki kayma gerilmeleri (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası 45°- düzlem dışı)

Şekil 4.77’de fiberler arasındaki açının  $45^\circ$  olması durumunda, fiber çapının artmasına karşılık kauçuk üzerindeki deformasyon değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.78’de ise fiber mesafesinin artmasıyla kauçuk üzerindeki deformasyonun arttığı görülmektedir.



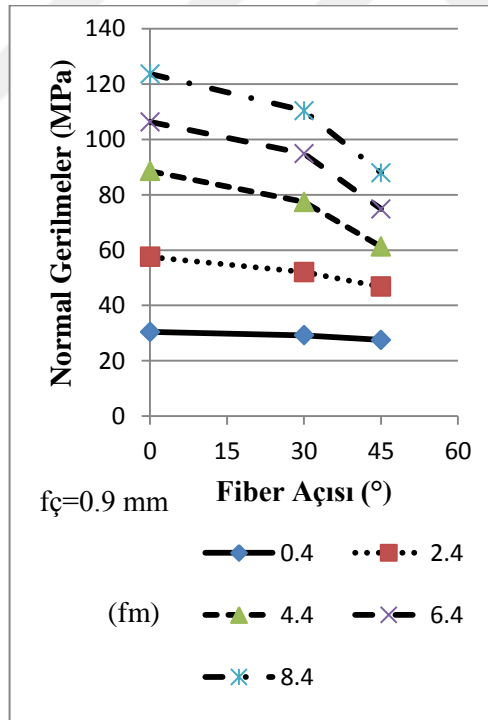
Şekil 4.77 Çeşitli fiber çapları için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)



Şekil 4.78 Çeşitli fiber mesafeleri için kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici naylon 6- fiberler arası  $45^\circ$ - düzlem dışı)

#### 4.2.2 Fiberler arasındaki açının değişim etkisinin incelenmesi

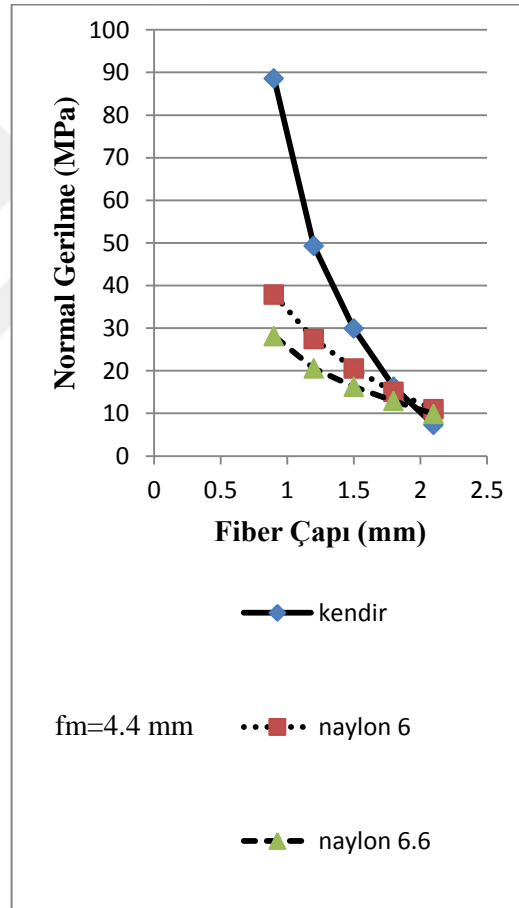
Bu bölümde, farklı fiber açlarına karşılık ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ), naylon 6.6 takviyelendiricisinin çeşitli fiber çapları ve fiber mesafeleri için, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 4.79'da, üç farklı açı değerine karşılık beş farklı model incelenmiş ve açı arttıkça, fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmüştür. Bu grafikteki diğer bir önemli sonuç, fiber mesafesinin artması ile birlikte açı da büyüdükçe, fiberler üzerine düşen gerilmelerin daha fazla azalmasıdır. Yani fiber mesafesinin azalmasıyla birlikte açının değişmesi, normal gerilmeleri daha az etkilemektedir. Takviyelendirici olarak kullanılan fiberler, boylamasına yük taşıdığından dolayı, ortaya çıkan bu sonuç normalde de beklenen bir durumdur. Çekme yükünde olduğu gibi düzlem dışı yükünde de, fiberler yükü boylamasına taşıdığı için, fiberler arasındaki açı  $0^\circ$  olduğunda, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler maksimum olur.



