

**TIRMANAN ROBOTLAR İÇİN FİBER MODELLEMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**FIBER MODELLING AND CHARACTERISATION FOR
CLIMBING ROBOTS**

ERGÜL İLASLAN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

MAKİNE Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2013

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Yrd. Doç. Dr. Benat Koçkar

Üye (Danışman) :
Dr. Özgür Ünver

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Cihan Tekoğlu

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../..... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Fatma SEVİN DÜZ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

TIRMANAN ROBOTLAR İÇİN FİBER MODELLEMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Ergül İlaslan

ÖZ

Tırmanan robotlara olan ihtiyaç birçok problem tarafından tetiklenmektedir. Tırmanma ve dik yüzeylerde çalışma gibi yüksek risk taşıyan görevlerin insanlar tarafından yapılması insan hayatını tehlikeye attığı gibi yüksek maliyetler de gerektirmektedir. Örneğin tırmanılacak yüzey üzerinde kurulacak iskele vb. yapılar kurulması hem ek masraflara sebep olmakta hem de zaman kaybına yol açmaktadır. Bu nedenlerle tırmanan robotlar kendilerine verilen görevleri çok daha düşük maliyetlerle, çok daha kısa zamanda, iskele vb. yapılar kurulmasına gerek kalmadan yerine getirebilirler.

Mühendislerin tüm çabalarına rağmen henüz doğadaki boyutta, hiyerarşik yapıda ve yapışma kuvvetinde olabilen sentetik fiberler üretilmemiştir. Ancak fiber üretimi konusunda önemli adımlar atılmıştır. Tırmanan robotlarda fiber şeklinde yapıların kullanılma sebebi; yüzey pürüzlülüğüne daha iyi uyum sağlayıp, bireysel yapışkanlığı arttırmak ve fiberlerde oluşan kir biriktirme/tozlanmayı en düşük seviyeye indirmektedir.

Bu tezde; tırmanan robotlarda kullanılacak olan fiberlerden azami yapışma kuvveti elde edilebilmesi için fiber çapını, boyunu, fiberler arası uzaklığı modelleyerek nümerik olarak optimize edilmesi, fiber malzemesinin seçilmesi, fiberlerin diziliş konfigürasyonunun modellenmesi, modellere göre üretilmiş fiberlerin karakterizasyonu için deney düzeneği kurulması, modele göre optimize edilmiş fiberlerin basınca bağlı yapışkanlıklarını testlerinin gerçekleştirilmesi ve modellerdeki değerlerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Fiberlerin yüzey alanını arttırmak amacıyla tırmanan robotlarda kullanılacak sünger tekerleğin modellemeleri ve testleri yapılmıştır. Ek olarak, rijit bir tekerlekten elde edilecek adezyon kuvvetini hesaplamak için rijit teker adezyon modeli tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tırmanan robot, fiber modelleme, adezyon, yapışma.

Danışman: Dr. Özgür ÜNVER, Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

FIBER MODELLING AND CHARACTERISATION FOR CLIMBING ROBOTS

Ergül İlaslan

ABSTRACT

The necessity to climbing robots is triggered by many problems. High risk involved works which are carried out by humans require high cost and risk of human's life. For example building climbing stages and similar structures require high cost and cause loss of time. For these reasons, climbing robots carry out these tasks assigned to them with a lower cost in less time without building any stages.

Although engineer's strong efforts, fibers haven't been produced with the same adhesion force and the hierarchical structures as in the nature but important steps have been taken about fabrication of fibers. The reasons of using fibers for climbing robots are; increasing individual adhesion force with the help of adapting to rough surfaces and minimizing the dirt collection of fibers.

In this thesis; subjects such as fiber length, fiber diameter and distance between fibers are optimized with numerical modelling, fiber material is defined and fibers arrangement configuration is optimized. Test setup has been made for testing the adhesion performance of fibers. Fiber's adhesion tests are performed regarding to the preload and results are compared with the models. Modelling and tests are made for foam wheels which can be used to increase fiber contact area on the robot wheels. In addition, adhesion model for a rigid wheel is designed to find out the acquired adhesion force from a rigid wheel.

Key Words: Climbing robot, fiber modelling, adhesion, adherence.

Advisor: Dr. Özgür ÜNVER, Hacettepe University, Department of Mechanical Engineering

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime ilk başladığım andan itibaren özveriyle bilgisini, sabrını ve insani ilgisini esirgemeyen tez danışmanım Dr. Özgür Ünver'e, yeni çıkacağım bu yolda sonsuz desteği için teşekkürler.

Ayrıca, başta Sayın Dr. Bilsay Sümer ve Dr. Çağlar Başlamışlı olmak üzere, yüksek lisans eğitimim süresince üzerimde emeği geçen Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ndeki bütün akademisyenlere teşekkür ederim. Aynı zamanda, tez komitesinde jüri üyeliğinde bulunan Sayın Dr. Cihan Tekoğlu'na tezime gösterdiği ilgi için çok teşekkür ederim. Yüksek lisansım süresince çalıştığım Hacettepe Makine Mühendisliği bölümündeki Senstech Laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarım olan Ahmet, Kıvanç, Merih, Cüneyt, Morteza, Behrang, Ömer, Saner, Zeynep, Çağrı, Sezgin, Kaan ve Ali Emre'ye göstermiş oldukları yardımları ve dostlukları için çok teşekkür ederim. Hayatımda her zaman yanımda olan ve benden maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen anneme çok teşekkür ederim. Yüksek lisansım süresince manevi desteklerinden dolayı kardeşim Erku'ta ve Çağla Arca'ya teşekkür ederim.

Son olarak, "Mikro-Fiber Yapılar İle Birçok Farklı Yüzeyle Tırmanabilen Enerji-Verimli Gözlem, İnceleme ve İstihbarat Robot Tasarımı ve Üretimi" isimli ve "110E186" numaralı projeyi desteklemesi adına TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Bu tez, bu projenin bir parçası olarak yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Problem Tanımı	1
1.2 Motivasyon	1
1.3 Tezin Amacı	1
1.4 Geleneksel Tırmanma Metodları	2
1.4.1 Vakum Yöntemi ile Tırmanma.....	2
1.4.2 Vortex (Girdap) Yöntemi ile Tırmanma	2
1.4.3 Manyetik Tutunma Yöntemi ile Tırmanma	2
1.4.4 Mekanik Tutunma Yöntemi ile Tırmanma	3
1.4.5 Elektrostatik Tutunma Yöntemi ile Tırmanma	3
1.5 Fiberlerin Doğadaki Rolü ve Tırmanan Robotlarda Kullanımı.....	3
2. LİTERATÜR TARAMASI VE TEORİK MODELLEME.....	7
2.1 Fiber Dizini Tasarım Metodolojisi.....	7
2.1.1 Fiberlerin Kusur Direnci	8
2.1.2 Alan/Hacim Oranının Fiber Boyutuna Etkisi ve Adezyon ile İlişkisi	10
2.2 Tek Bir Fiber Adezyon Modeli	11
2.3 Fiber Dizini Adezyon Modeli	16
2.3.1 Fiber Çapının Adezyona Etkisi.....	18
2.3.2 Fiber Boy/En Oranının Adezyona Etkisi.....	21

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.3.3 Fiber Yerleştirme ve Çökme Modeli	25
2.3.4 Takviye katmanı	29
2.3.5 Fiberlerin Elastik Özellikleri	31
2.3.6 Elastisite Modülünün Adezyona Etkisi	32
2.3.7 Fiber Malzemesi Seçimi	33
2.3.8 Yüzey Pürüzlülüğünün Adezyona Etkisi.....	34
2.3.9 Fiber Uç Şekillerinin Adezyona Etkisi.....	36
2.4 Optimizasyon Algoritması	42
2.4.1 Optimizasyon Sınır Koşulları.....	43
2.4.2 Optimizasyon Sonuçları	46
2.4.3 Optimizasyon Doğrulaması	49
2.4.4 Üretilen Fiber Çapına Karşılık Optimum Fiber Boy/En Oranı Hesabı....	50
3. TEST DÜZENEĞİ VE FİBER DİZİNLERİNİN TESTLERİ	54
3.1 Özet.....	54
3.2 Test Düzeneğinin Amacı	54
3.3 Test Düzeneğinin Çalışma Prensibi.....	54
3.3.1 Yük Hücreleri	55
3.3.2 Yük Hücresi Amplifikatörü	57
3.3.3 Veri Toplama Ünitesi.....	59
3.3.4 Lineer DC Motorlu Eksen	60
3.3.5 Lineer DC Motorlu Eksen Sürücüsü.....	62
3.3.6 Yarım Küre Lens	63
3.4 Test Düzeneğinin Üretimi ve Yazılımı.....	65
3.4.1 Test Düzeneğinin Programlanması.....	66
3.4.2 Test Düzeneğinin CAD Tasarımı	71

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.4.3 Test Düzeneğinin Statik Analizi.....	72
3.4.4 İmalat	75
3.4.5 Test Düzeneğinin Kurulumu.....	75
3.4.6 Test Sonuçlarının Filtreleme ve Düzeltme Teknikleri	77
3.5 Üretilen Fiber Dizinlerinin Testleri ve Model Karşılaştırılması.....	79
3.5.1 Fiber Dizini ile Düz Elastomerlerin Adezyon Karşılaştırılması.....	79
3.6 Fiberli Numunelerin Testleri.....	83
3.6.1 Model ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması:.....	87
3.7 PDMS Malzemelerinin Elastisite Modül ve Yay Sabiti Değerlerinin Belirlenmesi	92
3.8 PDMS Malzemesinin Yapışma Enerjisi Belirlenmesi	96
4. TIRMANAN ROBOT TEKERLEĞİNİN MODEL VE TESTLERİ.....	97
4.1 Süngerin Elastisite Modül ve Yay Sabiti Değerlerinin Belirlenmesi.....	97
4.2 Sünger Tekerleğin Fiber Temas Alanı Testleri ve Modeli	103
4.2.1 Sünger Teker Temas Alanı Testleri	104
4.2.2 Sünger Tekerlek Deformasyonunun Eğri Uyarlama Metodu ile Çözümü	106
4.2.3 Sünger Teker Deformasyon Modeli ve Test Sonuçları.....	108
4.3 Rijit Tırmanan Robot Teker Adezyon Modeli	109
4.4 Model Sonuç ve Yorumları	115
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	116
5.1 Literatüre Yapılan Katkıların Özeti.....	116
5.2 Fiber Dizinlerinin Adezyon Optimizasyonu	116
5.3 Fiber Dizinlerinin Adezyon Testleri	117
5.4 Tırmanan Robot Teker Model ve Testleri	118

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.5 İleriki Çalışmalar	119
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	121
EKLER.....	128
ÖZGEÇMİŞ.....	140

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Süleymancık (kertenkele) fotoğrafı	4
Şekil 1.2. Tokay Gekko'nun ayaklarının altında bulunan fiberlerin büyütülmüş görüntüsü [23].....	5
Şekil 1.3. Düz polimerler ile fiber dizinlerinin pürüzlü yüzeylere uyumunun karşılaştırılması [29]	6
Şekil 2.1. Bir fiberin kusura dirençli olabilmesi için gereken maksimum fiber çapının elastisite modülü ile değişim grafiği (poisson katsayısı=0.5, adezyon enerjisi=85 mJ/m ² , yüzeyler arası çekim basıncı= (elastisite modülü)/10)	9
Şekil 2.2 Boy kütle oranı tablosu [24]	10
Şekil 2.3. Tek bir silindirik düz uçlu fiber modeli	12
Şekil 2.4. Bir fiberin yarıçapının değişmesi ile adezyon basıncında meydana gelen değişim grafiği (poisson katsayısı: 0.5, adezyon enerjisi(w): 85 mJ/m ² , elastisite modülü(E _f): 0.55 MPa).....	13
Şekil 2.5. Yükseklik farkı olan bir yüzeyde adezyon testi mikroskop görüntüleri, a) fiber dizini ile yüzey birbirlerine yaklaştırılıyor, b) fiber dizini ile yüzey arasında temas gerçekleşiyor, c) yüzey fiber dizinlerinden uzaklaştırılıyor, d) yüzey fiber dizinlerinden iyice uzaklaştırılıyor (fiberler ilk uzunluklarının 6 katında çıkıyor) [29].	17
Şekil 2.6. JKR adezyon modeli	17
Şekil 2.7.Farklı elastisite modülüslerine sahip fiberlerin yarıçaplarının adezyon basıncına göre değişim grafiği [31].	19
Şekil 2.8. Boy/en oranı yüksek fiberlerin matematiksel modeli gösterimi.....	21
Şekil 2.9. Aynı malzemeden üretilmiş, farklı çaplardaki fiberlerin, farklı boylarda üretilmesi ile oluşan deneysel efektif elastisite modül değerleri [30,46].	22
Şekil 2.10 Fiber dizinlerinde bulunan farklı çaplarda ve uzunluklardaki fiberlerin yüzeye temas etme sayısı. [30]	23
Şekil 2.11. Boy/en oranı "1" olan farklı çaplardaki fiberlerin aynı yüzey üzerindeki yapışma kuvvetleri. Farklı renklerdeki üçgen, yuvarlak, kare ve ters üçgen şekilleri deneysel sonuçları, noktalı çizgiler ise yay modeline göre bulunan teorik sonuçları göstermektedir [30].	24
Şekil 2.12 Teorik olarak değişen fiber yarıçapının adezyon basıncı oranı ile değişimi	24

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Sayfa

Şekil 2.13 Teorik olarak değişen boy/en oranının adezyona etkisi grafiği.	25
Şekil 2.14. Fiberlerin birbirleri ile kenetlenme durumu (çökme) [43].	26
Şekil 2.15 Farklı yarıçaplardaki fiberlerin çökme olmadan sahip olabilecekleri en uzun boy grafiği (Elastikiyet sabiti=0.55 MPa, Poisson oranı=0.5, PDMS için Yüzey enerjisi 20 mJ/m ² [59-60], d=a)	27
Şekil 2.16 Farklı yarıçaplardaki fiberlerin çökme olmadan sahip olabilecekleri en yüksek boy/en oranı grafiği (Elastikiyet sabiti=0.55 Mpa, Poisson oranı=0.5, PDMS Yüzey enerjisi 20 mJ/m ² , d=a)	28
Şekil 2.17 Fiberlerin dikdörtgensel bir alana olabilecek en yoğun şekliyle sığdırılma şekli.	29
Şekil 2.18 Takviye katmanı ile birlikte gösterilmiş fiberler ve basit mekanik eşlenik yapısı (statik pozisyonda çizildiği için viskoelastik polimerlerde yer alan amortisör kısmı ihmal edilmiştir).	29
Şekil 2.19 Takviye katmanı kalınlığının fiberler üzerine etkisini gösteren şematik çizim, (a) fiber çaplarına oranla sonsuz incelikte takviye katmanı üzerindeki kuvvet dağılımı, (b) fiber çaplarına oranla sonsuz büyük kalınlıkta takviye katmanı üzerindeki kuvvet dağılımı.[38].....	30
Şekil 2.20 Düz yüzey üzerinde değişken L/a oranına karşılık gelen adezyon kuvvetinin dağılım grafiği (mantar uçlu, h=20 µm, gövde a=5 µm, uç a=9 µm, doluluk oranı 44%, mantar uçlu). [38]	31
Şekil 2.21 Farklı fiber çaplarının değişen elastikiyet sabitlerine oranla verdikleri maksimum adezyon basıncı modeli grafiği [50].	33
Şekil 2.22 Yüzeydeki tek bir pürüzün, değişken ortalama karekök yüzey pürüzlülüğüne göre fiberin maksimum adezyon basıncı [54].....	35
Şekil 2.23 Pürüzsüz (solda) ve pürüzlü(sağda) yüzeylerde düz ve fiber dizinli elastomerlerin farklı ön yüklemeler karşısındaki adezyon karşılaştırma grafiği [29].	35
Şekil 2.24 Sentetik olarak üretilmiş farklı şekillerdeki fiber dizinleri [41].	37
Şekil 2.25 Farklı geometrik uçlara sahip fiber dizinlerine uygulanan ön yüklemelere karşılık gelen adezyon değerleri [39].	38
Şekil 2.26 Literatürde bahsi geçen deney sonuçlarına göre küresel, silindirik ve mantar uçlu fiberlerin adezyon karşılaştırma grafiği. [17].....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Sayfa

Şekil 2.27 Küresel, silindirik, spatula ve mantar uç şekillerine sahip fiberlerin değişen çap boyutuna göre adezyon karşılaştırma grafiği [42].	41
Şekil 2.28. Altıgen şeklinde yerleştirilmiş fiberlerin tüm alana yayılmasının iki ve üç boyutlu gösterimi.	44
Şekil 2.29. Optimizasyon algoritması gösterimi.	45
Şekil 2.30. Değişen boy/en oranı ve fiber yoğunluğuna göre oluşan adezyon basıncı grafiği.....	46
Şekil 2.31. Değişen fiber çapı ve fiber boyuna göre oluşan adezyon basıncı grafiği.	47
Şekil 2.32. Değişen fiber çapı ve boy/en oranına göre adezyon basıncı grafiği.....	47
Şekil 2.33. Değişen fiberler arası boşluk (d) ve fiber boyuna (h) göre adezyon basıncı grafiği.....	48
Şekil 2.34. Maksimum adezyon basıncı için, fiber çapına göre optimum boy/en oranı ($\lambda=h/2a$) grafiği.....	52
Şekil 2.35 Maksimum adezyon basıncı için, fiber çapına göre optimum boy/en oranı ($\lambda=h/2a$) grafiğinin eğri uyarılama metodu ile eğri denkleminin bulunması	52
Şekil 3.1. Test Düzeneği Çalışma Şeması.....	54
Şekil 3.2. Yük hücreleri	56
Şekil 3.3. Yük Hücresinin Teknik Çizimi ve Tanımlamaları	56
Şekil 3.4. Yük Hücresinin Devre Şeması ve Giriş Çıkış Kabloları	57
Şekil 3.5. Amplifikatör Fotoğrafı.....	57
Şekil 3.6. Amplifikatör Konfigürasyonu	59
Şekil 3.7. Veri Toplama Ünitesi.....	60
Şekil 3.8. Lineer DC Motorlu Eksen.....	61
Şekil 3.9. DC motor için komut sinyalleri.....	62
Şekil 3.10. Lineer motorlu eksenin eksen ve yük yönlerinin gösterimi	62
Şekil 3.11. Lineer DC Motorlu Eksen Sürücüsü.....	63
Şekil 3.12. Yarım Küre Lens Fotoğrafı.....	64
Şekil 3.13. Yarım Küre Lens Çizimi	65
Şekil 3.14. Yarım küre lensin fiber dizinleri ile farklı açılardaki etkileşimi.....	65
Şekil 3.15. Test Düzeneği Yazılımı Ön Panel Görüntüsü	68
Şekil 3.16. Test Düzeneği Mekanik Tasarımı	72