Şekil 4.79 Çeşitli çap ve mesafedeki fiberler için farklı açılara karşılık, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler

### 4.2.3 Fiber malzemesinin değişim etkisinin incelenmesi

Bu bölümde, 0° için farklı takviyelendiricilere karşılık (kendir, naylon 6.6, naylon 6), fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler incelenmiştir. Şekil 4.80’de, üç farklı takviyelendiriciye karşılık beş farklı model incelenmiş ve takviyelendirici değişiminin, fiberlerdeki normal gerilmeler üzerine olan etkisi görülmüştür. Şekil 4.80’i incelediğimizde, elastisite modülü yüksek olan takviyelendirici üzerindeki normal gerilmeler daha büyük olmaktadır. Aynı zamanda, elastisite modülü yüksek olan takviyelendiricinin çapının artmasıyla birlikte fiberler üzerindeki normal gerilmelerin azalmasının da doğru orantılı olduğu grafikten görülmektedir.

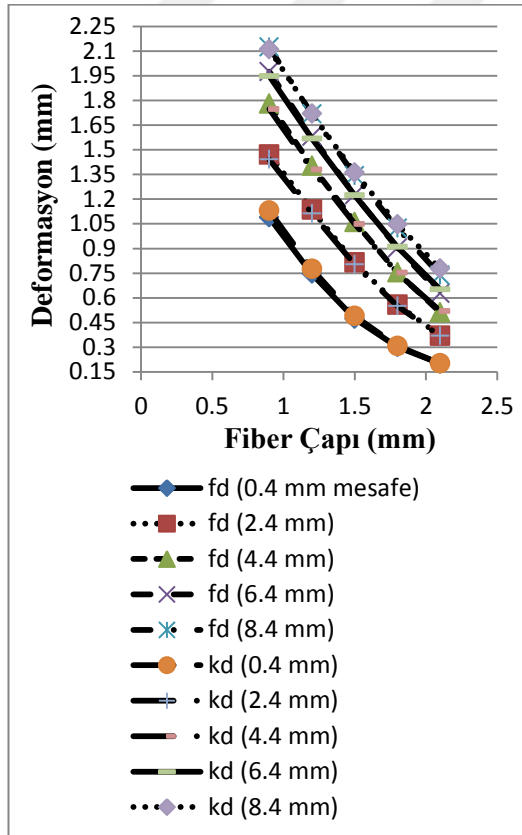


Şekil 4.80 Fiber malzemesinin değişimine karşılık, fiberler üzerinde oluşan normal gerilmeler