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.17. Statik Analiz Koşul Şartları.....	73
Şekil 3.18. Von Mises Gerilimi Sonuçları.....	74
Şekil 3.19. Test Düzeneği Deformasyon Analizi.....	75
Şekil 3.20. Test Düzeneğinin Mekanik Kurulumu.....	76
Şekil 3.21. Komple Test Düzeneği ve Ekipmanları.....	76
Şekil 3.22. Filtrelenmemiş veriler.....	78
Şekil 3.23. Filtrelenen veriler.....	78
Şekil 3.24. Test aşamalarının açıklamalı gösterimi.....	81
Şekil 3.25. Fiberli PDMS için 2.8mN (solda)ve Düz PDMS için 16 mN'luk (sağda) Önyükleme Grafiği.....	81
Şekil 3.26. Fiberli PDMS için 4 mN (solda) ve 8 mN (sağda) Önyükleme Grafiği.....	82
Şekil 3.27. Fiberli PDMS için 13 mN Önyükleme Grafiği (solda) ve Düz PDMS için 2.8 mN Önyükleme Grafiği (sağda).....	82
Şekil 3.28. Düz PDMS için 7 mN (solda) ve 10.5 mN (sağda) Önyükleme Grafiği ..	82
Şekil 3.29. "1" numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği.....	85
Şekil 3.30. "2" Numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği.....	85
Şekil 3.31. "3" numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği.....	86
Şekil 3.32 "4" numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği.....	86
Şekil 3.33. "5" numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği.....	87
Şekil 3.34. Yarım Küre Lensin Fiberlere Basma Şeması.....	88
Şekil 3.35. Yarım Küre Lensin Fiberlere Bastırıldığında Oluşan Temas Alanı (Alt Görünüş).....	89
Şekil 3.36. Altıgen Şeklindeki Fiber Yerleşimi Gösterimi.....	89
Şekil 3.37. PDMS numunesi için $(F_f/A_f)/(\Delta L_f/L_f)$ "E _f " grafiği.....	93
Şekil 3.38. PDMS numunesi üzerinde 5 gün sonra gerçekleştirilen testlerin, kuvvete bağlı olarak deformasyon grafiği.....	94
Şekil 3.39. PDMS numunesi üzerinde 5 gün sonra gerçekleştirilen $F/\Delta L/L$ (E _f) grafiği.....	95
Şekil 4.1. Sünger deformasyon testi fotoğrafları.....	98
Şekil 4.2. Sünger numunesine uygulanan 200 mN ön yükleme grafiği.....	98
Şekil 4.3. Sünger numunesine uygulanan 500 mN ön yükleme grafiği.....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.4. Sünger numunesine uygulanan 240 mN ön yükleme Grafiği	99
Şekil 4.5. Sünger numunesine uygulanan 350 mN ön yükleme grafiği	100
Şekil 4.6. Sünger Numunelerine etki eden kuvvete bağlı olarak deformasyon miktarları.....	102
Şekil 4.7. Sünger numunelerinin $F_p/A_p\Delta L_p/L_p$ (E_p) grafiği.....	102
Şekil 4.8. Tırmanan robot tekeri.....	103
Şekil 4.9. Sünger tekerin deformasyon testleri	104
Şekil 4.10. Uygulanan yükleme kuvvetine bağlı olarak tırmanan robot tekerleğindeki fiber temas alanının değişim Testleri	105
Şekil 4.11. Testleri gerçekleştirilen sünger tekerin zamana bağlı kuvvet grafiği	106
Şekil 4.12. Testleri gerçekleştirilen sünger tekerin deformasyona bağlı kuvvet grafiği	106
Şekil 4.13. Test Sonuçlarına en yakın eğri denkleminin çizdirilmesi.....	107
Şekil 4.14. Uyarlanan eğriye göre teker üzerindeki kuvvete bağlı oluşan fiber temas alanı grafiği	107
Şekil 4.15. Eğri uyarlama modelinin ve testlerin kuvvete bağlı oluşturdukları fiber temas alanı grafiği	108
Şekil 4.16 Fiberlerin teker üzerindeki davranış modeli	109
Şekil 4.17.Teker üzerindeki noktanın(fiberin) x ve y eksenlerine göre yol aldığı uzunluklar. $R = 40$ mm, $\alpha = 0:360$	110
Şekil 4.18 Tekerin dönme açısına bağlı olarak, teker üzerindeki fiberin x ekseninde yol aldığı uzunluk. ($R=40$ mm, $\alpha=0:360$).....	110
Şekil 4.19.Tekerin dönme ve öteleme hareketine göre fiber modeli	111
Şekil 4.20 Tekerin dönme açısına bağlı olarak, bir fiberi çekme kuvvetinin normal bileşeni ile adezyon kuvvetinin gösterimi.	112
Şekil 4.21 Fiberin α açısına bağlı olarak uzaması ilk başta h_0 boyunda, teker hareket ettikçe, h_1 h_2 h_3 yüksekliklerine ulaşıyor, en son h_k uzunluğunu ise fiberin yüzeyden kopma uzunluğu oluyor. α , β ve C_x değişken uzunluklardır.....	113
Şekil 4.22. Teker üzerinde bir dereceye karşılık gelen fiber sayısı gösterimi.....	114
Şekil 4.23.Bir tekerin dönme açısına bağlı olarak, tüm fiberlerden elde edilen toplam adezyon kuvveti.....	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Tırmanan robotların kullanılacağı olası yüzeyler ve yüzeylerin özellikleri.	14
Çizelge 2.2.Literatürde yer alan fiberler malzemelerine göre fiber çapları karşılaştırma tablosu.....	21
Çizelge 2.3. Üretilecek fiberlerin boyut aralıkları ve özellikleri	49
Çizelge 2.4. Maksimum adezyon basıncı için optimum değerler.	50
Çizelge 3.1 Yük hücrelerinin genel özellikleri.....	55
Çizelge 3.2. Yük Hücrelerinin Teknik Özellikleri	56
Çizelge 3.3. Yük Hücresi Bağlantı Kablo Renkleri ve Girişleri	58
Çizelge 3.4. Lineer DC Motor Eksenin Özellikleri	61
Çizelge 3.5. Motor Karakteristikleri	62
Çizelge 3.6. Lineer motorlu eksenin Yük Karakteristikleri ve Sağlamlığı	62
Çizelge 3.7 Lineer DC Motorlu Eksen Sürücüsü Özellikleri	63
Çizelge 3.8. Program mantık adımları	67
Çizelge 3.9 Test düzeneği durum açıklamaları.....	69
Çizelge 3.10. Veri Toplama Ünitesi(DAQ) Program Komut Açıklamaları.....	70
Çizelge 3.11. Lineer Motor Sürücüsü Program Komut Açıklamaları.....	71
Çizelge 3.12. Parçalarının Mekanik Özellikleri.....	74
Çizelge 3.13. Verilerin Filtreleme Açıklaması	77
Çizelge 3.14. Düzeltilmiş Değerlerin Hesap Detayı	79
Çizelge 3.15. Fiberli ve Düz Elastomerli numunelerin adezyon karşılaştırması için kullanılan fiber dizini özellikleri.....	80
Çizelge 3.16 Üretilen fiberlerin karakteristikleri.....	84
Çizelge 3.17. Fiber dizinlerine etki eden ön yükleme kuvvetlerinin, fiber burkulma kuvvetleri ile karşılaştırılması.....	87
Çizelge 3.18. Fiber Dizinlerine uygulanan ön yükleme miktarına göre elde edilen adezyon kuvvetleri ve yarım küre lensin fiberlere basma derinliği.	87
Çizelge 3.19 Model ve Test Adezyon değerlerinin karşılaştırılması.....	90
Çizelge 3.20 PDMS numunesinin boyut ölçü özellikleri	93
Çizelge 3.21 PDMS numunesinin kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabit değeri	94

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.22. 5 gün sonra PDMS numunesinin kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri	95
Çizelge 3.23. PDMS numunesinin ortalama elastisite modülü ve yay sabiti değerleri ..	96
Çizelge 4.1. Sünger numunelerinin boyut ölçüleri.....	100
Çizelge 4.2. Sünger Numune 1'in kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri	101
Çizelge 4.3. Sünger Numune 2'nin kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri.....	101
Çizelge 4.4. Sünger Numune 3'ün kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve..... yay sabiti değerleri.....	101
Çizelge 4.5 Sünger numunelerinin hesaplanan ortalama elastisite modül ve yay sabitleri ve genel ortalamaları	103
Çizelge 4.6. Uygulanan kuvvete göre test ve modellerdeki fiber temas alanları karşılaştırılması ve test Sonuçlarından Sapma Yüzdeleri.....	108

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a_k	: Maksimum fiber yarıçapı
K	: Fiberin efektif elastikiyet katsayısı
w_f	: Adezyon enerjisi
P_f	: Silindirik uçlu bir fiberin normal yüzey ile yaptığı adezyon kuvveti
σ_0	: Yüzeyler arası çekim basıncı
σ_{av}	: Ortalama gerilme basıncı
a	: Fiber yarıçapı
E_f^*	: Efektif elastisite modülü
A	: Bir fiber için ayrılmış toplam alan
ν_s	: Yüzey poisson katsayısı
ν_f	: Fiber poisson katsayısı
E_s	: Yüzey elastikiyet katsayısı
E_f	: Fiber elastisite modülü
k_{eff}	: Fiber efektif sertliği
k_n	: Fiberin yükleme doğrultusundaki sertliği
h	: Fiber boyu (yüksekliği)
δ_f	: Fiberde meydana gelen uzama veya kısalma uzunluğu
σ_{UTS}	: Fiber kopma gerilimi
L_t	: Fiber destek katman kalınlığı
δ	: Fiberlere Basma Derinliği
D	: Yarım küre lensin oluşturduğu dairesel kontak alanın yarıçapı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

R_k	: Yarım küre lensin yarı çapı
P_k	: Yarım küre lensin fiberlere uyguladığı kuvvet
λ	: Fiberlerin boy/en oranı
N_d	: Küresel cam yüzeyin temas ettiği fiber sayısı
A_h	: Yarım küre lensin, fiberlerle oluşturduğu temas alanı
P_c	: Lensin fiber dizininden ayrılırken elde edilen adezyon kuvveti
R	: Sünger teker yarıçapı
R_m	: Sünger teker iç yarıçapı
σ_T	: Fiber dizininin ortalama adezyon basıncı
E_p	: Süngerin elastisite modülü
A_p	: Numune sünger kesit alanı
L_p	: Numune sünger yüksekliği
k_p	: Süngerin yay sabiti
ΔL_p	: Numune sünger deformasyonu
F_p	: Numune süngere uygulanan kuvvet
WW	: Sünger tekerleğin genişliği (eni)
SD	: Sünger tekerin deformasyon değeri
A_f	: Birim altıgen içindeki toplam fiber alanı
A_t	: Birim altıgenin toplam alanı
A_{f1}	: Silindirik uçlu bir fiberin kesit alanı
c_f	: Fiber yoğunluğu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$x(\alpha)$: Bir fiberin, tekerin dönme açısına göre x eksenindeki koordinatı
$y(\alpha)$: Bir fiberin, tekerin dönme açısına göre y eksenindeki koordinatı
$h(\alpha)$: Teker üzerindeki bir fiberin, tekerin dönme açısına göre boyu
$F(\alpha)$: Teker üzerindeki fiberi çeken kuvvet
β	: Fiberin yüzeyden çekilme açısı (fiber ile yüzey arasındaki açı)
DF	: Tekerin bir derecesine karşılık gelen yaydaki fiber sayısı
FS	: Teker enindeki (genişliği) fiber sayısı
Toplam_Ad(α)	: Bir tekerden elde edilen toplam adezyon kuvveti

1. GİRİŞ

1.1 Problem Tanımı

Tırmanan robotlara olan ihtiyaç birçok problem tarafından tetiklenmektedir. Günümüzde uçaklar okyanus ötesi ulaşım için sıklıkla kullanılmaktadırlar ve bu uçuşlardan sonra olası kazaları önlemek için periyodik olarak kontrol edilirler. Uçaklar genellikle kontrol amaçlı hangar içine alınırlar ve etraflarına kurulan ya da hareketli bir iskele yardımı ile yüzeyleri uzun bir uğraş sonucunda incelenirler (özellikle üst kısımlarını incelemek çok zahmetlidir). Aynı şekilde, binaların iç ve dış yüzeylerinin incelenmesi de bina etrafına kurulan bir iskele yardımı ile yapılır ve yalnızca bu iskele kurma işlemi günlerce sürebilir. Bunların yanı sıra; tırmanan robotlar barajlar, nükleer güç santralleri, silolar, borular vb. gibi yerlerde bakım-onarım, inceleme, gözetleme ve keşif amacıyla da kullanılabilirler. Bu nedenle, bu gibi durumlarda insanların yerlerine geçebilecek, bir çok yüzeye tırmanabilen, neredeyse sessiz çalışabilen, çalıştığı yüzeye zarar vermeyen, insana oranla çok daha hızlı ve güvenilir olan küçük ölçekli robotlara ihtiyaç vardır.

1.2 Motivasyon

İnsan güvenliğinin her şeyden önemli olmasından dolayı, insan yerine kullanılacak gözetim ve denetim robotları önemli bir araştırma konusu olmuş ve özellikle yüksek veya insanlar için tehlikeli olan yüzeylerde tırmanan robotların kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu tezin motivasyonu; bu gibi görevlerde tırmanan robotların kullanılması ile ölümcül kazaların önlenmesi, işin daha kısa sürede, daha güvenilir ve daha düşük maliyetlerle tamamlanmasıdır.

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı; ortalama karekök pürüzlülüğü (OKP) (Bkz. Ek 2) 2-3 mikrometreye kadar olan herhangi bir dik yüzeye ve OKP değeri 50 nanometreden daha küçük olan ve herhangi bir açıda konuşlandırılmış herhangi bir yüzeye tırmanabilen, enerji-verimli, gözlem, araştırma ve istihbarat robotu için fiber modellemesi ve karakterizasyonun yapılmasıdır. Bu tezde, aşağıdaki soruların cevapları aranacaktır: Hangi metot kullanılarak sıklıkla karşılaşılan birçok farklı yüzeylere tırmanılabilir? Tırmanma güvenilirliğini ve yüzeye tutunma kuvvetini arttırmak için hangi parametreler seçilmeli ve irdelenmelidir?

1.4 Geleneksel Tırmanma Metodları

Gelişen teknoloji ile birlikte insanlara yardımcı olabilecek ya da insanların tehlikeli ortamlarda bulunma gereksinimini ortadan kaldıracak robotlar son yıllarda hayatımızda yerlerini almaya başlamışlardır. Tırmanan robotlar ise son 10-15 yıldır uğraşılan bir konu haline gelmiş ve özellikle erişimi güç ve tehlikeli yerlerin gözlem ve incelenmesi amacıyla araştırmaya değer bulunmuştur.

Tırmanan robotlardan arzu edilen özellikler şu şekilde sıralanabilir; hafif, birçok farklı yüzeyde çalışabilen ve uzun ömürlü (az enerji harcayan) olmalıdırlar. Literatürde tırmanan robot tasarımlarında sıklıkla başvurulan tırmanma metotları ise; vakumlama (vantuzlama), girdaplama, manyetik (elektro-mıknatıslama), mekanik tutunma ve statik elektriklemedir. Bu yöntemler aşağıda sırası ile açıklanmıştır;

1.4.1 Vakum Yöntemi ile Tırmanma

Bu yöntem, vakum etkisi yapabilmek için gereken basınç farkını çoğunlukla bir pompa yardımı ile karşılar. Pürüzsüz yüzeylerde güvenilir olmasına karşın; eğri, çatlak, gözenekli ve/veya pürüzlü yüzeylerde hava kaçaklarının oluşmasından dolayı kullanılamazlar [1-6]

1.4.2 Vortex (Girdap) Yöntemi ile Tırmanma

Bu teknikte; robot ile yüzey arasındaki hava sürekli dışarı atılır. Bu sayede oluşan basınç farkı, robotu yüzeye doğru iten bir kuvvet oluşturur. Bu metot ile birçok farklı yüzeyler üzerine tutunma sağlanabilir. Buradaki basınç farkı tırmanma ve tutunma sırasında sürekli olarak korunmalıdır. Bu tekniğin en büyük dezavantajları;

a) Robot durağanken bile yüksek güç tüketimi,

b) Havayı dışarı atan pervane ve motorun yüksek seviyede gürültü oluşturmasıdır. Bu sebeplerden dolayı bu tekniğin gözetim ve güvenlik uygulamalarında kullanılması oldukça zordur [7].

1.4.3 Manyetik Tutunma Yöntemi ile Tırmanma

Bu metot ile manyetik alan kullanılarak tırmanma gerçekleştirilir. Bu teknik ferromanyetik yüzeylerde oldukça hızlı ve güvenilir sonuçlar verir. Ancak sadece

ferromanyetik yüzeylerde ve yüksek miktarda enerji tüketimi ile kullanılabilirler. Sonuç olarak bu tekniğin de kullanım alanları sınırlı ve kullanım süresi kısıtlıdır [8-10].

1.4.4 Mekanik Tutunma Yöntemi ile Tırmanma

Bu yöntemde tırmanma ve tutunma kancalı iğne, pençe, tırnak vb. gibi yapılar kullanılarak gerçekleştirilir, bu nedenle sadece pürüzlü yüzeylerde kullanılabilir. Ayrıca bu yöntem ile yana ve aşağı doğru hareketleri gerçekleştirmek oldukça zordur [11-13].

1.4.5 Elektrostatik Tutunma Yöntemi ile Tırmanma

Bu teknik yeni bir teknoloji olup, robotun yüzeye değen metal yapılarına yüksek voltajlı elektrik verilmesiyle çalışır. Böylece tırmanma ya da tutunma yüzeyi zıt yüklerle yüklenir ve çekim kuvveti oluşturulmuş olur. Bu teknik birçok farklı yüzeylerde çalışabilmektedir, fakat bazı yüzeylerde yapışma basıncı 2kPa seviyesine kadar düşebilmekte ve tırmanmak için robot paletlerine 5000 V civarında bir voltaj verilmesi gerekmektedir [14].

Özet olarak; yukarıda verilen teknikleri kullanan robotlar genelde ağır ve hantal olmakta ve sadece belirli yüzeyler üzerinde yüksek enerji harcayarak çalışabilmektedirler. Ancak gözlem, araştırma ve istihbarat amaçlı kullanılması düşünülen tırmanan robotlar birçok farklı yüzeylerde, uzun süreyle ve dışarıya herhangi bir kablo bağlantısı olmaksızın görev yapabilmek durumundadırlar.

1.5 Fiberlerin Doğadaki Rolü ve Tırmanan Robotlarda Kullanımı

Örümceklerin, Süleymancıkların (Bkz. Şekil 1.1) ve daha birçok canlının, birçok farklı yüzeylere hiç zorlanmadan tırmanabilmeleri ve ters yüzeylerde bile çok uzun süre hareket etmeden kalabilmeleri ilk çağlardan beri insan oğlunun ilgisini çekmiştir. Ancak bu fiziksel olayın çalışma prensipleri son 10-20 yıla kadar gizemini korumuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda Tokay Gekko'nun yüzeye yapışma (adezyon) basıncının 200 kPa'a kadar çıkabildiği saptanmıştır. Bu kuvvetin arkasında yatan neden moleküller arası çekim kuvvetidir. Şekil 1.2.'de görülebileceği gibi Gekko'ların ayaklarının altında ortalama insan saç teli çapından daha küçük yaklaşık 500.000 adet tüycük (fiber) bulunmaktadır [23] .