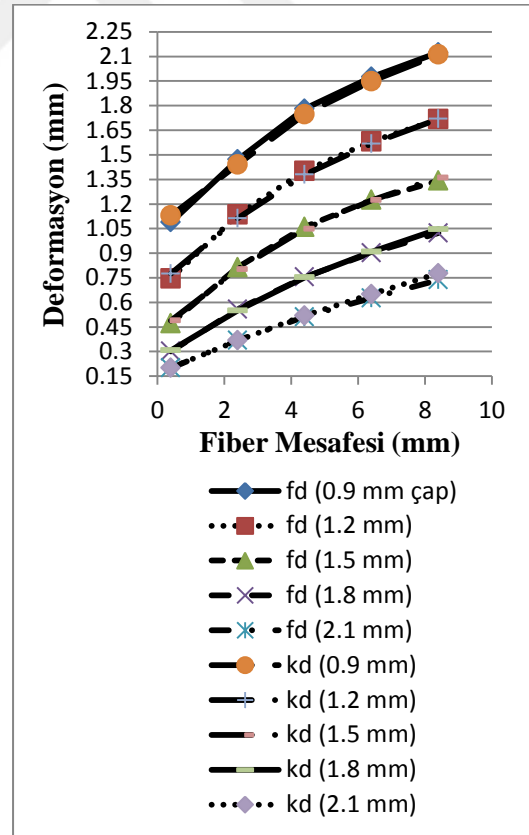


#### 4.2.4 Fiber çapı ve fiber mesafesi değişiminin, fiber ve kauçuk deformasyonuna olan etkisinin incelenmesi

Bu bölümde,  $0^\circ$  için beş farklı fiber çapı ve beş farklı fiber mesafesine karşılık fiber ve kauçuk üzerinde oluşan deformasyonlar incelenmiştir. Aşağıdaki grafiklerde genel olarak, fiber çapı arttıkça hem fiber hem de kauçuk üzerinde meydana gelen deformasyonlar azalmakta, fiber mesafesinin artması ile birlikte hem fiber hem de kauçuk üzerinde meydana gelen deformasyonlar artmaktadır. Grafikleri daha ayrıntılı ele alacak olursak, hem fiber çapları ve hem de fiber mesafeleri arttıkça fiberler üzerinde meydana gelen deformasyonların, kauçuk üzerinde meydana gelen deformasyonlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durumda, takviyelendirici çapının artması ile birlikte fiberler üzerine düşen normal gerilme azalmakta ve fiber kauçuğa kıyasla daha az deforme olmaktadır. Fiber mesafelerinin artması durumunda ise, fiber başına düşen kauçuk alanının artmasıyla birlikte fiberler üzerine düşen normal gerilme artmakta ve fiber kauçuğa kıyasla daha az deforme olmaktadır.



Şekil 4.81 Çeşitli fiber çapları için fiber ve kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)



Şekil 4.82 Çeşitli fiber mesafeleri için fiber ve kauçuk üzerindeki deformasyonlar (takviyelendirici kendir- fiberler arası  $0^\circ$ - düzlem dışı)

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuç

Bu çalışma kapsamında, otomotiv endüstrisinde kullanılan fiber takviyeli kauçuk kompozitlerin, farklı yükler altında mekanik davranışlarını inceleyebilmek amacıyla, öncelikle deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan sonra, numunelerin SolidWorks programı ile iki katmanlı üç boyutlu katı modelleri oluşturulmuş ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Workbench programı ile de analizleri tamamlanmıştır. Sonlu elemanlar çözümlerinin doğrulaması, deneysel sonuçlarla kıyaslanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Sabit deplasman yükü altında, fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çaplarının ve fiber mesafelerinin büyümesi, normal gerilmeleri değiştirmemektedir. Sabit deplasman yükü altında, fiberler arasındaki açı artarak  $30^\circ$  olduğunda, fiber çapları arttığında, fiberler üzerindeki hem kayma hem de normal gerilmeler azalmaktadır. Aynı açı değerinde, fiberler arası mesafe arttığında, fiberler üzerindeki hem normal hem de kayma gerilmeleri artmaktadır. Sabit deplasman yükü altında, fiberler arasındaki açı  $45^\circ$  olduğu durumda, fiber çaplarının artması ile normal ve kayma gerilmeleri azalmakta olup, fiber mesafeleri arttıkça normal ve kayma gerilmeleri artmaktadır.

3 bar'lık düzlem dışı yükü altında, dört kenarından tutulan takviyeli kauçuk kompozitte, fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapları büyüdükçe fiberler üzerine düşen normal gerilmeler azalmaktadır. Aynı açı değeri için fiber mesafeleri büyüdükçe fiberler üzerine düşen gerilmeler artmaktadır. Fiberler arası açı değeri artarak  $30^\circ$  olduğunda, fiber çapları büyüdükçe fiberler üzerine düşen normal ve kayma gerilmeleri azalmakta olup, fiberler arası mesafe arttığı zaman ise normal ve kayma gerilmeleri artmaktadır. Düzlem dışı yükleme altında fiberler arasındaki açı  $45^\circ$  olduğumda, fiber çapları büyüdükçe normal ve kayma gerilmeleri azalmaktayken, fiber mesafeleri büyüdükçe normal ve kayma gerilmeleri artmaktadır.

Düzlem dışı yüklemde uygulanan 3 bar'lık basınç altında, fiber takviyeli kauçuk kompozitte, fiberler arasındaki açının  $0^\circ$  olması durumunda, fiber çapları büyüdükçe oluşan deformasyonlar azalmaktadır. Fiber çapları büyüdüğünde fiberler daha fazla yük taşıyacağı için, ortaya çıkan bu sonuç normalde de beklenen bir durumdur. 3 bar'lık basınç altında düzlem dışı yüklemde, fiberler arasındaki mesafenin artması durumunda ise oluşan deformasyonlar artmaktadır. Çünkü nihai durumda asıl yükü taşıyanlar fiberler olduğundan dolayı, fiberlerin aralığı arttıkça fiber başına düşen kauçuk alanı artmakta ve dolayısıyla oluşan deformasyonlar da daha büyük olmaktadır.