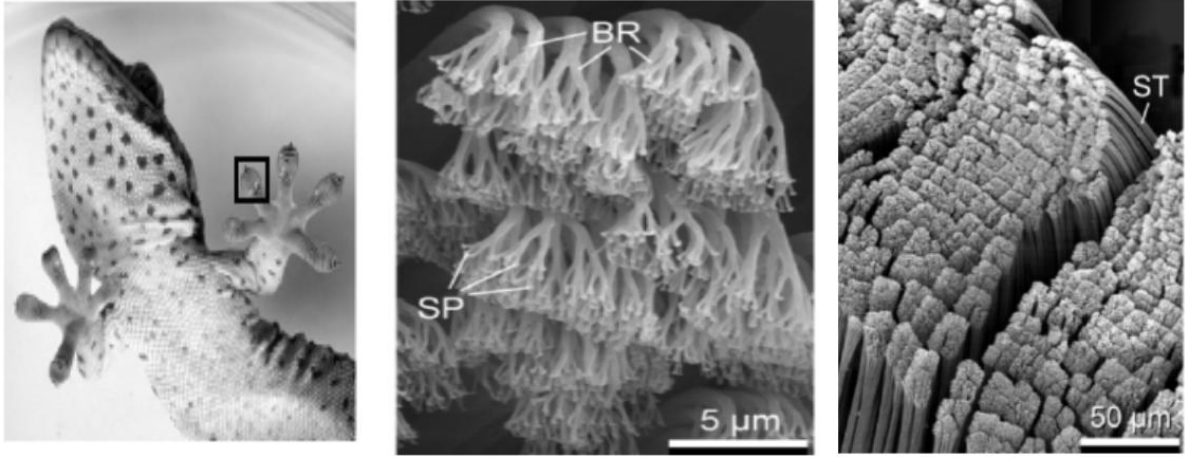


Şekil 1.1. Süleymancık (kertenkele) fotoğrafı

Bu fiberler;

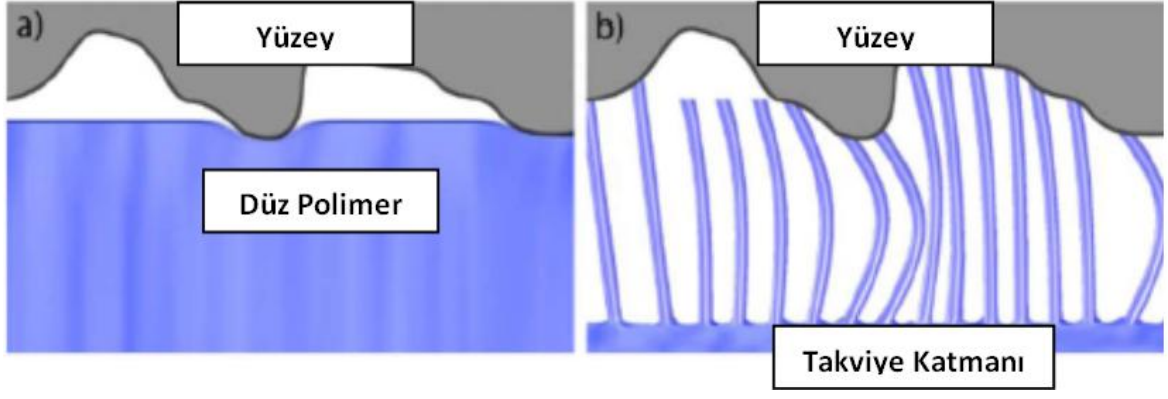
- Elastisite modülü 4 GPa olan beta keratinden oluşmaktadır [15],
- Ortalama 0.2 ile 5 μm çapındadırlar [15][58],
- Uçlarında çapları 100 ile 300 nm arasında değişen daha küçük fiberler bulunmaktadır [58],
- Yüzey pürüzlülüğüne uyum sağlayarak moleküler arası çekim kuvveti (Van der Waals) oluştururlar [15][17][29][58],
- Bir fiber 20 μN civarında adezyon kuvveti oluşturur [58],
- Toplamda yüz binlerce fiberin yüzeye teması sonucunda, ortalama 100 kPa civarında adezyon basıncı ortaya çıkarırlar [15-18].

Sonuç olarak; doğada var olan bu tekniğin çalışma prensiplerinin yeni nesil tırmanan robotların geliştirilmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu metot ile yüzeylere uyum sağlandığında, birkaç μm pürüzlülük değerine kadar, kalıntı (yüzey üzerinde iz, kir) bırakmadan, ortalama 10-15 kPa fiber tutunma (adezyon) basıncının enerji-verimli bir şekilde elde edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca bu yöntemde pompa, pervane vb. gibi ekipmanlara ihtiyaç duyulmadığı için bu yöntem oldukça sessiz çalışacaktır.



Şekil 1.2. Tokay Gekko'nun ayaklarının altında bulunan fiberlerin büyütülmüş görüntüsü [23].

Son 5-6 yıl içerisinde bazı tırmanan robot tasarımlarında fiberli yapılar yerine yumuşak düz elastomerler ile moleküller arası çekim kuvveti oluşturularak yüzeylere tutunma metodolojisi denenmiş ve pürüzlülüğü düşük yüzeylerde (>50 nm) yüksek tutunma kuvvetleri (25 kPa) elde edilmiştir [19-21]. Ancak düz elastomerlerin en büyük problemi; elastomer ile yüzey arasında oluşan herhangi bir lokal yüksek basınçta elastomerin yüzeyden lokal olarak ayrılması ile başlayan çatlakın çok hızlı bir şekilde ilerleyerek tüm elastomerin yüzeyden ayrılmasına neden olmasıdır. Eğer düz elastomerler pürüzlü yüzeylere daha çok bastırılacak olurlarsa temas alanları dolayısı ile adezyon kuvveti artar, ancak deformasyondan dolayı elastik enerji de depolarlar. Depolanan elastik enerji genelde yapışma enerjisinden fazla olur ve düz elastomerin baskı kuvveti ortadan kalktıktan sonra kendiliğinden yüzeyden ayrılmasına neden olur. Pürüzsüz yüzeylerde ise, düz elastomerlerin net temas alanı fiberli yapılara oranla daha çoktur ve fiberli yapılardan (fiber dizinleri) daha yüksek yapışma basıncı verirler. Ancak fiber dizinlerinde her bir fiberin diğerlerinden bağımsız olarak hareket etmesinden dolayı lokal basınçlar sadece o bölgedeki fiberlerin yüzeyden ayrılmasına neden olur, diğer kısımlar ise bu durumdan çok etkilenmezler, dolayısı ile çatlak lokal olarak hapsedilmiş olur. Fiber dizinleri, Şekil 1.3'den de görüleceği gibi pürüzlü yüzeylere kolaylıkla uyum sağlayarak net (efektif) tutunma alanlarını en üst düzeyde tutarlar ve bu sayede daha çok yapışma kuvveti elde ederler [19-22]. Bu sebeple, özellikle pürüzlü yüzeylerde kullanılacak tırmanan robotlarda, fiber dizinlerinin kullanılması daha avantajlı olacaktır.



Şekil 1.3. Düz polimerler ile fiber dizinlerinin pürüzlü yüzeylere uyumunun karşılaştırılması [29]

2. LİTERATÜR TARAMASI VE TEORİK MODELLEME

2.1 Fiber Dizini Tasarım Metodolojisi

Bu bölümde; kapsamlı bir literatür taraması yapılarak literatürde yer alan analitik ve nümerik modeller analiz edilmiş, modeller kullanılarak optimal fiber dizini için bir tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Aşağıda böyle bir optimizasyon problemi tanımlamak için gerekli olan sistem parametreleri sıralanmıştır:

Uygulamaya özel tanımlı parametreler:

- İstenilen en düşük yapışma basıncı,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Yüzey malzemesi,
- Kontaminasyon (yüzey üzerindeki kir, toz vb.) parça büyüklüğü,
- Tekrar edilebilirlik ve çalışma ömrü.

Tasarım değişkenleri:

- Fiber geometrisi (çap, uzunluk, açı, uç şekli ve büyüklüğü),
- Fiber malzemesi (elastisite modülü ve adezyon enerjisi),
- Fiber yoğunluğu,
- Fiber katman sayısı (fiber uçlarında tekrar fiber bulunması için ek katman),
- Destek katmanı (takviye katmanı) kalınlığı (Bkz. Bölüm2.3.4) .

Kısıtlamalar:

- Matlaşma (fiberlerin birbirine yapışması) durumu,
- Kusur direnci durumu(Bölüm),
- Maksimum fiber uç çapı,
- İstenilen en düşük yapışma basıncı,
- Fiber bükülme limiti.

Yukarıda verilen parametreler için fiber dizini tasarımında öne çıkan değişkenler şu şekilde açıklanabilir:

2.1.1 Fiberlerin Kusur Direnci

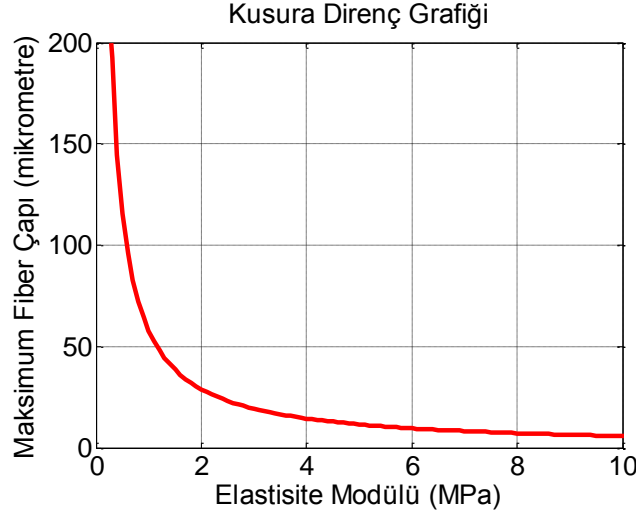
Tek bir fiberin adezyon kuvveti çatlak yayılmasından çok, ara yüzdeki yapışma özellikleri ile kontrol ediliyorsa, bu fiber kusura dirençsiz denebilir. Buradaki kusur kavramı; fiberin üretiminden kaynaklı pürüzler ve boyutsal kararsızlık anlamına gelmektedir. Eğer bir fiber hataya duyarsızsa çekildiğinde oluşan içsel basıncı (σ_0) kritik basınca (r_c) eşit olur, böylelikle teorik modeller deneysel sonuçlara yakın sonuçlar verir. Oysa hataya duyarlı fiberler henüz kritik basınca ulaşmadan yüzey ile fiber çeperi arasında oluşan bir çatlaktan dolayı yüzeyden ayrılırlar ve teorik olarak hesaplanan değerlere ulaşamazlar [15]. Yapılan bir araştırmaya göre bir yüzeye yapışmış olarak duran bir fiber çekildiğinde iki şekilde yüzeyden ayrılabilir [25];

a-) Kusura dirençli,

b-) Kusura dirençsiz.

Burada tanımlanan kusur; fiber üretimi sırasında fiber üzerinde meydana gelen küçük şekilsel bozukluklar anlamına gelmektedir. Örneğin; silindirik olarak üretilen fiberlerin üst yüzeyleri hiçbir zaman dümdüz olamaz, ancak hesaplamalarda genelde fiber yüzeyinin boyutsal kararlı ve pürüzsüz olduğu farz edilmektedir. Bu yüzden bu tez kapsamında üretilecek olan fiberin, kusura dirençli (flaw resistant), bir başka deyişle, üretimde ortaya çıkabilecek boyutsal hatalardan etkilenmeyerek teorik adezyon kuvvetini verecek şekilde tasarlanmıştır.

Kusura Dirençsiz olan fiberler yüzeyden çekildiklerinde (fiber gerilme halindeyken) önce fiber çeperinde çatlaklar oluşmaya başlar, daha sonra bu çatlaklar fiber merkezine doğru ilerleyerek fiberin yüzeyden ayrılmasına neden olur. Bu durumun sonucunda ortalama adezyon kuvveti beklenenden daha düşük olur. Kusura dirençli fiberlerde ise ortalama adezyon kuvveti yüzeyler arası (interfacial) adezyon basıncı (σ_0) ile nerdeyse aynı olmakta ve fiberlerden beklenen adezyon teorik tahmin edilen değerlere daha yakın olmaktadır.



Şekil 2.1. Bir fiberin kusura dirençli olabilmesi için gereken maksimum fiber çapının elastisite modülü ile değişim grafiği (poisson katsayısı=0.5, adezyon enerjisi=85 mJ/m², yüzeyler arası çekim basıncı= (elastisite modülü)/10)

Kusura direnç aşağıdaki eşitlikle [15] ifade edilebilir;

$$a_k = \frac{6Kw_f}{\pi\sigma_0^2} \quad (\text{mm}) \quad (2.1)$$

a_k : Maksimum fiber yarıçapı (mm),

K : Efektif elastikiyet katsayısı (Pa),

w_f : Adezyon enerjisi (work of adhesion) (J/m²)

σ_0 : Yüzeyler arası çekim basıncı (Pa)

Buna göre; $a_k > a$,ise üretilen fiber kusura dirençlidir. Örneğin Şekil 2.1'den görülebileceği gibi elastisite modülü 0.55 MPa, Poisson oranı 0.5, adezyon enerjisi: 85 mJ/m² (bkz. Bölüm 3.8) olan fiber için yüzeyler arası çekim basıncı 100 kPa olduğunda, fiberin çapı yaklaşık 105 µm'den küçük olduğu durumlarda bu fiber kusurlara karşı dirençli olacak ve fiberin dış çeperinde gerilme durumlarında çatlak görülmecektir. Tekrar Şekil 2.1'den görülebileceği gibi elastisite modülü arttıkça (fiber malzemesi sertleştikçe) üretim hatalarına karşı olan hassasiyet de artmaktadır, bu yüzden daha küçük fiberlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez kapsamında PDMS malzemesinin kullanılmıştır. PDMS'in elastisite modülü literatürde $0.3 < E_f < 2$ MPa olarak verilmektedir. En kritik durum olan 2 MPa

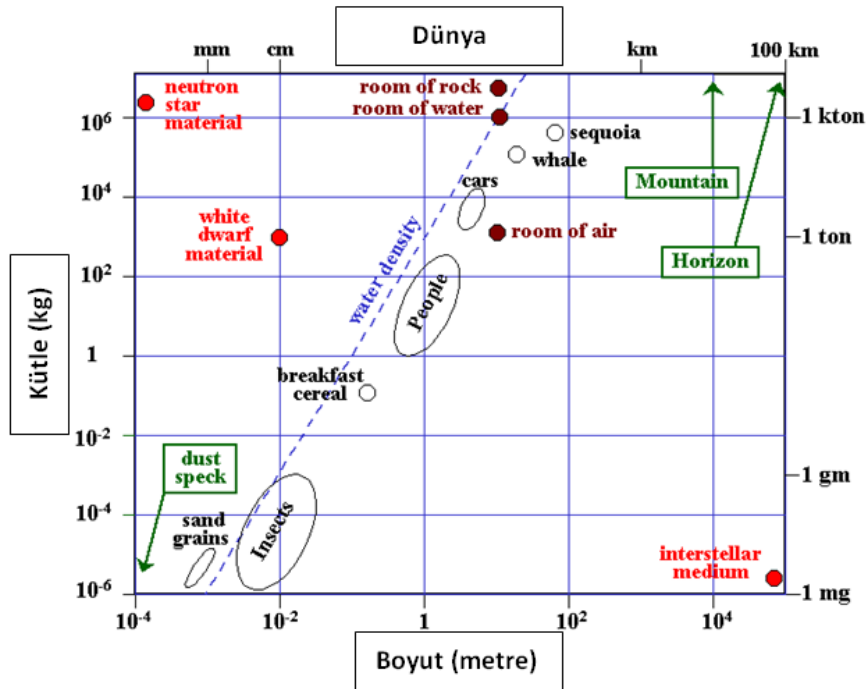
elastikiyet sabitine sahip bir fiberin üretim hatalarından etkilenmeden yüzeyden ayrılması için gereken maksimum yarıçapı;

$$a < 15 \mu\text{m}$$

olarak hesaplanmıştır.

2.1.2 Alan/Hacim Oranının Fiber Boyutuna Etkisi ve Adezyon ile İlişkisi

Bir canlının boyutu değiştikçe kütlesi de bu boyuta oranla değişir. Örneğin bir canlının başlangıçta her bir kenarının uzunluğu x olan bir küp şeklinde olduğu varsayılırsa; bu canlının boyu (x^1) iki katına çıktığında yüzey alanı (x^2) 4 katına, hacim (x^3) ise 8 katına çıkar. Moleküller arası çekim kuvveti incelendiğinde, bu kuvvetin alan ile ilgili olduğu, canlıların ağırlığının ise hacim ile ilgili olduğu görülür. Bu duruma göre canlı büyüdükçe tırmanmak daha da zor hale gelmelidir, çünkü; ağırlık boyutun kübü oranınca, adezyon ise boyutun karesi oranınca artacaktır. Şekil 2.2 incelendiğinde ortalama 1-2 cm olan böceklerin ağırlığı 0.1-1 gram civarındadır. İnsanlar ise yaklaşık 1.6-1.8 metre boyunda ve 60-80 kg ağırlığındadır. Bu durum boyut-alan ve hacim oranlarının yukarıda verilen kaba hesaba çok yakın olduğunu göstermektedir.

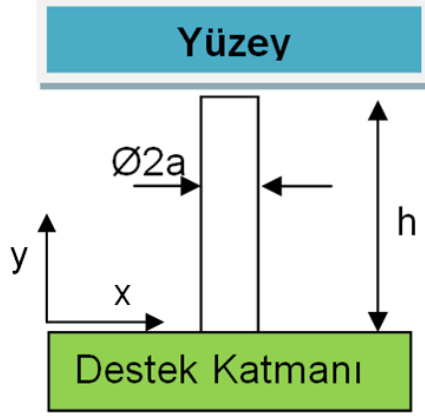


Şekil 2.2 Boy kütle oranı tablosu [24]

2.2 Tek Bir Fiber Adezyon Modeli

Şu ana kadar literatürde, fiberleri ve fiber üretiminde kullanılan viskoelastik malzemeleri tam anlamıyla modelleyebilen bir yaklaşım bulunmamaktadır. Dolayısı ile bu tez kapsamında kullanılacak, literatürde de yer alan modellerden kesin sonuçlar alınması beklenmemektedir. Bu modellerin asıl kullanım amacı genel eğilimi görmek ve parametrelerde yapılan değişikliklere göre ortaya çıkacak sonuçları birbirleri ile karşılaştırabilmek olacaktır. Bu yüzden bu modellerin sonuçlarını mutlak sonuç olarak değerlendirmeyip genel gidişat hakkında fikir veren ve karşılaştırma yapılmasına olanak veren değerler olarak nitelendirilmesi daha doğru olacaktır.

Sıralı fiber dizini adezyon modelinin ilk aşaması tek bir fiberin adezyon analizi ile başlar [15]. Literatürde fiberler genel olarak uçları yapışkan doğrusal bir yay olarak modellenir [26-28]. Şu anda kullanılan fiber modelleri, fiberin tüm yüzeye temas ettiğini farz eder ve yüzey pürüzlülük değerini ve frekansını ihmal eder. Bu bölümde sunulan modeller temel elastik, yüzey etkileşim kuvvetleri ve temas mekaniği modelleri kullanılarak türetilmiştir. Öncelikle tek bir fiberin ortalama adezyon basıncının bulunması rijit düz baskı kalıbı (rigid flat punch) modeli ile başlamaktadır. Daha sonra bu adezyon kuvveti ile çekilen bir fiberde ve fiber ile yüzey arasında meydana gelen gerilme ve uzama miktarlarının bulunması amacıyla temel elastikiyet modelleri (beam mechanics) kullanılmıştır. Burada fiberin yüzeyden ayrılma şartı, rijit düz baskı kalıpta bulunan ortalama adezyon değerinin uzama miktarından kaynaklı gerilme değerine eşit olduğu nokta olarak alınabilir. Ancak uygulamada fiberin çekilmesi ile fiberin dış çeperlerinde meydana gelen kuvvetler çok daha büyük olabilmektedir ve dolayısı ile beklenenden adezyona ulaşmadan yüzeyden ayrılma gerçekleşebilmektedir.



Şekil 2.3. Tek bir silindirik düz uçlu fiber modeli

Eş.2.6'da verilen tek bir fiber için adezyon kuvvetini hesabında şu varsayımlar kullanılmıştır;

- Fiberler düşük deformasyona uğrayan silindirik yapılardır,
- Sınır koşulları sabit kılavuzludur (Şekil 2.3'de gösterilen fiber, destek katmanına bağlı olduğu kısımda her yönde sabitlenmiş, sadece y eksenini doğrultusunda basma ve çekme hareketine maruz kalmaktadır),
- Fiber ucu yüzeye dokunduğu yerde her yönde sabitlenmiştir,
- Yüzeyde kesme kuvvetleri yoktur,
- Fiberler mekanik olarak birbirlerinden bağımsız hareket etmektedirler (destek katmanı yok denecek kadar incedir)

Şekil 2.3'de gösterildiği gibi fiber geometrisi düz uçlu bir silindir şeklindedir. Bu fiberin düz bir yüzey ile teması ile ortaya çıkan adezyon kuvveti, rijit düz baskı ile düz yüzey etkileşim modelleri kullanılarak Eş.2.2'deki gibi modellenebilir [15];

$$P_f = \sqrt{6\pi a^3 K w_f} \quad (\text{N}) \quad (2.2)$$

$$K = \frac{4}{3} \left[\frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_f^2}{E_f} \right]^{-1} \quad (\text{Pa}) \quad (2.3)$$

$$w_f = \text{Adezyon enerjisi} \quad (\text{J/m}^2),$$

$$a = \text{Fiber yarıçapı} \quad (\text{m}),$$

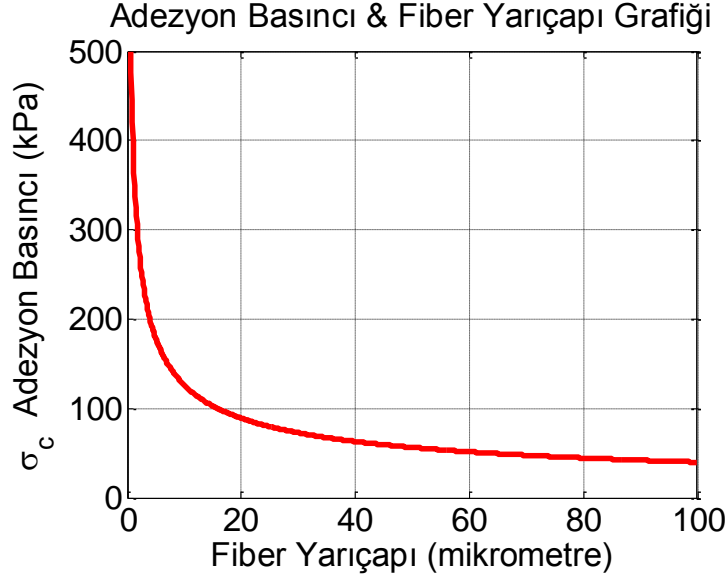
$$K = \text{Efektif elastikiyet katsayısı} \quad (\text{Pa}),$$

$$\nu_s = \text{Yüzey poisson katsayısı},$$

v_f = Fiber poisson katsayısı,

E_s = Yüzey elastisite modülü (Pa),

E_f = Fiber elastikiyet katsayısı (Pa),



Şekil 2.4. Bir fiberin yarıçapının değişmesi ile adezyon basıncında meydana gelen değişim grafiği (poisson katsayısı: 0.5, adezyon enerjisi(w): 85 mJ/m², elastisite modülü(E_f): 0.55 MPa).

Eş.2.2’de belirtilen adezyon kuvveti denkleminde; aynı yüzey üzerinde aynı fiber kullanılırken çap düşürüldüğünde yapışma kuvveti de düşmektedir. Ancak bu sonuca dayanarak fiberlerin büyütülmesi gerektiği sonucuna varılmamalıdır, çünkü burada adezyon basıncına bakmak daha doğru olacaktır. Bu yüzden Eş.2.2’deki denklem, birim alandaki kuvvetini (adezyon basıncını ” σ_c ”) bulmak için Eş.2.4’deki gibi modifiye edilir;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{6Kw_f}{\pi a}} \quad (\text{Pa}) \quad (2.4)$$

Buna göre fiber yarıçapının küçülmesi ile Şekil 2.4’den de görülebileceği gibi adezyon basıncı artmaktadır ve bu değerler yukarıda özellikleri verilen bir fiber için teorik adezyon limitini temsil etmektedir. Eş.2.4’de fiber yarıçapını (a) “a/2” olarak aldığımızda adezyon basıncı (σ_c) $\sqrt{2}$ oranında artar, “a” değerini “a/3” olarak alınırsa adezyon basıncı (σ_c) $\sqrt{3}$ oranında artmaktadır. Buna göre “a” değeri N parçaya bölünüp, a değeri “a/N” olarak alınırsa adezyon basıncı \sqrt{N} oranında

artmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta da; bir fiber dizininin, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı, her bir fiberin bağımsız olarak pozisyonlanmasından dolayı hiçbir zaman bu değerlere ulaşamayacağıdır.

Malzeme	E Elastikiyet Katsayısı (GPa)	v Poisson Katsayısı
Elastomer	0.00055	0.5
Tahta	12	0.05
Beton	25	0.15
Alüminyum	70	0.33
Cam	60	0.25
Demir	200	0.28

Çizelge 2.1 Tırmanan robotların kullanılacağı olası yüzeyler ve yüzeylerin özellikleri.

Çizelge 2.1’de verilen yüzeyler ve özellikleri kullanılarak efektif elastikiyet katsayısı hesaplanabilir. Bu tez kapsamında tırmanılması planlanan yüzeylerin elastikiyet katsayıları elastomerlerinkinden binlerce kat daha fazladır. Bu yüzden “Eş.2.5”da verilen denklem, “Eş.2.6”daki gibi sadeleştirilebilir.

$$K = \frac{4}{3} \left[\frac{E_s E_f}{(1-\nu_s^2)E_f + (1-\nu_f^2)E_s} \right] \quad (\text{Pa}) \quad (2.5)$$

$$K \cong \frac{4}{3} \left[\frac{E_f}{(1-\nu_f^2)} \right] \quad (\text{Pa}) \quad (2.6)$$

Buna göre efektif elastikiyet katsayısı, yüzeylere göre çok daha yumuşak bir fiber kullanıldığında, fiber özellikleri tarafından belirlenir. Örneğin; elastisite modülü (E_f) 1 MPa olan bir fiberin efektif elastikiyet katsayısı (K) 1.78 MPa değeri civarında olacaktır.

Bir fiber çekildiğinde yüzeye değen kısmı her yönde sabitlenmiş, çekilen ucu ise sadece uzama ve kısalmaya yönlerinde hareket edebilen silindirik bir yapı olarak modellenebilir. Buna göre fiber üzerinde meydana gelen çekme basıncı “Eş.2.17”de belirtildiği gibi olur ;

$$\sigma_{av} = \frac{P_n}{\pi a^2} \quad (\text{Pa}) \quad (2.7)$$

σ_{av} : Ortalama çekme basıncı, P_n : Fiber üzerindeki dik kuvvet olacak şekilde ifade edilebilir. Rijit düz baskı denkleminde elde edilen tek bir fiber için maksimum adezyon değeri kullanılarak bir fiberin ortalama çekme basıncı ve uzama/kısalma miktarı bulunabilir. Bu uzama ve/veya kısalma miktarının bulunması pürüzlü yüzeylere uyum ve fiber dizininin toplam adezyon kuvvetinin hesaplanabilmesi açısından önemlidir. Bir fiber için uzama ve kısalma yönündeki esneklik katsayısı, [15] (k_n);

$$k_n = \frac{\pi a^2 E_f}{h} \quad (\text{N/m}) \quad (2.8)$$

h : Fiber uzunluğu(boyu) olmak üzere bulunabilir.

Bu durumda bir fiber dizini için toplam adezyon kuvveti (P_n) [15]

$$\sum_{i=1}^n P_n = k_n \delta_n \quad (\text{N}) \quad (2.9)$$

δ : deplasman olmak üzere bulunabilir. (' P_n ' değeri fiber sıkışma anında iken +, gerilme durumunda iken - olarak seçilmiştir). Bu denklem aslında Hooke kanunundan türetilmiştir ve fiberin uzaması ile, elde edilen adezyon kuvvetinin artacağını göstermektedir. Burada her bir fiberin adezyona katkısı, deplasmanı ile yakından ilişkilidir. Bütün bir fiber dizininin aynı malzemedeki aynı boyutlarda üretilmiş olması durumunda yukarıdaki denklem şu şekilde sadeleştirilebilir;

$$\sum_{i=1}^n P_n = k \delta_n \quad (\text{N}) \quad (2.10)$$

Özellikle dikkat edilmesi gereken bir başka nokta ise sıkışma kuvvetinin altındaki fiberin burkulma ihtimalidir (buckling). Bu durum Euler'in burkulma formülü kullanılarak "Eş.2.11" deki gibi yazılabilir;

$$P_{cr} = \frac{\pi^3 E_f a^4}{h^2} \quad (\text{N}) \quad (2.11)$$

hesaplanabilir. P_{cr} , fiberin burkulacağı kritik kuvvet değerini göstermektedir. Bu değer kullanılarak, burkulma öncesi fiberin sıkışma miktarını da hesaplamak mümkün olmaktadır. Buna göre fiberin kritik sıkışma miktarı (δ_{cr});

$$\delta_{cr} = \frac{P_{cr}}{k_n} \quad (\text{m}) \quad (2.12)$$

olarak bulunabilir.

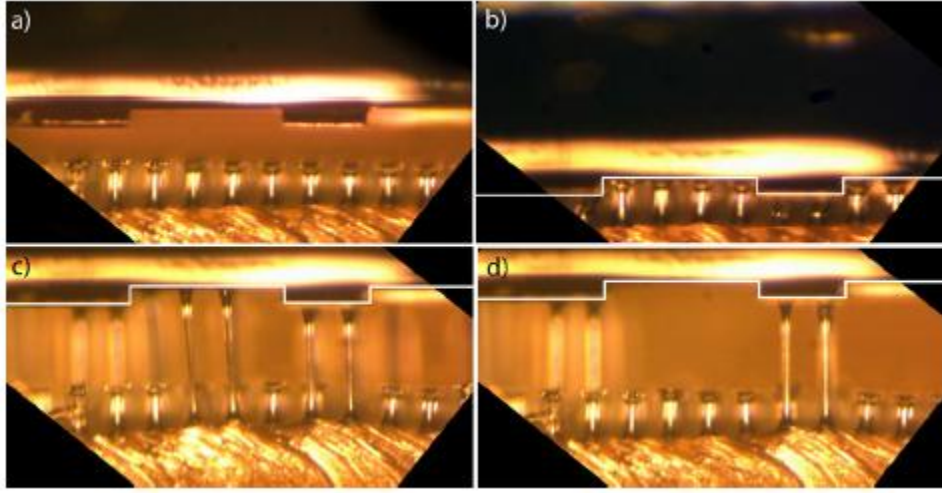
Tek bir fiberin yüzey ile yaptığı adezyon denklemi Eş.2.2'deki gibi ifade edilmekteydi, PDMS malzemesinin seçimi ve kullanılacağı yüzeyin belirlenmesi ile birlikte K ve w değerleri değişken olmaktan çıkmaktadır. Burada geriye kalan tek değişken yarıçaptır ve yüksek adezyon için; fiber yarıçapı "a" minimum olmalıdır. Ancak burada, Eş.2.11'de belirtilen burkulma denklemi [15] de olası problemlerin önüne geçmek için göz önünde bulundurulmalıdır.

2.3 Fiber Dizini Adezyon Modeli

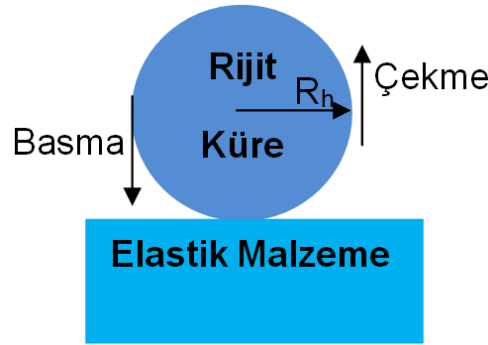
Fiber dizinindeki toplam adezyon kuvveti bir fiberin adezyon kuvvetinin fiber sayısı ile çarpımına eşit olmamaktadır. Bunun en büyük sebebi; fiberlerin dokundukları yüzeylerden dolayı farklı deplasmanlara sahip olmalarıdır. Bu deplasman değerleri ile fiberlerin esneklik katsayılarının çarpımlarının toplamı bir fiber dizininin sahip olduğu toplam adezyon kuvvetine eşit olmaktadır. Bu adezyon kuvveti;

- fiber geometrisine,
- fiberler arası uzaklığa (d),
- yüzey pürüzlülüğüne,
- fiber çapına (2a),
- fiber en/boy oranına ($\lambda=h/2a$),
- fiber malzeme çeşidine bağlıdır.

Bir fiber dizininde gerçekleşen adezyon kuvvetlerinin toplamı, Şekil 2.5'de görüleceği gibi, o dizin içerisindeki her bir fiberde meydana gelen deformasyonlardan kaynaklı kuvvetlerin toplamına eşittir [29]. Buna göre bir fiber dizinindeki toplam kuvvet Eş.2.10 ile ifade edilebilir.



Şekil 2.5. Yükseklik farkı olan bir yüzeyde adezyon testi mikroskop görüntüleri, a) fiber dizini ile yüzey birbirlerine yaklaştırılıyor, b) fiber dizini ile yüzey arasında temas gerçekleşiyor, c) yüzey fiber dizinlerinden uzaklaştırılıyor, d) yüzey fiber dizinlerinden iyice uzaklaştırılıyor (fiberler ilk uzunluklarınının 6 katında çıkıyor) [29].



Şekil 2.6. JKR adezyon modeli

Yapışkan malzemeler ile yapılan bir çok deneyde, malzemelerden elde edilen adezyonun ön yüklemeye bağlı olarak değiştiği görülmüştür. JKR modelinde bulunan adezyon kuvveti (P_c) ise ön yükleme kuvvetine göre değişmez [30]; JKR modelinde bulunan adezyon kuvveti (P_c), tam doyuma ulaşmış adezyon kuvveti değeridir, başka bir deyişle bulunabilecek en yüksek adezyon kuvvetidir. Eş.2.13'de gösterilen JKR modelinde, Şekil 2.6'daki gibi, yarıçapı ' R_n ' olan rijit bir küre, elastik bir malzemeye tam doyuma ulaşacak şekilde bastırılıp temas eder, daha sonra bu malzemedan çekildiğinde '-' yönlü (çekme yönünde) bir " P_c " çekme kuvveti oluşur, bu kuvvet bu elastik malzemedan elde edilebilecek en yüksek (doyuma ulaşmış) adezyon kuvvetidir.

$$P_c = \frac{3}{2} * w_f * \pi * R_h \quad (N) \quad (2.13)$$

w_f : Adezyon enerjisi (J/m²)

R_h : Rijit kürenin yarı çapı (m)

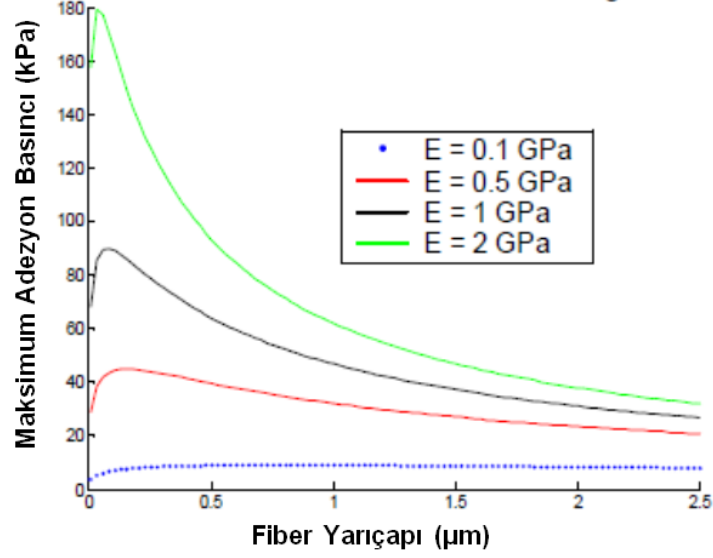
P_c : Adezyon kuvveti (N)

Fiberli yapılara uygulanan ön yükleme ile birlikte fiberlerin vermiş olduğu yapışma kuvveti de artar, fakat belirli bir değerden sonra ön yüklemenin daha da artırılması adezyonu etkilemez. Bunun sebebi; fiberlerin tümüyle yüzey alanına dokunarak doyuma ulaşmalarıdır. Sonuç olarak JKR modeline göre yay modeli ile yapılan teorik hesaplamalar düşük ön yükleme kuvvetlerinde çok daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. JKR modeli ise daha çok doyuma ulaşmış yapışkanlık kuvvetlerinin tahmininde kullanılabilir. Bu sebeple, bu tez kapsamında, sistemin matematiksel modelini oluştururken, tırmanan robotlarda özellikle değişen ön yüklemeye bağlı olarak adezyonun değişimleri gerçekleşeceği için, temas mekaniği, yüzey etkileşim kuvvetleri ve elastik kırış teoremlerinin temel kuralları kullanılacaktır [30].

Burada fiberlerin kullanılacağı alan seçildikten sonra öne çıkan tek parametre fiber çaplarının olabildiğince küçük olması ve fiberlerin olabildiğince çok sayıda olması. Bir başka deyişle; fiber yarıçapı 'a' ve fiberler arası uzaklık 'd', minimum değer seçilmelidir.

2.3.1 Fiber Çapının Adezyona Etkisi

Daha önce Eş.2.8 açıklanırken de bahsedildiği gibi; tek bir fiber için adezyon basıncını belirten Eş.2.8'deki yarıçap 'a' değeri N parçaya bölünüp, 'a/N' olarak yazılırsa, adezyon basıncı \sqrt{N} oranında artmaktadır. Buna göre bir yüzeye temas eden başka bir yüzey, daha küçük parçalara ayrılırsa adezyon kuvveti \sqrt{N} (N: Bölünen parça sayısı) oranında artmaktadır [17]. Bu durum büyük tırmanan canlıların neden daha küçük çapta fiberlerinin olduğunun bir kanıtı olarak gösterilebilir [18-19]. Buna göre fiber yarıçapının küçülmesi ile Şekil 2.7'den de görülebileceği gibi adezyon basıncı artmaktadır.



Şekil 2.7.Farklı elastisite modülüslerine sahip fiberlerin yarıçaplarının adezyon basıncına göre değişim grafiği [31].

Elastisite modülü daha yüksek fiber malzemesi kullanımı ile de Şekil 2.7'deki gibi teorik olarak adezyon artmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken konu pratikte bu durumun doğru olmayabileceğidir, çünkü; daha sert bir malzeme, özellikle boyutu mikrometreler mertebesinde ise, yüzeydeki pürüzlülüğe uyum sağlayamamakta, efektif temas alanı azalmakta ve adezyon beklenenden onlarca kat daha düşük gerçekleşmektedir.

Teorik hesaplara göre fiber dizinlerinde yüksek yapışma kuvveti elde etmek için, fiberler malzemesinin sert seçilmesi ve çapının 200nm civarında olması gerekmektedir [31]. Ancak fiberler inceldikçe mukavemetleri azalır. Bir başka deyişle; fiberi yapıştığı yüzeyden çekmek için kullanılan kuvvet, fiberin kırılma mukavemetini geçebilir ve sonucunda küçük çaplı fiberler yüzeyden ayrılmadan kopabilirler [33]. Günümüzde kullanılan fiber malzemeleri birçok sebepten dolayı henüz doğadaki kadar yüksek elastisite modülüne sahip değildirler. Bundan dolayı çok küçük fiberlerde testler sırasında kopmalar gözlenmektedir. Bu yüzden fiberler kopmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bir başka deyişle fiberin adezyon basıncı, fiberin mukavemetinden yüksek olmamalıdır (Eş.2.14). Buna göre;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{6Kw}{\pi a}} < \sigma_{UTS} \quad (\text{Pa}) \quad (2.14)$$

ya da bu denklem, "Eş.2.15"deki gibi de ifade edilebilir.

$$a > \frac{6Kw}{\pi\sigma_{UTS}^2} \quad (m) \quad (2.15)$$

σ_{UTS} çekme dayanımı olacak şekilde ifade edebilir. Bu denklem tırmanan robotlarda ve adezyon testlerinde sıklıkla kullanılan bir malzeme olan PDMS (Polydimethylsiloxane) $K=0.97$ MPa, $w_f = 85$ mJ/m² (Bkz. Bölüm 3.8) ve $\sigma_{UTS} = 2.24$ Mpa [57] kullanıldığında minimum fiber çapı olarak 0.53 μ m değerini vermektedir.

Sonuç olarak;

- Fiberler olabildiğince küçük boyutlarda üretilmelidir,
- Fiberler olabildiğince sert malzemeden üretilmelidir,
- Fiberler sert malzemeden üretilirse çapları yüzey pürüzlülüğünden etkilenmeyecek kadar küçük olmalıdır,
- Fiberler PDMS gibi yumuşak bir malzemeden üretilirse fiberlerde kopmaların olmaması için 0.53 μ m çapından daha büyük boyutlarda üretilmelidir.

Literatürde yer alan bazı fiber malzemeleri ve fiber çaplarından oluşturulmuş Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. Bu çizelgeye göre fiberler genelde 5-20 μ m çapları arasında üretilmiştir.