Her iki yükleme altında da fiberler arası açı arttıkça, fiberler üzerine düşen normal gerilmeler azalmaktadır. Hem çekme yükü hem de düzlem dışı yükü durumlarını ayrı ayrı inceleyecek olursak, fiberler arası açının artması durumunda, çekme yükü için fiber mesafeleri azaldıkça fiberler üzerindeki normal gerilmelerin daha fazla azaldığı, düzlem dışı yükü için ise fiber mesafeleri arttıkça fiberler üzerindeki normal gerilmelerin daha fazla azaldığı görülmüştür.

Her iki yükleme ayrı ayrı ele alındığında, fiberler arası açının  $0^\circ$  olduğu durumlardaki normal gerilmeleri incelediğimizde, çekme yükü altında fiber çapı ve fiber mesafesine bağlı olarak normal gerilmelerde bir değişim meydana gelmezken, düzlem dışı yükü altında fiber çapı arttıkça fiberler üzerine düşen normal gerilmeler, takviyelendiricinin elastisite modülü mertebesinde azalmaktadır.

Düzlem dışı yükünde, fiber çapı ve fiber mesafesinin değişimine karşılık fiber ve kauçukta meydana gelen deformasyonları incelediğimizde, genel olarak fiber çapının artması ile kauçuk ve fiberlerde meydana gelen deformasyonlar azalmakta iken, fiber mesafelerinin artması ile kauçuk ve fiberlerde meydana gelen deformasyonlar artmaktadır. Hem fiber çapları ve hem de fiber mesafelerinin artmasıyla birlikte fiberler üzerinde meydana gelen deformasyonların, kauçuk üzerinde meydana gelen deformasyonlara göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Fiber takviyeli kauçuk kompozitler ile, takviyelendirilmemiş yani sadece vulkanizasyon işlemine tabi tutulmuş kauçukların karşılaştırılması ayrıca yapılmıştır. Kauçuk, hiper-elastik bir malzeme olduğundan dolayı uzayıp doğrusal olmayan bir

davranış göstermeye çalışmış ve fazla bir yük taşımadığı görülmüştür. Fiberler ise doğrusal elastik bir davranış göstermekte ve kauçuğa oranla boyca daha az uzadığı için, aslında öncelikle kopma olayı fiberlerde meydana gelmektedir. Dolayısıyla asıl yükü taşıyan fiberler koptuğu zaman, bütün yük birdenbire kauçuğa geçmekte ve hasar gerçekleşmektedir. Bunların yanı sıra fiberlerin çok küçük çaplarda olmasının da sakıncaları bulunmaktadır. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, fiber çapları çok küçük olduğunda, yük altında fiberler ile kauçuğun yapışabilirlik durumları sıkıntıya girebilmekte, kauçuk büyük ölçüde çarpılmalara maruz kalmakta ve dolayısıyla gerçekleştirilen analizler hata vermektedir.

## 5.2 Öneriler ve İleride Yapılabilecek Çalışmalar

Fiber takviyeli kauçuk kompozitler ile ilgili ileride yapılabilecek belli başlı düşünülen çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