Kaynak	Fiber Yarıçapı	Fiber Malzemesi
15	10-15 μ m	Poliüretan
29	Gövde çapı 57 μ m , 114 μ m (uç çapı), fiberler dik konuma göre 13 derecelik açı yapmaktadır	-
30	Fiber yarıçapları 2.5, 5, 10, 25 μ m (çap/boy oranı=1)	PDMS
31	100nm (Matematiksel model)	Deney yapılmamıştır
32	Gövde çapı 57 μ m, mantar uç çapı 114 μ m	PDMS
35	100 nm (Matematiksel model)	Deney yapılmamıştır
36	5-100 μ m	F-15 (200 kPa), ST-1060 (2.9 MPa), and ST-1087 (9.8 MPa)
37	10 μ m x 10 μ m kare fiber	PDMS
38	5 μ m gövde, 9 μ m uç çapı	Poliüretan ST-1060

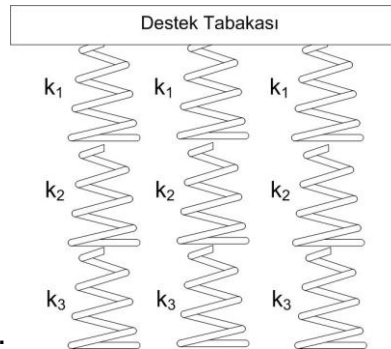
39	20 µm, 25 µm	PDMS
40	0.01-100µm (matematiksel model)	Deney yapılmamıştır
41	10 µm	Deney yapılmamıştır
42	2.5, 5, 10, 25 µm	PDMS
43	2.25 µm	-
44	0.6 µm çap	PP

Çizelge 2.2.Literatürde yer alan fiberler malzemelerine göre fiber çapları karşılaştırma tablosu

Teorik hesaplara göre fiber dizinlerinde yüksek yapışma kuvveti elde etmek için, fiber malzemesi sert bir malzemeden seçilmeli ve çapı 200nm civarında olmalıdır [31]. Ancak fiberler inceldikçe mukavemetleri azalır ve yüzeyden ayrılırken kırılabilirler. Bu yüzden, Eş.2.14'de de belirtildiği gibi; fiber adezyon kuvveti fiber mukavemetinden yüksek olmamalıdır. Buna göre Eş.2.14 kullanılarak, PDMS'in kullanıldığı durumlarda minimum fiber yarıçapı "a > 0.5 µm" olmaktadır.

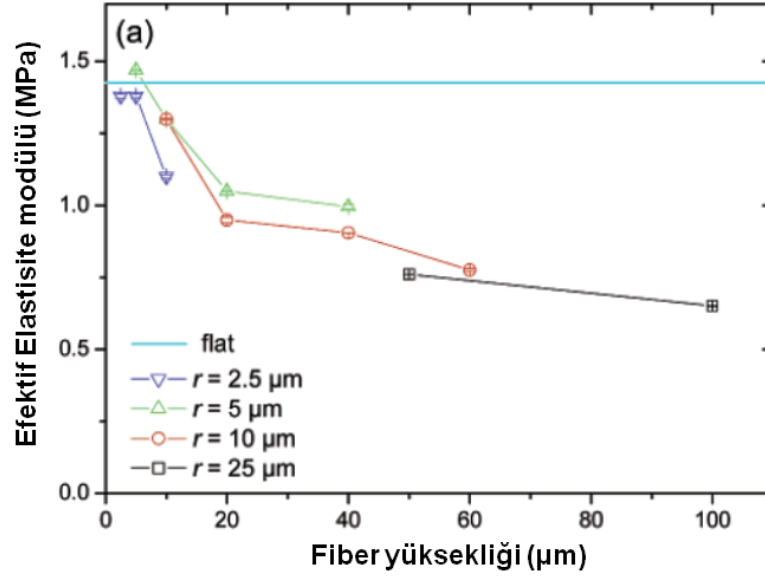
2.3.2 Fiber Boy/En Oranının Adezyona Etkisi

Doğadaki tırmanan canlılara bakıldığında fiberlerin boy/en oranı ($\lambda = h/2a$) yüksektir ve canlının ağırlığının artması ile bu oran daha da yükselir. Örneğin Gekko'nun fiber boy/en oranı ortalama 20'dir [35], ve 30'a kadar çıkabilir [23]. Bunun en büyük sebebi Şekil 2.8'den görülebileceği gibi ve bu durumun Eş.2.16'da belirtildiği gibi uzunluğun birbirlerine seri bağlanmış birçok yay gibi davranarak toplamdaki esneklik katsayısını düşürmesidir.



Şekil 2.8. Boy/en oranı yüksek fiberlerin matematiksel modeli gösterimi.

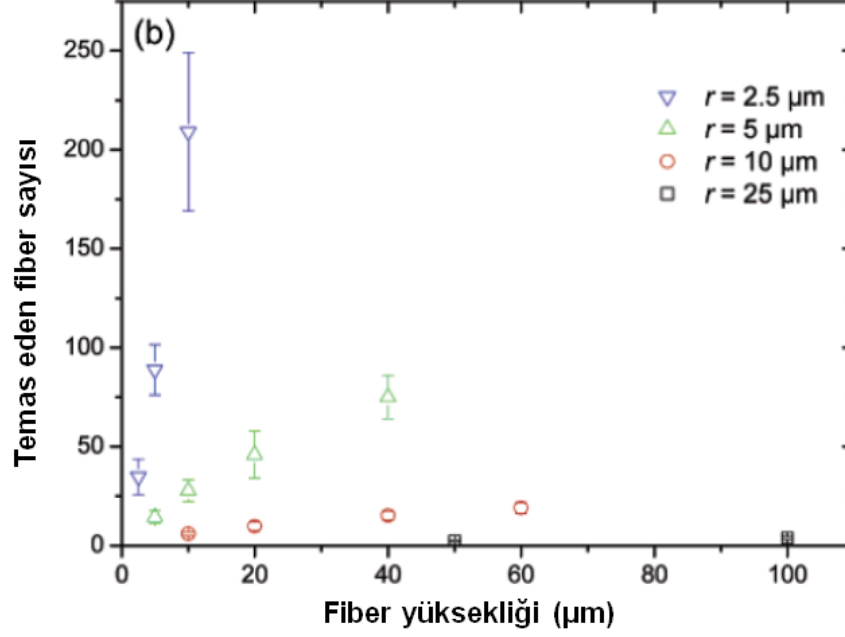
$$\frac{1}{k_t} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (\text{m/N}) \quad (2.16)$$



Şekil 2.9. Aynı malzemeden üretilmiş, farklı çaplardaki fiberlerin, farklı boylarda üretilmesi ile oluşan deneysel efektif elastisite modül değerleri [30,46].

Şekil 2.9'da gösterildiği gibi; fiberlerin boy/en oranları arttıkça, fiberlerin efektif elastisite modülleri belirgin bir şekilde azalmaktadır [30,46]. Aynı zamanda fiber boyu arttıkça yüzeye değen fiber sayısı Şekil 2.10'da gösterildiği gibi artmaktadır ve buna bağlı olarak toplam adezyon artmaktadır. Bunun sebebi, fiber dizinlerinin yüzeyden çekilmeleri sırasında fiberlerin yüksek elastik enerjisinin harcanmasından kaynaklanmaktadır [30,42,48].

Elastisite modülü yüksek bir malzemenin yüzeye belirli bir önyüklemeye ile bastırılması sonucunda, yüzeyde var olan pürüzden dolayı, bu malzemenin çok az bir alanı yüzey ile temas eder, bu durumda toplam adezyon kuvveti de efektif alan oranınca çok düşük olur. Ön yüklemeye artırılarak yüzeye temas eden efektif alan artırılabilir ancak önyüklemeye kaldırıldığında pürüzlü yüzeye uyum sağlayabilmek için deforme olmuş (elastik deformasyon enerjisi depolamış) malzeme gevşeyip başlangıçtaki şekline dönmek ister. Eğer elastik deformasyon enerjisi adezyon enerjisinden büyük ise malzeme hiçbir yapışma belirtisi göstermeden kendiliğinden yüzeyden ayrılır. Ancak bu malzeme yüksek boy/en oranlı fiberli yapılar ile tasarlanırsa rahatça deforme olarak yüzeye uyum sağlar (efektif temas alanı yüksek olur) ve üzerindeki net kuvvet fiberi yüzeyde tutabilir. Sonuç olarak; esnekliğin artması ile yüzey pürüzlülüğüne olan uyum da artar.

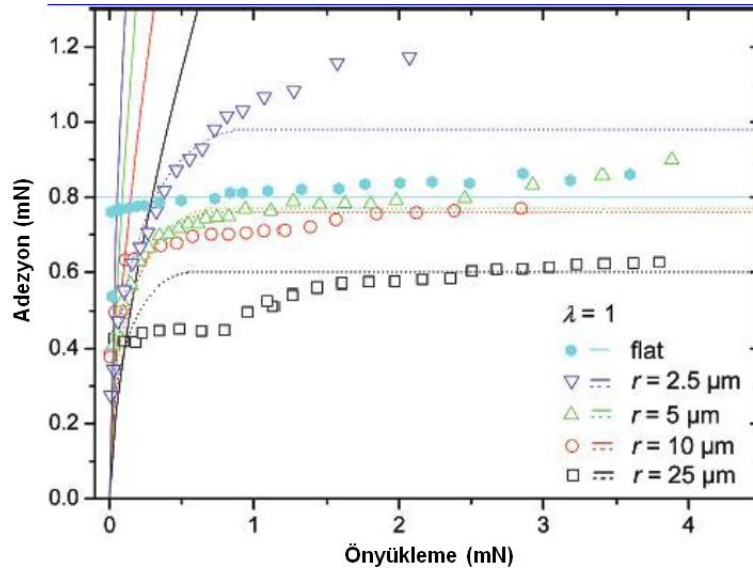


Şekil 2.10 Fiber dizinlerinde bulunan farklı çaplarda ve uzunluklardaki fiberlerin yüzeye temas etme sayısı. [30]

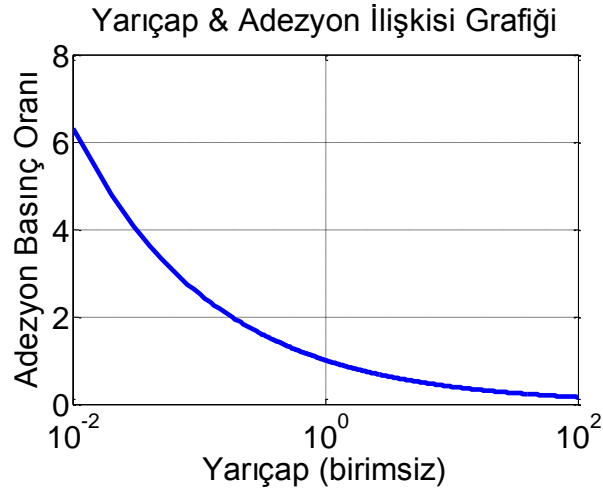
Şekil 2.11’de $a = 2.5, 5, 10, 25 \mu\text{m}$ ve $\lambda = 1$ olan fiberlerin ve düz bir elastomerin belirli bir ön yükleme altında verdikleri yapışma kuvvetleri gösterilmiştir [30,45]. Buna göre boy/en oranları aynı ancak çapları farklı olan fiber dizinlerinde, daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, çap küçüldükçe adezyon artmaktadır. Sabit boy/en oranındaki fiberlerin yarıçap ile değişen adezyon basıncı teorik olarak $r^{-0.4}$ ile orantılıdır [17]. Bu durumun grafiği logaritmik olarak çizdirilerek Şekil 2.12’de gösterilmiştir (bkz. Ek 4). Fiberlerin farklı boy/en oranına göre adezyonu basıncı $\lambda^{0.3}$ ile orantılıdır [30]. Bu durumun grafiği de logaritmik olarak çizdirilerek Şekil 2.13’de gösterilmiştir (bkz. Ek 4).

Fiber boy/en oranının artması ile fiber dizininin efektif elastikiyet katsayısı düşer ve adezyon artar. Ancak belirli bir orandan sonra fiberler kullanım sırasında birbirlerine yapışabilirler (çökme). Bu durum boy/en oranının üst sınırını belirlemektedir [47]. Teorik tahminlere uygun olarak yapılan deneylerde $\lambda > 5$ olan fiberlerde bozulmalar, yapışmalar ve kopmalar gözlenmiştir [49]. Literatürde yer alan ve PDMS’ten üretilen fiber dizinleri ise genelde $2.5 - 25 \mu\text{m}$ çaplarında ve $\lambda = 0.5 - 4$ boy/en oranlarında üretilmiştir. $\lambda > 4$ ve $a < 2.5 \mu\text{m}$ olacak şekilde üretilen fiberler genelde kalıptan çıkarılırken zarar görmüşlerdir [30]. PDMS için maksimum boy/en oranı, malzemenin mekanik özellikleri ve yüzeyde yayıldığı alana bağlı

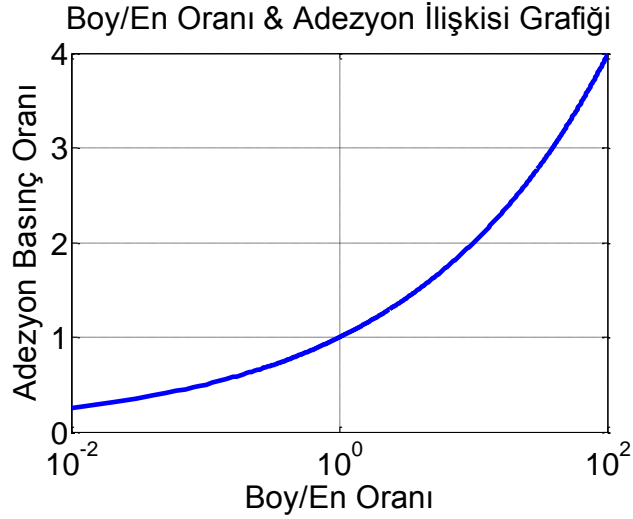
olarak $\lambda=3.5$ olarak bulunmuştur [46]. Bu bilgiler ışığında, bu tez kapsamında boy en oranını; $\lambda < 3$ olacak şekilde fiberlerin üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.11. Boy/en oranı "1" olan farklı çaplardaki fiberlerin aynı yüzey üzerindeki yapışma kuvvetleri. Farklı renlerdeki üçgen, yuvarlak, kare ve ters üçgen şekilleri deneysel sonuçları, noktalı çizgiler ise yay modeline göre bulunan teorik sonuçları göstermektedir [30].



Şekil 2.12 Teorik olarak değişen fiber yarıçapının adezyon basıncı oranı ile değişimi



Şekil 2.13 Teorik olarak değişen boy/en oranının adezyona etkisi grafiği.

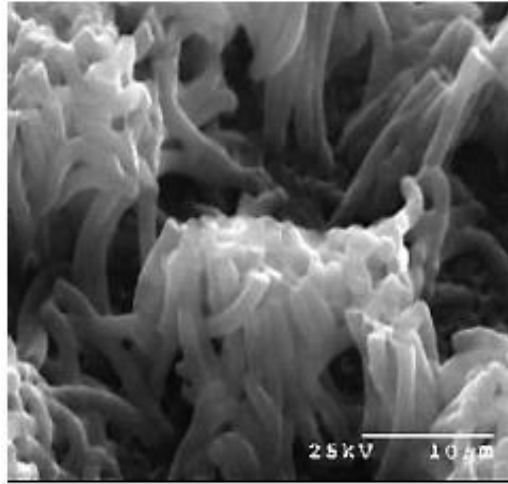
Literatürde yer alan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir;

- Fiber boy/en oranının artması ile adezyon artar. Ancak belirli bir orandan sonra fiberler kullanım sırasında birbirlerine yapışabilirler (çökme). Bu durum boy/en oranının üst sınırını belirlemektedir [47] (Bölüm 2.3.3'de açıklanmıştır.)
- Fiberler arası çökme olduğu takdirde beklenen yapışma kuvvetleri elde edilememektedir [49].
- Teorik tahminlere uygun olarak yapılan deneylerde $\lambda > 5$ olan fiberlerde bozulmalar, yapışmalar ve kopmalar gözlenmiştir.[49]
- PDMS'ten üretilen fiber dizinleri genelde 2.5 – 25 μm çaplarında ve $\lambda = 0.5 - 4$ oranlarındadır.[30]
- $\lambda > 4$ ve $a < 2.5 \mu\text{m}$ için fiberler kalıplardan çıkarılırken genelde koparlar, bu yüzden üretimde bu oranlara dikkat edilmelidir.[30]
- PDMS için maksimum boy/en oranı, malzemenin mekanik özellikleri ve yüzeyde yayıldığı alana bağlı olarak, 3.5 olarak bulunmuştur [46].

2.3.3 Fiber Yerleştirme ve Çökme Modeli

Fiberler eğer çok büyük boy/en oranı ile üretilirse birbirleri arasında oluşan çekim kuvvetlerinden ya da yüzeye temaslarında gerçekleşen ufak esnemeler sonrasında birbirleri ile temas ederek yapışabilirler. Bu yapışma durumuna fiber çökmesi denmektedir. Şekil 2.14'de bu durum gösterilmiştir. Bu durum toplamdaki yapışma kuvvetini düşüreceği için istenmemektedir. Dolayısı ile fiberler arası

uzaklık ve en/boy oranı optimize edilerek olabilecek en yüksek yapışma kuvveti elde edilmeye çalışılmalıdır.



Şekil 2.14. Fiberlerin birbirleri ile kenetlenme durumu (çökme) [43].

Toplam adezyonu etkileyen bir diğer parametre de birim alandaki fiber sayısıdır. Yüksek adezyon için olabildiğince fazla fiber kullanılmalıdır. Fiber çökmesi fiberlerin malzeme özelliklerine ve geometrik şekillerine bağlıdır. Çökme durumunda fiberler bir daha dik konumlarına gelemezler ve beklenen adezyon kuvvetleri önemli ölçüde düşer. Bu yüzden fiberler çökme olmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Dolayısı ile fiberler arası mesafe, fiber yumuşaklığı ve en/boy oranı azami adezyon için bir optimizasyon sorusunu oluşturmaktadır.

Bu durum Eş.2.17'deki model ile kontrol altında tutulabilir [15];

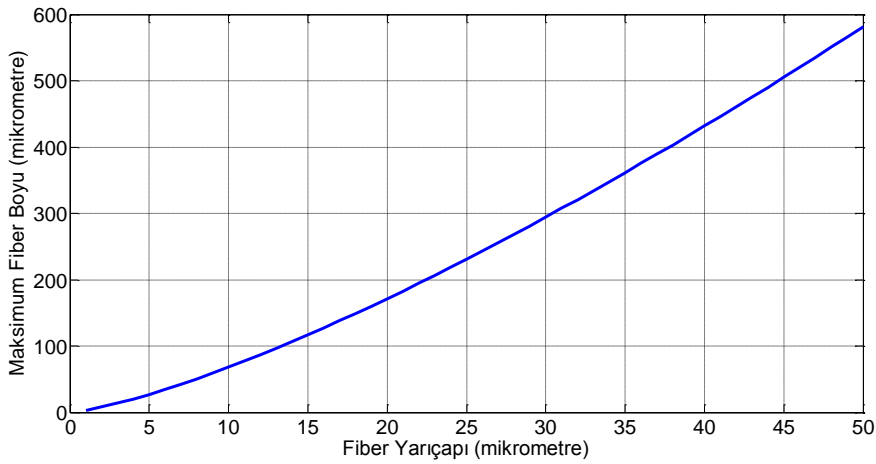
$$\left[\frac{\pi^4 E_f^* a}{2^{11} \gamma_f} \right]^{1/12} \left[\frac{3 E_f a^3 d^2}{\gamma_f} \right]^{1/4} > h \quad (\text{m}) \quad (2.17)$$

$$E_f^* = \left[\frac{E_f}{(1-\nu_f^2)} \right] \quad (\text{Pa}) \quad (2.18)$$

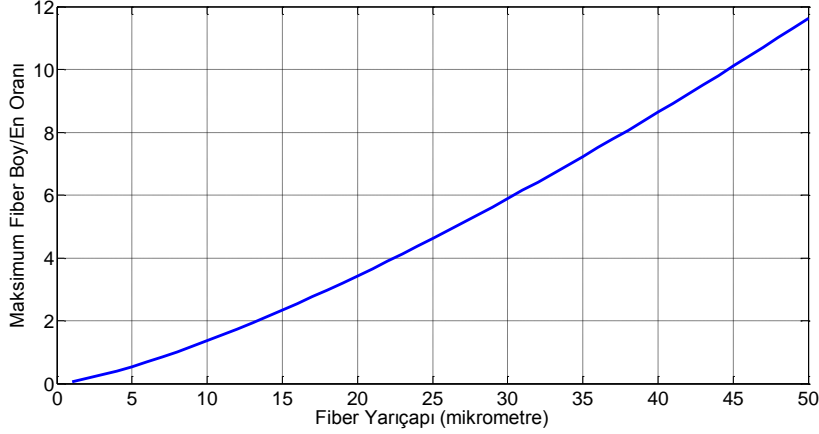
Bu eşitliklerde “ γ_f ” fiber malzemesi yüzey enerjisini (PDMS için 20 mJ/m² [59] [60]), “a” fiber yarıçapını, “ ν_f ” fiberin poisson sabitini, “d” fiberler arası kenardan kenara uzaklığını ve “h” fiber boyunu, belirtmektedir. Fiberler arası çökme olmaması için olabilecek maksimum fiber boyu Eş.2.17 ile kontrol altında tutulur. Buna göre; PDMS malzemesinin seçilmesi ile birlikte, olabilecek maksimum fiber boyu, a ve d değişkenlerine göre belirlenebilir.

Yüksek adezyon basıncı için; fiberler arası boşluğu(d) minimize edip, birim alandaki fiber sayısını en üst seviyede tutmak gerekmektedir. Bunun için olabilecek minimum fiberler arası boşluk (d_{min}) değeri, Eş.2.17'inden "d" bilinmeyi çekilerek, Eş.2.19'daki gibi elde edilir. Buna göre; birim alandaki fiber yoğunluğunu en üst seviyede tutmayı sağlayacak, fiber yarıçapı (a) ve fiber yüksekliği (h) değişkenlerine bağlı olarak yazılan minimum fiberler arası boşluk (d_{min}) değeri Eş.2.19'daki gibi bulunur.

$$d_{min} = \sqrt{\frac{\left(\frac{h}{\left[\frac{\pi^4 E_f^* a}{2^{11} \gamma_f}\right]^{1/12}}\right)^4}{\frac{3E_f a^3}{\gamma_f}}} \quad (m) \quad (2.19)$$



Şekil 2.15 Farklı yarıçaplardaki fiberlerin çökme olmadan sahip olabilecekleri en uzun boy grafiği (Elastikiyet sabiti=0.55 MPa, Poisson oranı=0.5, PDMS için Yüzey enerjisi 20 mJ/m² [59-60], d=a)

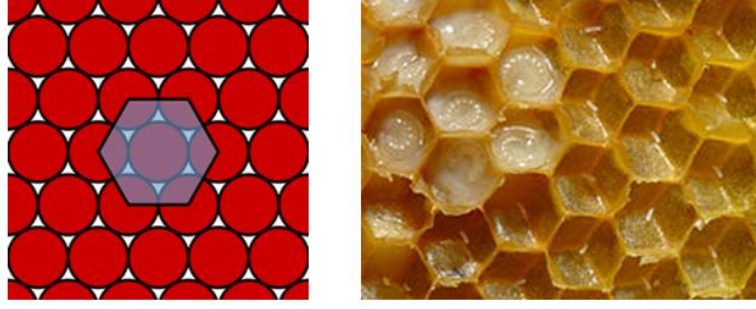


Şekil 2.16 Farklı yarıçaplardaki fiberlerin çökme olmadan sahip olabilecekleri en yüksek boy/en oranı grafiği (Elastikiyet sabiti=0.55 Mpa, Poisson oranı=0.5, PDMS Yüzey enerjisi 20 mJ/m², d=a)

Eş.2.19'a göre belirli bir çapta (2a) ve boyda (h) seçilen fiber için fiberler arası uzaklık (d) birbirlerine bağımlı iki parametre haline gelmektedir. Bu yüzden yukarıda verilen denklem kullanılarak adezyonu maksimize edecek bir optimizasyon yapılmalıdır.

Burada optimize edilmesi gereken bir başka parametre de fiberler arası mesafeyi asgari düzeye çekerek azami sayıda fiberi birim alana sığdıracak yapı şeklidir. Bu tez kapsamında tasarlamayı ve üretmeyi planladığımız robotun fiber dizinlerinin tutunacağı destek tabakası dikdörtgen şeklinde olacaktır. Bu yüzden bu problem yeniden şu şekilde tanımlanmalıdır: Herhangi bir boyuttaki dikdörtgen içerisine hangi yerleşim planı ile verilen çaptaki çemberler (fiberler) yerleştirilirse azami sayıda sığdırılmış olur. Bu soru 1773 yılında Joseph Louis Lagrange tarafından çözülmüştür [68]. Buna göre merkezde bir çember kalacak şekilde etrafında bir altıgen oluşturan çemberler dikdörtgen şeklindeki bir alanı Şekil 2.17'den de görülebileceği gibi azami şekilde doldurabilirler. Buradaki yüzey alanı kaplama oranı 90.7 % civarındadır.

Eş.2.19 kullanılarak, farklı fiber çapları ve fiber uzunlukları (boyları) için bulunan minimum fiberler arası boşluk (d) değeri ile birlikte, fiberler bal peteğine benzer altıgen şekillerde konumlandırıldıklarında; birim alanda maksimum sayıda fiber yerleşimi sağlanmaktadır.

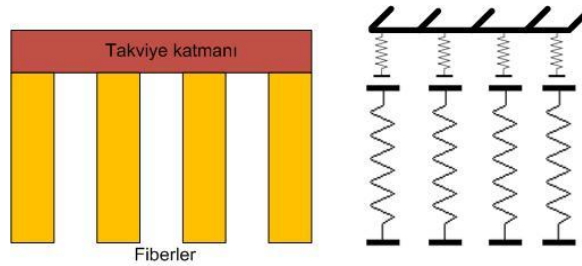


Şekil 2.17 Fiberlerin dikdörtgensel bir alana olabilecek en yoğun şekliyle sığdırılma şekli.

Bu sebeple bu tezde, Şekil 2.17’de gösterildiği gibi, fiber yerleşim düzeneği olarak bal peteği şeklini kullanılmıştır.

2.3.4 Takviye katmanı

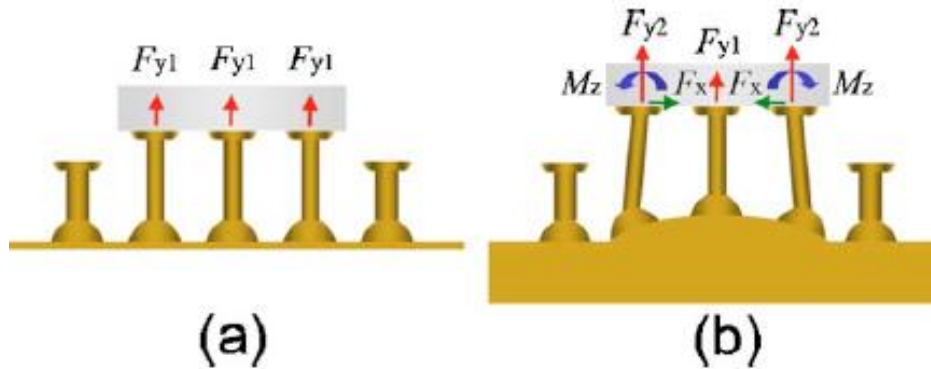
Takviye katmanı, Şekil 2.18’de görülebileceği gibi, fiberlerin üzerine tutunduğu ve belirli bir kalınlığı olan düz elastomerik yapıdır. Üretilen fiberlerin takviye katmanı, fiberler ile aynı malzemedendir. Bu yapının kalınlığı, fiberlere seri olarak bağlanmasından dolayı, genel esnekliği etkiler ve aynı zamanda fiberler arası oluşabilecek seviye farkını da belirleyen en temel etkindir. Belirli bir kalınlığın üzerindeki takviye katmanı fiberlerin esnekliğine baskın gelir ve tek başına esnekliği belirler, bu sayede fiber dizinlerinin pürüzlü yüzeylere olan uyumunu azaltır.



Şekil 2.18 Takviye katmanı ile birlikte gösterilmiş fiberler ve basit mekanik eşlenik yapısı (statik pozisyonda çizildiği için viskoelastik polimerlerde yer alan amortisör kısmı ihmal edilmiştir).

Destek katmanı, sistemin toplam esnekliğini etkilediği için fiber dizinlerinin özellikle pürüzlü yüzeylere uyumunda büyük rol oynar. Şekil 2.18’de fiber dizini ile takviye katmanının yarı-durgun pozisyonu için basit bir matematiksel modeli verilmiştir.

Kalın bir destek tabakası (takviye katmanı), Şekil 2.18'de sağdaki şekilde görüldüğü gibi fiberlere seri bağlı yay görevi yapar ve fiberlerin toplam esnekliği düşürür. Bu sayede, kalın bir destek tabakasına sahip fiber dizinleri, aynı kuvvet ile daha çok şekil değiştirerek yüzeylere daha kolay uyum sağlarlar. Bu yüzden pürüzlü yüzeylerde kalın bir destek tabakası kullanılmalıdır. Ancak, Şekil 2.19'da (sağda) görülebileceği gibi, kalın takviye katmanına sahip fiber dizinlerine, düz bir yüzey ile çekme kuvveti uygulandığında; bu fiberlerde çeşitli yatay kuvvetler (F_x) oluşmakta, buna bağlı olarak da momentler (M_z) oluşturmaktadır ve bu momentler, fiber dizininin toplam çekme kuvvetini (adezyon kuvvetini) belirgin bir oranda düşürmektedir [38]. İnce destek tabakasına sahip fiber dizinlerine düz bir yüzey ile çekme kuvveti uygulandığında ise (Şekil 2.19 solda); fiberlerde bu çekme kuvveti sadece dikey yönde oluşur (takviye katmanı ek bir yay görevi yapmamaktadır.). Bu durumun en büyük nedeni; fiberlerin birbirlerinden bağımsız olarak hareket edebilmesi ve eşit yük dağılımına (EYD) olanak vermesidir.

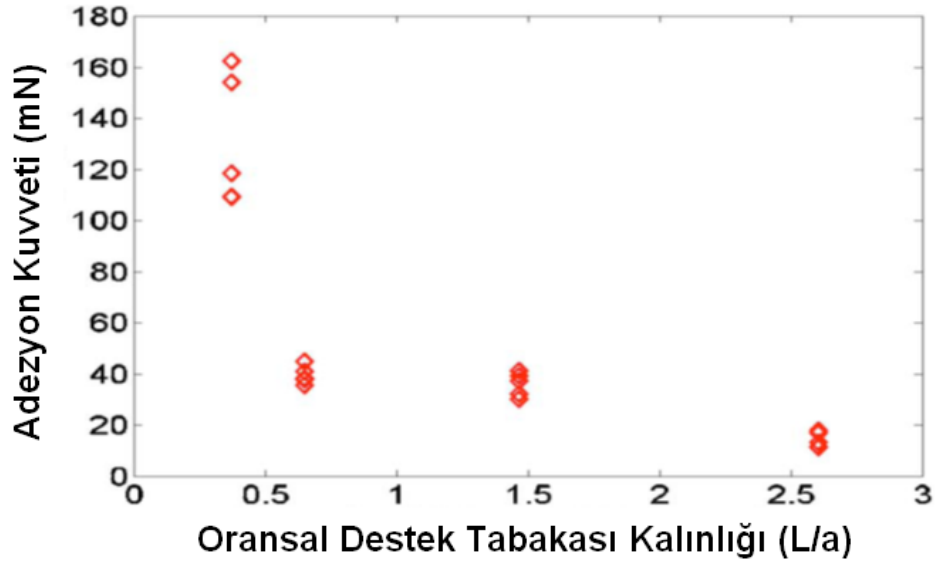


Şekil 2.19 Takviye katmanı kalınlığının fiberler üzerine etkisini gösteren şematik çizim, (a) fiber çaplarına oranla sonsuz incelikte takviye katmanı üzerindeki kuvvet dağılımı, (b) fiber çaplarına oranla sonsuz büyük kalınlıkta takviye katmanı üzerindeki kuvvet dağılımı.[38]

Şekil 2.19(a)'da sonsuz incelikteki destek katmanında bulunan fiberler çekildiğinde her birisi δ kadar hareket eder ve yükler eşit olarak dağılır (F_{y1}). Böylelikle, toplam adezyon $3F_{y1}$ olur.

Şekil 2.19(b)'de ise sonsuz kalınlıktaki $a \ll L_t$ destek katmanında bulunan fiberlerin malzemesi ve boyutları ilk durumdakiler ile aynı olduğu için eşit adezyon enerjileri verirler. Ancak deplasman başladığı zaman bu enerjinin bir kısmı özellikle pürüzlülüğü düşük ortamlarda moment (tork) dengelemesinde kullanılır. Bu yüzden dikey yöndeki kuvvetlerde bir düşüş yaşanır.

S.Kim ve M.Sitti yaptıkları bir araştırmada $L_t = 160-280-630$ ve $1120 \mu\text{m}$ kalınlığındaki destek tabakaları üzerlerinde eş fiber dizinleri bulunan örnekler üretmişler ve deneylerini yapmışlardır. Deneysel sonuçlara göre 10mN büyüklüğündeki bir ön yükleme ile $L=160 \mu\text{m}$ olan örnek $L_t=1120 \mu\text{m}$ olan örneğe göre dokuz kat daha fazla çekme kuvveti vermiştir. Bu deneylerin sonucu, Şekil 2.20'den de görülebileceği gibi, tabaka kalınlığı arttıkça fiberlerin adezyon kuvvetinin azaldığıdır.



Şekil 2.20 Düz yüzey üzerinde değişken L/a oranına karşılık gelen adezyon kuvvetinin dağılım grafiği (mantar uçlu, $h=20 \mu\text{m}$, gövde $a=5 \mu\text{m}$, uç $a=9 \mu\text{m}$, doluluk oranı 44%, mantar uçlu). [38]

Fiber destek katmanı pürüzlülüğü az yüzeyler için olabildiğince ince tasarlanmalı ve üretilmelidir, ancak bu tez kapsamında üretilecek ve tasarlanacak olan tırmanan robotun tırmanacağı yüzeyler farklılıklar göstermektedir. Dolayısı ile bu parametre üzerine daha fazla deneysel gerekmektedir. Ayrıca, robotun tırmanması sırasında oluşan yerçekiminden kaynaklı kayma gerilmeleri ve yapışma kuvvetleri de fiber destek tabakasının kalınlığının belirlenmesinde rol oynayacak parametrelerdendir.

2.3.5 Fiberlerin Elastik Özellikleri

Fiber-yüzey arayüzünün yapışkanlık özelliği için bir diğer önemli parametre de bu fiberleri yüzeyden ayırmak için gerekli enerjidir. Yüzeye tutunmuş her bir fiber yüzeyden ayrılmadan önce belirli bir miktar gerilme gösterecek ve elastik enerji

depolayacaktır, eğer bu enerji fiber-yüzey arayüzündeki enerjiyi geçerse fiber dizini yüzeyden ayrılacaktır.

Tek bir fiberin adezyon kuvvet analizi yukarıda belirtilen faktörler kullanılarak yapılabilir, fakat dizin halindeki fiberlerin toplam yapışma kuvveti bir fiber için bulunan yapışma kuvvetinin fiber sayısı ile çarpımına eşit değildir. Fiber dizisinin adezyonu; fiber geometrisi, fiber aralıkları ve yapışma yüzeyinin pürüzlülüğü gibi birçok parametreye bağlıdır. Dizinin genel davranışı, yüzey ile temas halinde olan bağımsız her fiberin katkılarının toplanması ile elde edilmelidir.

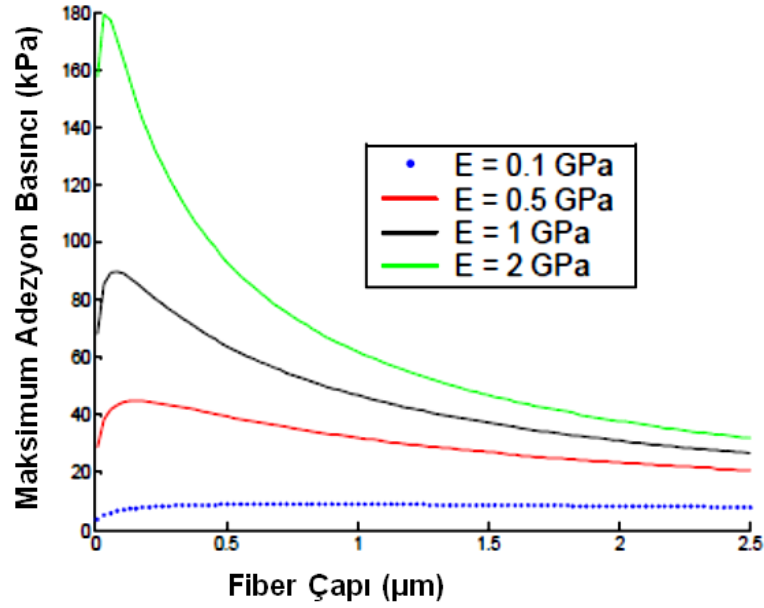
Önerilen fiber dizini yapısının bir başka önemli özelliği de değişik pürüzlü yüzeylere adapte olabilmeye kabiliyetidir. Fiber dizininin elastikiyet sabiti, fiberli yapıdan dolayı, fiberi oluşturan malzemedan farklıdır ve efektif elastikiyet sabiti olarak adlandırılır.

Pürüzlü yüzeylerde pürüzlülük oranına bağlı olarak, bazı fiberler gerilme bazılarını ise sıkışma gerilmelerine maruz kalırlar. Fiber dizinini yüzeye adapte olmasını modellemek için, temas yüzeyi parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Burada yüzey ile ilgili önemli parametreler; yüzey enerjisi, pürüzlülük genliği ve frekansdır. Yüzeylerin pürüzlülüğü, temas halinde olan fiberlerin bükülmelerine ve/veya gerilmelerine neden olarak yükseklik dağılımına etki eder. Temas için ön yükleme (baskı kuvveti) uygulandıktan sonra, ayrılma sürecinde, fiberlerin herhangi bir yer değişimi için her bir fiberdeki bükülme ve bu sayede de her bir fiberin yüzeye uyguladığı kuvvet hesap edilebilir. Elde edilen kuvvet, bağlı yer değişime, yüzey pürüzlülüğüne ve fiber dizisinin geometrisine (fiberlerin boşlukları, uzunlukları ve yarıçapları) bağlıdır.

2.3.6 Elastisite Modülünün Adezyona Etkisi

Tokay Gekko'nun ayaklarının altında bulunan beta keratinden yapılmış fiberlerin elastikiyet katsayısı PDMS'e göre yaklaşık 1000 kat daha fazladır ve her bir fiberin çapı 100-300 nm arasındadır. Bu şekilde yüzeye yapışma (adezyon) basıncı 200 kPa'a kadar çıkabilir. Adezyon, teorik olarak fiber malzemesinin elastisite modülünün artması ile Eş.2.6'ya ve Eş.2.7'ye göre artar. Aynı zamanda adezyon basıncının elastikiyet sabiti ile arttığı Şekil 2.21'dan da görülebilir. Ancak sert fiberlerin olabildiğince küçük boyutlarda üretilmesi gerekmektedir. Bunun en büyük

sebebi; mikron ve üzeri boyutlardaki sert fiberler yüzeydeki pürüzlülüğe karşı çok hassastırlar ve uç noktaları kolayca deforme olamadığı için düşük efektif temas alanı oluştururlar. Ayrıca fiberlerin kusura dirençli olabilmeleri için de küçük çaplarda üretilmeleri gerekmektedir. Ancak nano boyutlarda üretilen fiberler yüzeye çok daha iyi uyum sağlayarak (yüzeylerdeki nano pürüzlülüklere adapte olabiliyorlar), yüzeye çok daha yakın pozisyonlanabilir ve yüksek adezyon verirler.



Şekil 2.21 Farklı fiber çaplarının değişen elastikiyet sabitlerine oranla verdikleri maksimum adezyon basıncı modeli grafiği [50].

Elastikiyet sabiti PDMS'in seçilmesi ile birlikte belirli bir aralığa sabitlenmiştir. PDMS'in kürlenme süresine ve sıcaklığına göre bu oran $0.3 < E_{PDMS} < 2$ MPa arasında değişebilir.