1. Bu tez çalışmasındaki metodolojiyle farklı açılar için analizler gerçekleştirilebilir.
2. Analiz yapılması düşünülen fiber takviyeli kauçuklar, fiber tabakası 3 veya daha fazla katman olarak hazırlanıp, bu kompozitlerin analizleri yapılabilir.
3. Fiber malzemesi olarak farklı takviyelendiriciler (polietilen, polipropilen vb.) ile analizler gerçekleştirilebilir.
4. Fiber takviyeli kauçukların düzlem dışı gerilme durumları için, uygulanan basınç değiştirilerek farklı değerdeki yüklemelerin etkisi araştırılabilir.
5. Kauçuk kompozit içerisinde rastgele dağılmış takviyelendirme elemanlarının mekanik özellikleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenebilir.
6. Fiber takviyeli kauçukların aksenal çekme deneyleri gerçekleştirilip, daha sonra bu durum sonlu elemanlar yöntemiyle, farklı miktarda eleman sayısı kullanılarak, mesh yapısının çözüme yakınsama etkisi araştırılabilir.
7. Yapılan bu çalışmadaki modellerin, deneysel olarak testlerinin yapılması ile oluşan hasar mekanizmaları incelenebilir.
8. Daha karmaşık bir model olan havalı körüklerin katı modeli hazırlanarak sonlu eleman analizleri, deneysel çalışmalar ile karşılaştırılabilir.
9. Fiber takviyeli kauçuk tampon tasarlanarak fiber çapı, sıklığı, açısı ve takviyelendirici türü değiştirilerek etkileri araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Tudu P., *Processing and Characterization of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites*, Bachelor's Degree, National Institute of Technology-Mechanical Engineering, Rourkela, 2009.
- [2] Özsoy N., *Polimer Esaslı Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2015.
- [3] *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, Mohd S.S., Mohammad J., Nukman B.S., M. Enamul H. (Editors), Springer, London, 2015.
- [4] Hughes J.M., *On the Mechanical Properties of Bast Fibre Reinforced Thermosetting Polymer Matrix Composites*, Doctoral Dissertation, University of Wales-School of Agricultural and Forest Sciences, Bangor-Gwynedd, 2000.
- [5] Abadi, M.H., Mechanical Behavior of Continuous Fiber-Reinforced Elastomeric Materials at Finite Strain, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **2012**, 19, 360.
- [6] Bai W., *New Application of Crystalline Cellulose in Rubber Composites*, Doctoral Dissertation, Oregon State University-Wood Science and Chemical Engineering, USA, 2009.
- [7] Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press, 2002.
- [8] Balasubramanian M., *Composite Materials and Processing*, CRC Press, 2013.
- [9] Dattoo M.H., *Mechanics of Fibrous Composites*, Elsevier, London, 1991.
- [10] Kaw A.K., *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, Taylor & Francis, 2006.
- [11] Mallick P.K., *Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design*, Third Edition, CRC Press, Michigan, 2007.
- [12] Strong A.B., *Fundamentals Composites Manufacturing Materials, Methods, and Applications*, Second Edition, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 2008.
- [13] Matthews F.L. and Rawlings R.D., *Composite Materials: Engineering and Science*, CRC Press, Cambridge, 1994.
- [14] Moraleda J., Segurado J., Llorca J., Finite Deformation of Incompressible Fiber-Reinforced Elastomers: A Computational Micromechanics Approach, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **2009**, 57, 1596.

- [15] Lopez-Pamies O., Castaneda P.P., On The Overall Behavior, Microstructure Evolution, and Macroscopic Stability in Reinforced Rubbers at Large Deformations: I—Theory, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **2006**, 54, 807.
- [16] Hendrickson,  
<https://www.hendrickson-intl.com/PartsAndService/Truck/Air-Springs>, Ocak 2017.
- [17] Iveco EuroCargo ML160E25,  
<https://i.ytimg.com/vi/ggYHkamgYbk/maxresdefault.jpg>, Ocak 2017.
- [18] Goodyear Eagle F1 GS-D3  
<https://www.goodyear.com/en-US/tires/eagle-f1-gs-d3?cta=BBCardTireName>,  
Mayıs 2017
- [19] Megep, Kimya Teknolojisi, Doğal Kauçuk Özellikleri ve Testleri, Ankara, 2011.
- [20] Treloar L.R.G., *The Physics of Rubber Elasticity*, Third Edition, Clarendon Press, Oxford, 1975.
- [21] *The Science and Technology of Rubber*, Mark J.E., Erman B. and Roland C.M. (Editors), Fourth Edition, Academic Press-Elsevier, 2013.
- [22] *Rubber Technology*, Maurice Morton (Editor), Third Edition, Van Nostrand Reinhold Company, 1999.
- [23] Colourbox,  
<https://www.colourbox.com/image/milky-latex-extracted-from-rubber-tree-hevea-brasiliensis-as-a-source-of-natural-rubber-image-5770046>, Mayıs 2017.
- [24] Ciesielski A, *An Introduction to Rubber Technology*, Rapra Technology Limited, Shropshire, 1999.
- [25] Yang X., *Finite Element Analysis and Experimental Investigation of Tyre Characteristics for Developing Strain-based Intelligent Tyre System*, Doctoral Dissertation, The University of Birmingham-School of Mechanical Engineering College of Engineering and Physical Sciences, Birmingham, 2011.
- [26] *Materials Science of Polymers Plastics, Rubber, Blends, and Composites*, Haghi A.K., Castro E.A., Thomas S., Sivakumar P.M. and Mercader A.G. (Editors), Apple Academic Press-CRC Press, 2015.
- [27] MEB, Kimya Teknolojisi, Sentetik Kauçuk Özellikleri ve Testleri 524KI0245, Ankara, 2011.
- [28] Thefreelibrary,  
<https://www.thefreelibrary.com/Vulcanization+of+elastomers.-a014459623>, Mayıs 2017.
- [29] *Natural Rubber Materials Volume 2: Composites and Nanocomposites*, Sabu T., Hanna J.M., Jithin J., Chin H.C. and Laly A.P. (Editors), RSC Publishing, 2014.