2.3.7 Fiber Malzemesi Seçimi

Gekko'ların ayaklarının altındaki fiberler 0.2-5 µm çaplarında beta keratinden olup ortalama elastisite modülleri 4 GPa civarındadır. Ancak günümüzdeki üretim teknikleri ile elastisite modülünü bu kadar yüksek ve fiber çapı bu denli küçük fiberlerin üretimi mümkün değildir.

Günümüzde üretilen fiberler genelde mikron boyutundadır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi mikron boyutunda olan fiberler düşük elastikiyet sabitlerinde üretilmedikleri takdirde özellikle pürüzlü yüzeylerde düşük efektif temas yüzeyine sahip olurlar. Bu yüzden bu tez kapsamında yukarıdaki tanımlara

uyan, elastisite modülü 0,3-5 MPa arasında ayarlanabilen PDMS (Sylgard-184, Dow Corning) malzemesinin kullanılması uygun bulunmuştur. Bu malzeme bugüne kadar tırmanan robotlarda sıklıkla tercih edilmiştir [16,19,20,21,29,32]. Ayrıca mikron boyutunda üretim teknikleri ile üretilen fiberlerin boyutsal olarak daha kararlı olmakta ve hızlı kontrol için optik mikroskop ile görülebilmektedir.

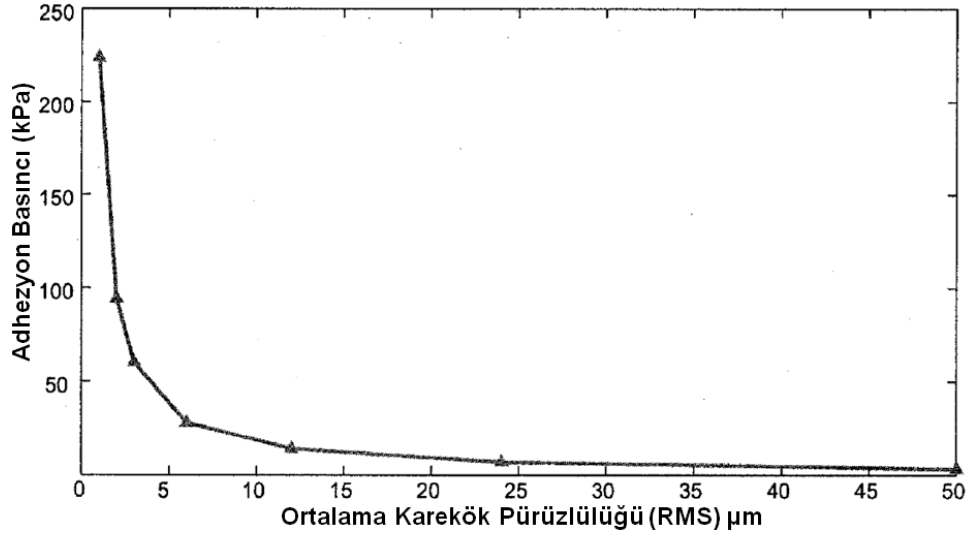
Bu tez kapsamında;

- Kolaylıkla bulunabilen,
- Fiberli yapıların üretiminde sıklıkla tercih edilen,
- Kolay işleneben,
- Kolay üretilebilen,
- Kalıptan problemsiz çıkarılabilen,
- Kısa kürlenme süresi olan,
- Literatürde iyi karakterize edilmiş,
- Kararlı,
- Tırmanan robotlarda kullanılmış,

bir malzeme olan PDMS(Polydimethylsiloxane)'i kullanılmıştır.

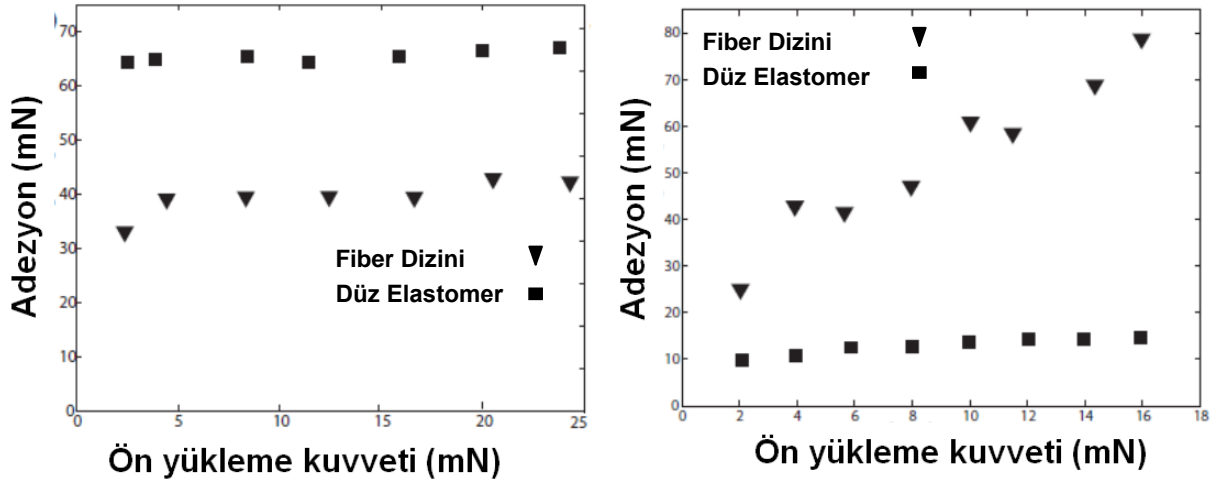
2.3.8 Yüzey Pürüzlülüğünün Adezyona Etkisi

Bu bölüme kadar yapılan hesaplamaların ve modellerin çoğunda fiberlerin düz bir yüzey üzerine tüm alanları ile temas ettikleri farz edilmiştir. Bu modellere göre elastikiyet sabitleri yüksek olan malzemelerin daha yüksek adezyona sahip oldukları bulunmuştur. Ancak gerçek hayatta yüzeyler her zaman pürüzlüdür ve düz yüzeyler için bulunmuş matematiksel modeller gerçek hayat için çoğu zaman sınırlı kalmaktadır. Eğer fiber yarıçapı yüzey pürüzlülüğündeki en küçük dalga boyundan çok daha küçük üretilebilirse fiber dokunduğu alanı düz bir yüzey olarak algılayabilir ve üst bölümlerde verilen tüm modeller rahatlıkla kullanılabilir. Ancak günümüz teknolojisi ile çok küçük boyutlarda fiberler üretilemediği için yüzey pürüzlülüğünün de adezyon üzerine etkisinin modellenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.22 Yüzeydeki tek bir pürüzün, değişken ortalama karekök yüzey pürüzlülüğüne göre fiberin maksimum adezyon basıncı [54]

Bir fiberden elde edilen adezyon basıncının, yüzey üzerindeki tek bir pürüzün büyüklüğüne göre değişimi Şekil 2.22’de gösterildiği gibidir. Bu şekilden görülebileceği gibi artan yüzey pürüzlülüğü ile tek bir fiberin adezyon basıncı azalmıştır.



Şekil 2.23 Pürüzsüz (solda) ve pürüzlü(sağda) yüzeylerde düz ve fiber dizinli elastomerlerin farklı ön yüklemeler karşısındaki adezyon karşılaştırma grafiği [29].

Şekil 2.23’de solda verilen grafikte, düz elastomere ve fiber dizinine, düz bir zemin üzerinde, çeşitli önyüklemeler uygulanmıştır. Düz elastomer neredeyse bütün ön yüklemelerde 65 mN sabit adezyon vermiştir. Bunun sebebi; yüzeylerin çok küçük bir önyükleme ile tümüyle birbirlerine dokunmalarıdır (doyuma ulaşması). Fiberli yapıların adezyonu ise 30 mN’den başlayarak 42 mN’a kadar artmıştır. Fiberli

yapılar üretimlerinden dolayı aynı boylarda olmayabilirler ve toplam efektif alanları düz elastomerlere göre çok daha azdır (bu deneyde kullanılan fiberler için 36%), her ne kadar fiberli yapılar efektif alanlar oranlandığında daha güçlü bir adezyona sahip olsalar da birim alan başına düz elastomerler düz yüzeylerde daha yüksek adezyon vermektedirler. Şekil 2.23'de sağda verilen grafikte düz elastomere ve fiber dizinine, küresel bir cam yüzey üzerinde, çeşitli önyüklemeler uygulanmıştır. Cam küre profili bilinen bir pürüzlülüğü simgelemektedir. Bu durum sonucunda 16 mN'luk bir önyükleme sonucunda fiber dizini düz elastomere göre 5.3 kat daha fazla adezyon vermiştir. Bunun sebebi; düz elastomerin cam kürenin eğimli yüzeyinden dolayı üzerinde yüksek miktarda elastik enerji depolamış olması ve adezyon temas enerjisinden kazandığı enerjinin büyük bir kısmını elastik enerjiyi dengelemek için kullanmasıdır. Bu yüzden yapışma kuvveti 10-12 mN arasında kalmıştır. Oysa fiberler artan önyükleme ile küre yüzeyine daha çok temas etmiş ve daha fazla adezyon vermişlerdir.

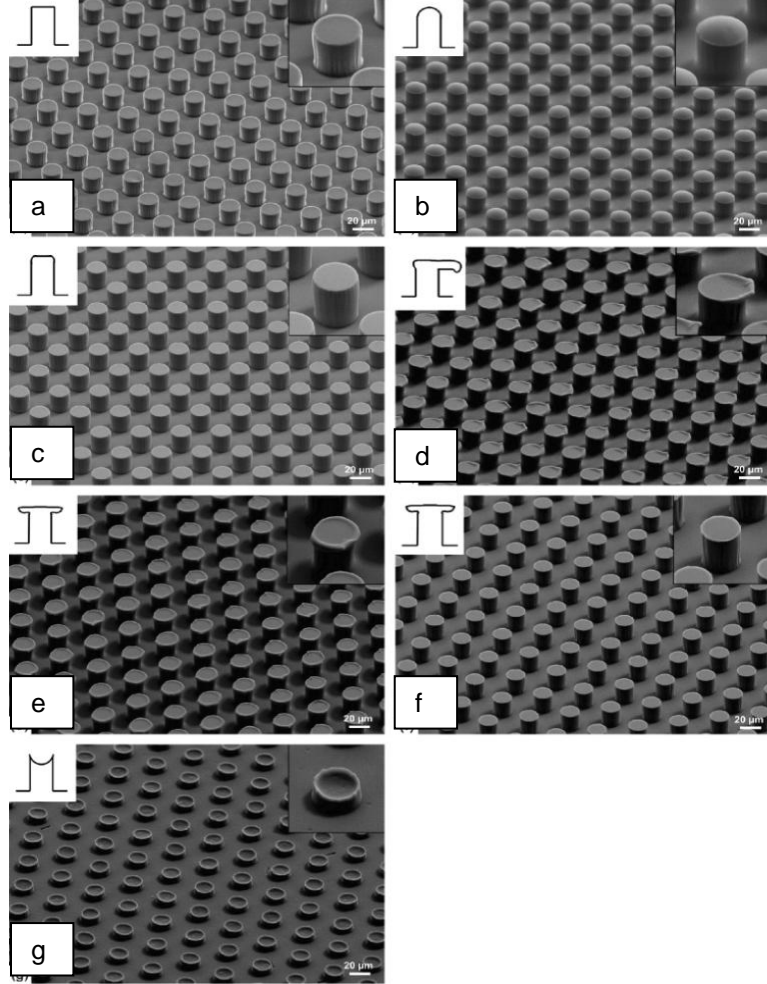
Pürüzlülüğün artması ile birlikte yapışma enerjisi yerini efektif yapışma enerjisine bırakır. Özellikle yüksek elastikiyet katsayısına sahip bir malzeme mikron boyutunda pürüzlülüğü olan bir yüzey üzerinde neredeyse hiç adezyon vermez. Ancak PDMS yumuşak olmasından dolayı mikron boyutlarındaki pürüzlülükte bile yüksek efektif yapışma enerjisine sahiptir. Robotun üzerinde test edileceği yüzeyler değişmediği ve malzeme de PDMS olarak seçildiği için bu kısımda optimize edilecek bir değişken yoktur.

2.3.9 Fiber Uç Şekillerinin Adezyona Etkisi

Doğadaki tırmanan canlılarda birçok farklı şekildeki fiberlere rastlamak mümkündür. Farklı uç şekillerine sahip fiber dizilerinden bazıları aşağıda harflendirilmiş ve Şekil 2.24'de gösterilmiştir.

- a) Düz silindirik,
- b) Küresel,
- c) Düz konik,
- d) Spatula,
- e) Mantar,
- f) Toroidal.

Fiberlerdeki farklı uç şekillerinin farklı ortam şartlarına göre daha optimize çalıştığı ve farklı adezyon verdikleri düşünülmektedir [17][39][41]. Bu yüzden bu bağıntıyı bulmak için birçok fiber şekli sentetik olarak günümüz teknolojisi elverdiği ölçüde Şekil 2.24'de görüleceği gibi üretilmiş ve test edilmiştir [41].

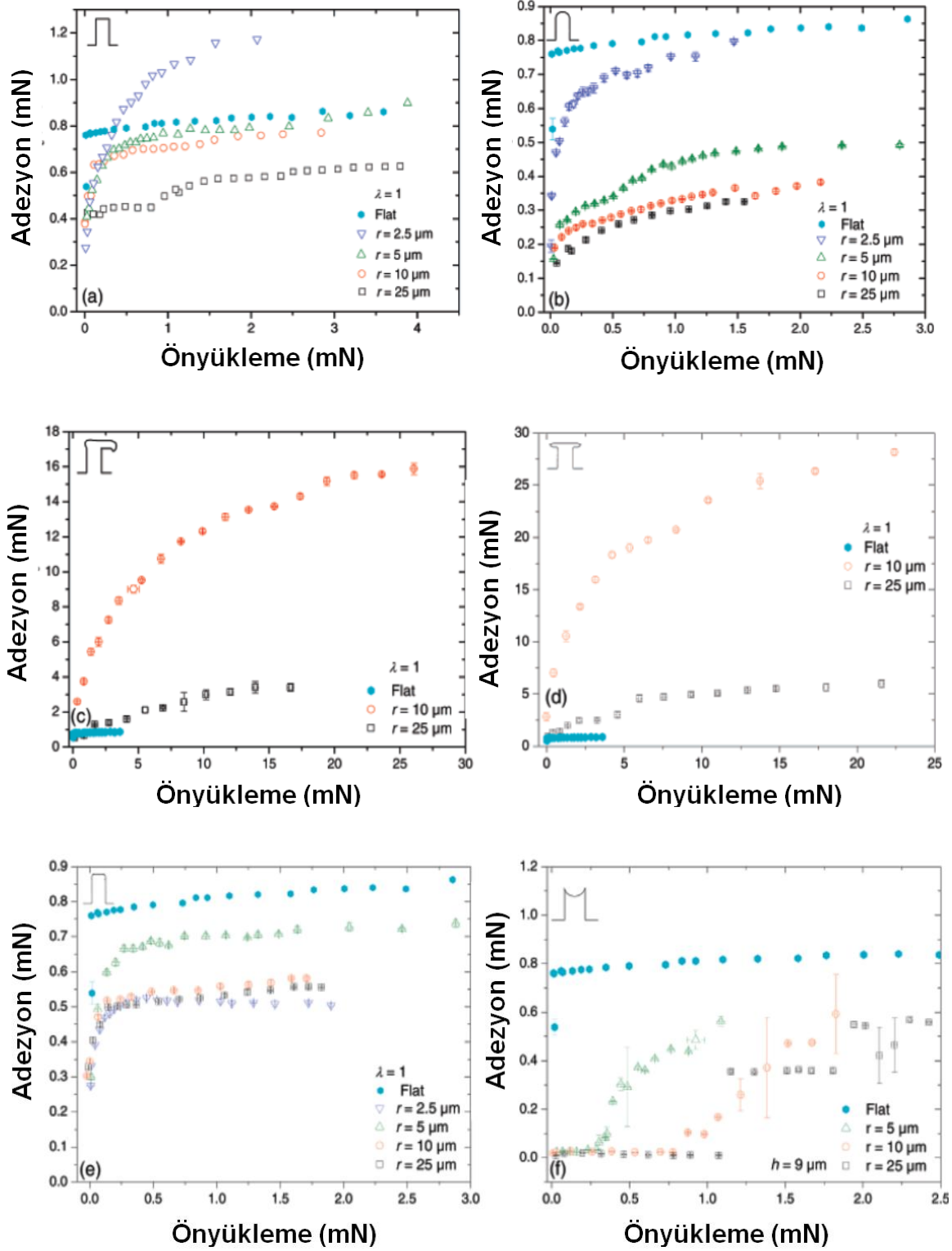


Şekil 2.24 Sentetik olarak üretilmiş farklı şekillerdeki fiber dizinleri [41].

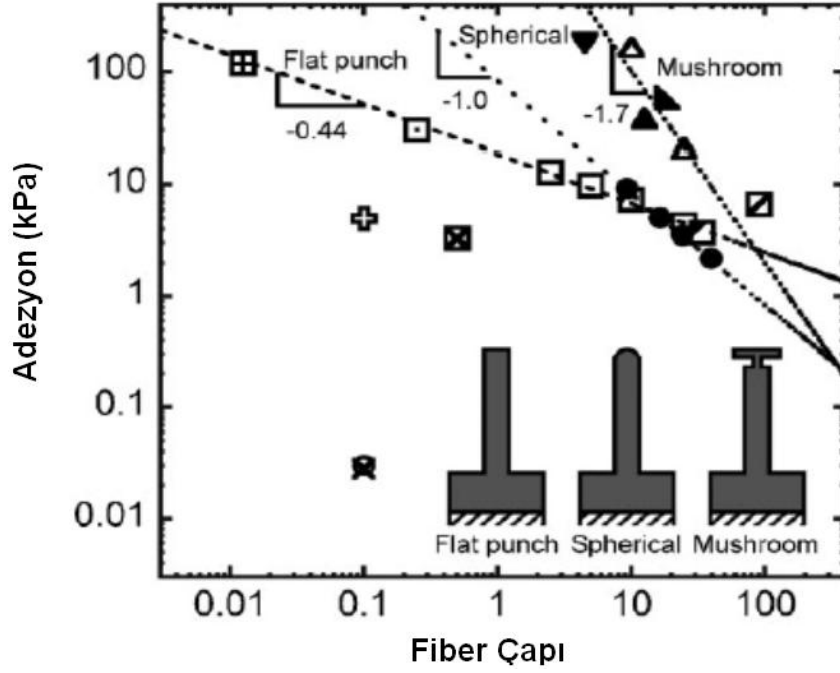
Şekil 2.25'de görülen test sonuçlarına göre çeşitli morfolojide üretilen fiberlerin adezyon değerleri en yüksekten en küçüğe doğru aşağıda sıralanmıştır;

- 1) Spatula uçlu
- 2) Mantar uçlu
- 3) Silindirik
- 4) Düz
- 5) Küresel
- 6) İçbükey

şeklinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre, diğer fiber şekillerine oranla, daha düşük adezyon kuvveti verdikleri için; düz, küresel ve içbükey şeklindeki fiberler, bu tez kapsamında kullanılmayacaktır.



Şekil 2.25 Farklı geometrik uçlara sahip fiber dizinlerine uygulanan ön yüklemelere karşılık gelen adezyon değerleri [39].



Şekil 2.26 Literatürde bahsi geçen deney sonuçlarına göre küresel, silindirik ve mantar uçlu fiberlerin adezyon karşılaştırma grafiği. [17]

Şekil 2.26'da verilen her bir nokta gerçek bir deneye karşılık gelmektedir. Bu deneylerin sonucunda [17]'de çıkarılan bir modele göre;

- Silindirik düz uçlu fiberlerin adezyonu logaritmik fiber çapı & adezyon basıncı grafiğinde -0.44
- Küresel uçlu fiberlerin adezyonu logaritmik fiber çapı & adezyon basıncı grafiğinde -1.00
- Mantar uçlu fiberlerin adezyonu logaritmik fiber çapı & adezyon basıncı grafiğinde -1.70

eğimlerine karşılık gelmektedir. Bu modele göre $100 \mu\text{m}$ 'den daha küçük mantar uçlu fiberler her zaman en yüksek adezyonu vermektedirler. $10 \mu\text{m}$ 'den daha büyük silindirik düz uçlu fiberler ise küresellere oranla daha iyi yapışma kuvveti verir. $10 \mu\text{m}$ 'nin altında ise; en yüksek adezyonu mantar uçlu, sonra küresel ve en az silindirik düz uçlu fiberler sağlamaktadırlar.