- [30] Rapra Review Reports-Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers, Bledzki A.K., Sperber V.E. and Faruk O., 13, Rapra Technology Limited, 2002.
- [31] Li Z., Xiao T., Zhao S., Effects of Surface Treatments on Mechanical Properties of Continuous Basalt Fibre Cords and Their Adhesion with Rubber Matrix, *Fibers and Polymers*, **2016**, 17 (6), 910.
- [32] Herrera-Franco P.J., Valadez-Gonzalez A., Mechanical Properties of Continuous Natural Fibre-reinforced Polymer Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **2004**, 35, 339.
- [33] Wongsriraksa P., Togashi K., Nakai A., Hamada H., Continuous Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Composites by Fiber Surface Modification, *Advances in Mechanical Engineering*, **2013**.
- [34] Lahellec N., Mazerolle F., Michel J.C., Second-order Estimate of the Macroscopic Behavior of Periodic Hyperelastic Composites: Theory and Experimental Validation, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **2004**, 52, 27.
- [35] Oman S., Fajdiga M., Nagode M., Estimation of Air-spring Life Based on Accelerated Experiments, *Materials and Design*, **2010**, 31, 3859.
- [36] Oman S., Nagode M., On the Influence of the Cord Angle on Air-spring Fatigue Life, *Engineering Failure Analysis*, **2013**, 27, 61.
- [37] Tsai P.A., Wu J.H., Influence of Tire-cord Layers and Arrangement Direction on the Physical Properties of Polyester Tire Cord Reinforced with Chloroprene Rubber Composite Materials, *Science and Engineering of Composite Materials*, **2014**.
- [38] Mankovits T., Szabo T., Finite Element Analysis of Rubber Bumper Used in Air-springs, *Procedia Engineering*, **2012**, 48, 388.
- [39] Wei-min Y., Can-hui C., Ya-ling C., Yan-sha R., Finite Element Analysis of an Air Spring for Automobile Suspension, *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, **2004**, 31 (3), 105.
- [40] Lee H.W., Kim S.H., Huh H., Kim J.Y., Jeong S.G., Finite Element Analysis of Diaphragm-type Air Springs with Fiber-reinforced Rubber Composites, *Journal of Composite Materials*, **2003**, 37 (14), 1261.
- [41] Kim B.S., Moon B.Y., Optimum Performance Evaluation of Reinforced Spring Suspension System using Nonlinear Analysis Method.
- [42] Hölscher H., Tewes M., Botkin N., Löhndorf M., Hoffmann K.H., Quandt E., Modeling of Pneumatic Tires by a Finite Element Model for the Development a Tire Friction Remote Sensor, Preprint submitted to *Computers and Structures*, **2004**.

- [43] Tran H.N., Tran I.T., Large Deformation Analysis of Inflated Air-spring Shell Made of Rubber-textile Cord Composite, *Structural Engineering and Mechanics*, **2006**, 24 (1), 31.
- [44] Lee S.J., Development and Analysis of an Air Spring Model, *International Journal of Automotive Technology*, **2010**, 11 (4), 471.
- [45] Pidaparti R.M.V., Yang H.T.Y., Soedel W., Modeling and Fracture Prediction of Single Ply Cord-Rubber Composites, **1992**, *Journal of Composite Materials*, 26 (2), 152.
- [46] Nam T.H., Marvalova B., Large Deformation Analysis of Inflated Air-spring Shell by the Finite Element Method.
- [47] Pidaparti R.M.V., May A.W., A Micromechanical Analysis to Predict the Cord-rubber Composite Properties, **1996**, 34, 361.
- [48] Rao S., Daniel I.M., Mcfarlane D., Fatigue and Fracture Behavior of a Steel Cord/Rubber Composite, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **2001**, 14, 213.
- [49] Zhang F., Wan Z., Du X., Mechanical Properties of Nylon 6 Cord–Rubber Composite Subjected to Biaxial Tensile Loads, *Journal of Elastomers and Plastics*, **2002**, 34, 265.
- [50] Rao S., Daniel I.M., Gdoutos E.E., Mechanical Properties and Failure Behavior of Cord/Rubber Composites, *Applied Composite Materials*, 2004, 11, 353.
- [51] Hassis H., Arem S.E., Pidaparti R.M., Modeling Coupling Effects In Cord-rubber Composite Structures, **2007**, 1 (3), 217.
- [52] Brun M., Lopez-Pamies O., Castaneda P.P., Homogenization Estimates for Fiber-reinforced Elastomers with Periodic Microstructures, *International Journal of Solids and Structures*, **2007**, 44, 5953.
- [53] Agoras M., Lopez-Pamies O., Castaneda P.P., A General Hyperelastic Model for Incompressible Fiber-reinforced Elastomers, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **2009**, 57, 268.
- [54] Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoop N., Trada M., A Review on the Tensile Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites, *Composites: Part B*, **2011**, 42, 856.
- [55] Topçu M. ve Taşgetiren S., Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu, Yayın no: 007, Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli, 1998.
- [56] MMO,  
<http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10944.pdf>, Haziran 2017.



- [57] İbrahim Çayıroğlu kişisel web sitesi,  
<http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/BilgisayarDestekliTasarim/BilgisayarDestekliTasarimVeAnaliz-1-hafta.pdf>, Haziran 2017.
- [58] Hyer M.W., Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials, Updated Edition, DEStech Publications, 2009.
- [59] Ramakrishnan S., Krishnamurthy K., Prasath M.M., Kumar R.S., Dharmaraj M., Gowthaman K., Kumar P.S., Rajasekar R., Theoretical Prediction on the Mechanical Behavior of Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester Composites, *Applied Science and Advanced Materials International*, **2015**, 1 (3), 85.
- [60] Hughes M., Carpenter J., Hill C., Deformation and Fracture Behaviour of Flax Fibre Reinforced Thermosetting Polymer Matrix Composites, *Journal of Materyal Science*, **2007**, 42, 2499.
- [61] Chiu F.C., Fu S.W., Chuang W.T., Sheu H.S., Fabrication and Characterization of Polyamide 6,6/organo-montmorillonite Nanocomposites with and Without a Maleated Polyolefin Elastomer as a Toughener, *Polymer*, **2008**, 49,1015.
- [62] Professional Plastics,  
<http://www.professionalplastics.com/professionalplastics/MechanicalPropertiesofPlastics.pdf>, Nisan 2017.
- [63] Özen E., Kızıltaş A., Kızıltaş E.E., Gardner D.J., Natural Fiber Blend—Nylon 6 Composites, *Polymer Composites*, **2013**, 544.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı SOYADI** : Ali Osman GÜNEY  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 15/09/1988, İstanbul  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : ali.guney@btu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU

<b>Derece</b>	<b>Alan</b>	<b>Üniversite Adı</b>	<b>Mezuniyet Yılı</b>
Lisans	Makine Mühendisliği	Bülent Ecevit Üniversitesi	2014

### İŞ TECRÜBESİ

<b>Yıl</b>	<b>Firma/Kurum</b>	<b>Görevi</b>
2016 -	Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

### BİLİMSEL ÇALIŞMALARI

#### ▪ **Bildiriler**

1. **Güney A.O.**, Kanber B., *Assessment of Material Type, Diameter, Orientation and Closeness of Fibers in Vulcanized Reinforced Rubbers*, ICSM 2017 : 19th International Conference on Solid Mechanics, London, 2017.
2. Kanber B., **Güney A.O.**, *Takviyelendirilmiş Kauçuklarda Rastgele Dağılmış Takviyelerin Mekanik Davranışa Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması*, 20. Ulusal Mekanik Kongresi, Bursa, 2017.

#### ▪ **Projede görev alma**

1. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Fiber Takviyeli Kauçuk Kompozitlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Üç Boyutlu Analizi (Araştırmacı), BAP, 2017.