Şekil 2.27'de verilen farklı tipteki geometrik uçlara sahip fiberlerin farklı çaplardaki adezyon grafiğine göre [42];

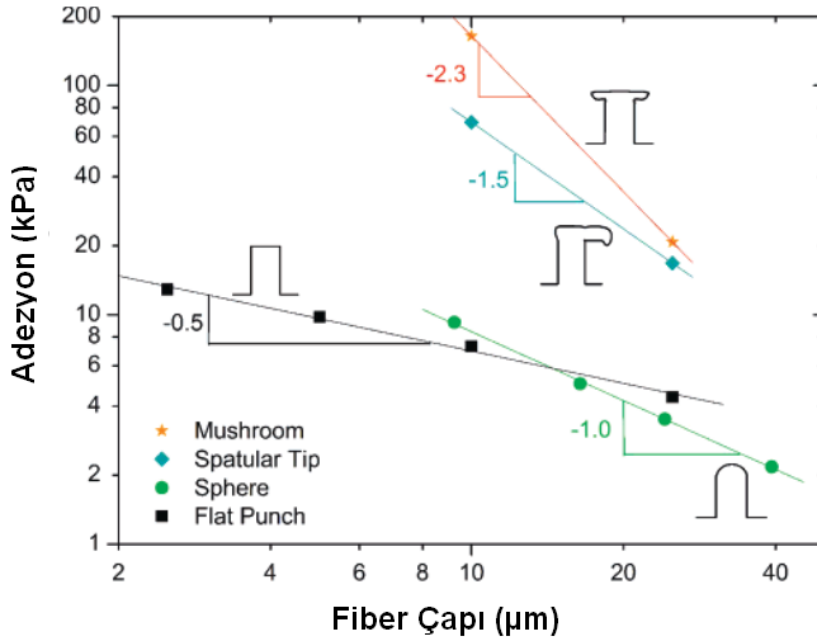
- Silindirik düz uçlu fiberlerin adezyonu logaritmik fiber çapı & adezyon basıncı grafiğinde -0.5

- Küresel uçlu fiberlerin adezyonu logaritmik fiber çapı & adezyon basıncı grafiğinde –1.00
- Spatula uçlu fiberlerin adezyonu logaritmik fiber çapı & adezyon basıncı grafiğinde –1.50
- Mantar uçlu fiberlerin adezyonu logaritmik fiber çapı & adezyon basıncı grafiğinde –2.30

eğimlerine karşılık gelmektedir. Bu modellere göre mantar uçlu fiberler her zaman en yüksek adezyon, spatula şeklindeki fiberler ise ikinci sırada adezyon vermektedirler. 15 μm 'den daha büyük silindirik düz uçlu fiberler ise küresel fiberlere oranla daha iyi yapışmaktadırlar.

Mantar ve spatula şeklindeki fiberlerin teorik modelleri henüz deney sonuçlarını tahmin edebilecek düzeyde değildir. Bu yüzden bu tez kapsamında biz öncelikle silindirik düz uçlu fiberleri kullanmayı planlıyoruz. Bunun sebepleri şu şekilde sıralanabilir;

- Mantar ve spatula uçlu fiberlerin matematiksel modellerinin yeterince olgun olmaması,
- Mantar ve spatula uçlu fiber üretimlerinin boyutsal olarak kararlı olmaması,
- Mantar ve spatula uçlu fiberleri kalıptan çıkarırken bazen kopmaların gerçekleşmesi,
- Mantar ve spatula uçlu fiberlerin dökümleri sırasında hizalamadan kaynaklı boyutsal hataların oluşması,
- Düz fiberlerin kolay üretilmesi,
- Düz fiberlerde çökme durumunun diğerlerine oranla asgari olması.



Şekil 2.27 Küresel, silindirik, spatula ve mantar uç şekillerine sahip fiberlerin değişen çap boyutuna göre adezyon karşılaştırma grafiği [42].

Literatürde yer alan [15,29,42,53] araştırmalara göre de mantar şeklindeki uca sahip fiberler en yüksek adezyona sahiptirler. Ancak teorik olarak gerçekleştirilen diğer araştırmalara göre; farklı geometrik yapılar içinden silindirik düz uçlu fiberlerin en çok adezyona sahip olması gerektiği gösterilmiştir [40,41].

Sonuç olarak; şu an için literatürde yer alan farklı uç şekillerine sahip fiberlerin adezyon karşılaştırması gerek deneysel gerekse matematiksel modelleme olarak tutarlı görülmemiştir. Bunun olası sebeplerinin en başında bu deneyler sırasında;

- Viskoelastik etkiler (yaklaşma hızı, çekme hızı, temas halinde bekleme süresi),
- Farklı elastisite modülleri,
- Test düzeneği belirsizlikleri,
- Test edilen yüzey farklılıkları (aynı malzeme üzerinde bile farklılıklar olma ihtimali yüksektir),
- Nem ve sıcaklık,
- Polimerlerin vakumlanması, kürlenmesi ve oransal olarak karıştırılması sırasında meydana gelen farklılıklar,

gibi nedenlerden dolayı sonuçlar tam anlamı ile karşılaştırılabilir olamamaktadır. Ancak, genel olarak mantar şeklindeki fiberlerin en çok, spatula şeklindeki

fiberlerin ikinci ve düz silindirik fiberlerin ise üçüncü sırada adezyon verdikleri yorumu yapılabilir.

Son olarak da son yıllarda yeni yeni araştırılan açılı fiberler (angled fibers) [15], bu tez kapsamında kullanılmayacaktır. Bunun sebepleri ise;

- Açılı fiberleri kontrol etmek için daha fazla serbestlik derecesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum tırmanan robotlarda kullanılacak olan eyleyici gereksinimini arttırmaktadır. (basma çekme hareketi için),
- Daha fazla eyleyicinin robot ağırlığını ve dolayısı ile tırmanma performansını kötü yönde etkileme ihtimali vardır,
- Özellikle robotun aşağı yönde inişleri sırasında yerçekiminin etkisi ile fiberlerin yüzeyden ayrılma ihtimali vardır,
- Üretim zorluğu vardır.

2.4 Optimizasyon Algoritması

Literatürdeki bilgilere dayanarak bu tez kapsamında bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Aşağıda bu optimizasyon sırasında kullanılan denklemler verilmiştir ve optimizasyon algoritma şeması Şekil 2.29'da gösterilmiştir.

Bir fiber için adezyon kuvveti Eş.2.6'da verilmişti. Buna göre;

$$P_f = \sqrt{6\pi a^3 K w_f} \quad (\text{N})$$

$$K \cong \frac{4}{3} \left[\frac{E_f}{(1-\nu_f^2)} \right] \quad (\text{Pa})$$

Bir fiber için adezyon basıncı Eş.2.8'de gösterilmişti. Bu eşitlik;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{6K w_f}{\pi a}} \quad (\text{Pa})$$

Buradaki fiber adezyon basıncı sadece bir fiberden elde edilecek adezyon basıncını temsil etmektedir. Fiber dizinindeki adezyon basıncını bulmak için; bir fiber için bulunan adezyon basıncı fiber yoğunluğu (c_f) ile çarpılır. Fiber yoğunluğunu bulmak için; Şekil 2.28'de gösterilen altıgen şekli içerisine yerleştirilmiş fiberlerin izdüşüm alanının " A_f ", içerisinde bulunduğu toplam altıgen

alanına “A_f” oranı bulunarak elde edilir. Sonuç olarak Eş.2.22’de belirtildiği gibi fiber yoğunluğunu “c_f” verir;

$$A_f = \pi a^2 \left(\frac{120}{360} \right) 6 + \pi a^2$$

$$A_f = 3\pi a^2 \quad (m^2) \quad (2.20)$$

$$A_t = \frac{3\sqrt{3}}{2} (2a + 2d)^2 \quad (m^2) \quad (2.21)$$

$$c_f = \frac{A_f}{A_t} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{a}{a+d} \right)^2 \quad (m^2) \quad (2.22)$$

A_f: Birim altıgen içindeki toplam fiber alanı (m²)

A_t: Birim altıgenin toplam alanı (m²)

Fiberlerin adezyon basınçları, boy/en oranının 0.3 üslü ($\lambda^{0.3} = (h/2a)^{0.3}$) ile artmaktadır [30,45], Buna göre fiber dizinin ortalama adezyon basıncı (σ_T) Eş.2.23 ile bulunabilir;

$$\sigma_T = \sigma_c * c_f * \lambda^{0.3} \quad (2.23)$$

2.4.1 Optimizasyon Sınır Koşulları

Optimizasyonda bilinmeyen değerler (a,d ve h), belirli bir sınırlar içerisinde değişilip bir döngü oluşturulmuştur. Burada minimum a ve d değeri bulunmuş daha sonra buna

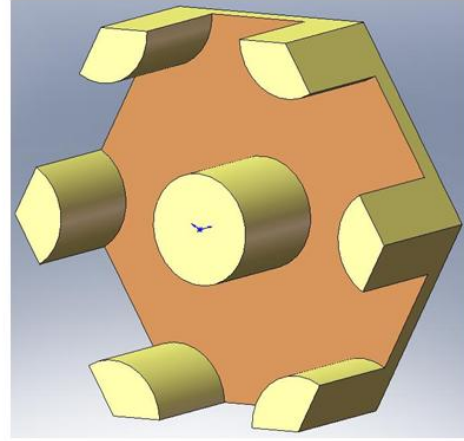
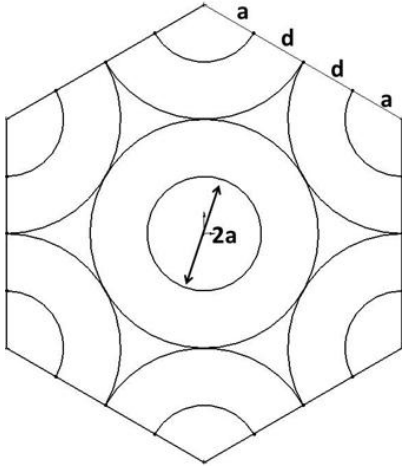
PDMS ile üretilen fiberlerin kusura dirençli olabilmesi için, maksimum fiber yarıçapı a = 15 µm olarak hesaplanmıştır (bkz. Bölüm 2.1.1). Minimum fiber yarıçapı ise Bölüm 2.3.1’de 0.5 µm olarak belirlenmiştir. Üretim tekniği göz önüne alındığında fiber yarıçapı en küçük 2.5 µm olabilmektedir. Bu sebeple optimizasyon kodunda, fiber yarıçapı; 2.5 µm < a < 15 µm aralığına olacak şekilde belirlenmiştir.

Yapılan optimizasyonda fiberlerin yüksekliği (boy) ise; 1.25 µm < h < 150 µm aralığında değişmektedir. Yarıçap ‘a’ ve uzunluk ‘h’ değerleri bu aralıklarda değişerek, bütün kombinasyonlar oluşturulur. Böylece, her bir iterasyonda; farklı

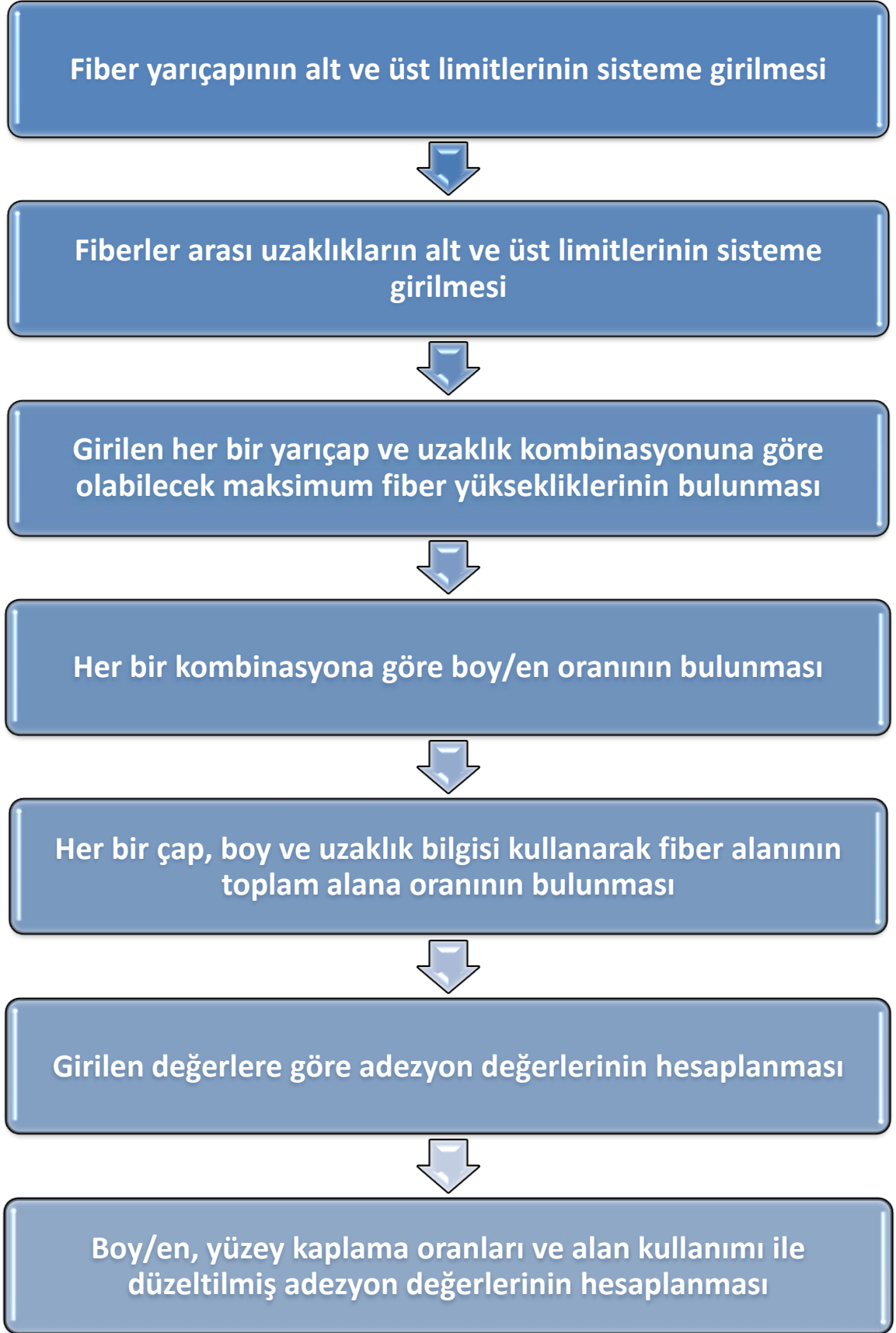
fiber yarıçapı (a) ve boyu (h) için; minimum fiberler arası uzaklığı (d) , Eş.2.19'daki gibi bulunabilir;

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{\left(\frac{h}{\left[\frac{\pi^4 E_f^* a}{2^{11} \gamma_f}\right]^{1/12}}\right)^4}{\frac{3 E_f a^3}{\gamma_f}}} \quad (\text{m})$$

Böylece her bir döngüde oluşan a,d ve h değerlerinin bütün kombinasyonları kullanılarak; Eş.2.23'deki fiber dizininin teorik ortalama adezyon basıncı (σ_T) hesaplanır.



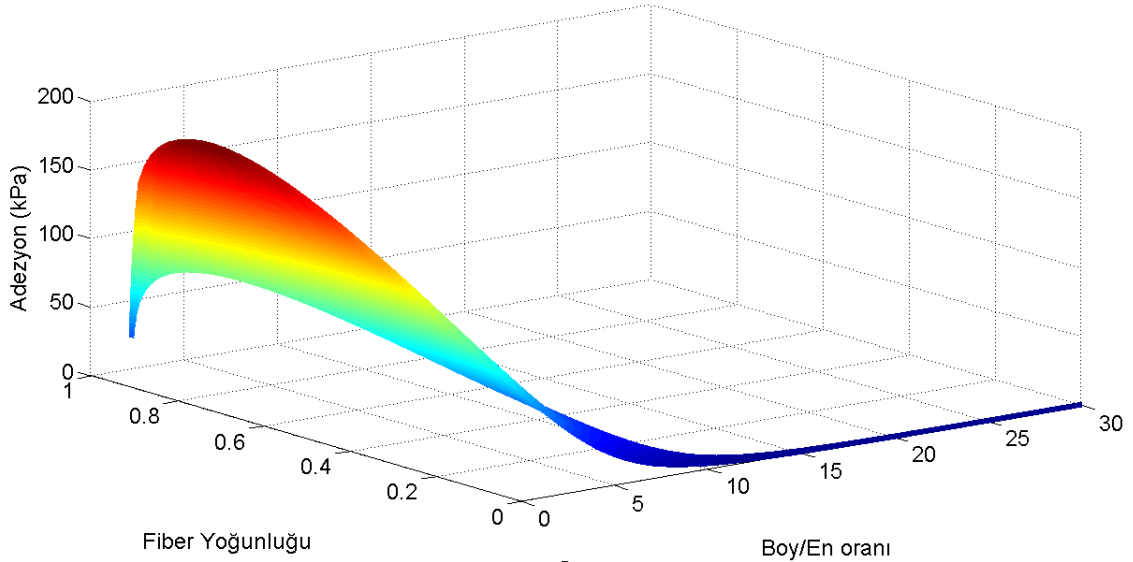
Şekil 2.28. Altıgen şekilde yerleştirilmiş fiberlerin tüm alana yayılmasının iki ve üç boyutlu gösterimi.



Şekil 2.29. Optimizasyon algoritması gösterimi.

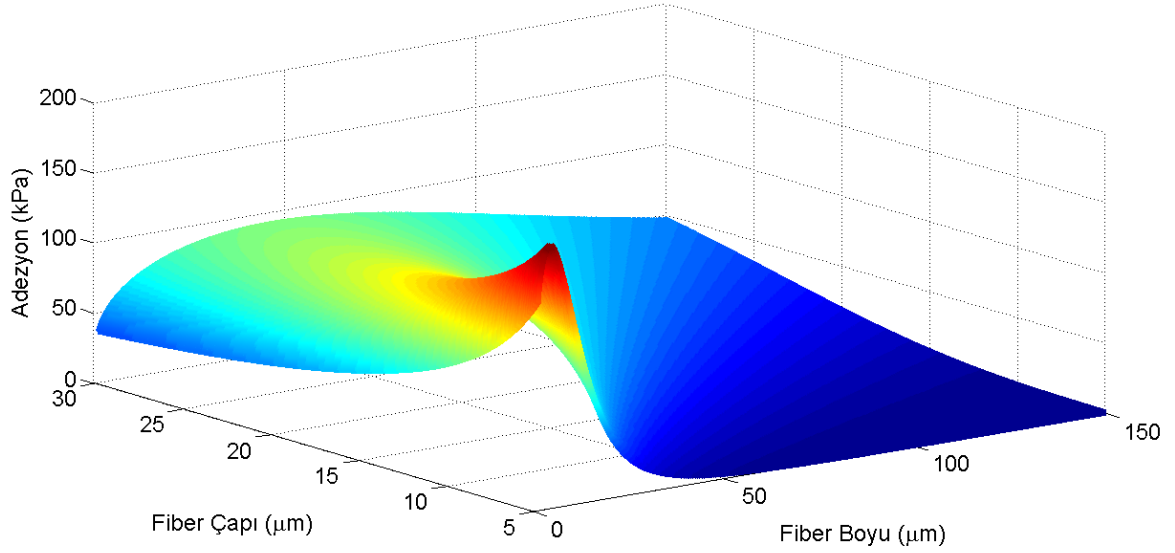
2.4.2 Optimizasyon Sonuçları

Bu tez kapsamında yapılan optimizasyon sonucunda (bkz. Ek 3), değişkenlere göre elde edilen fiber dizini adezyon basıncı değerleri, Şekil 2.30, 2.31 ve 2.32'de gösterilmiştir.



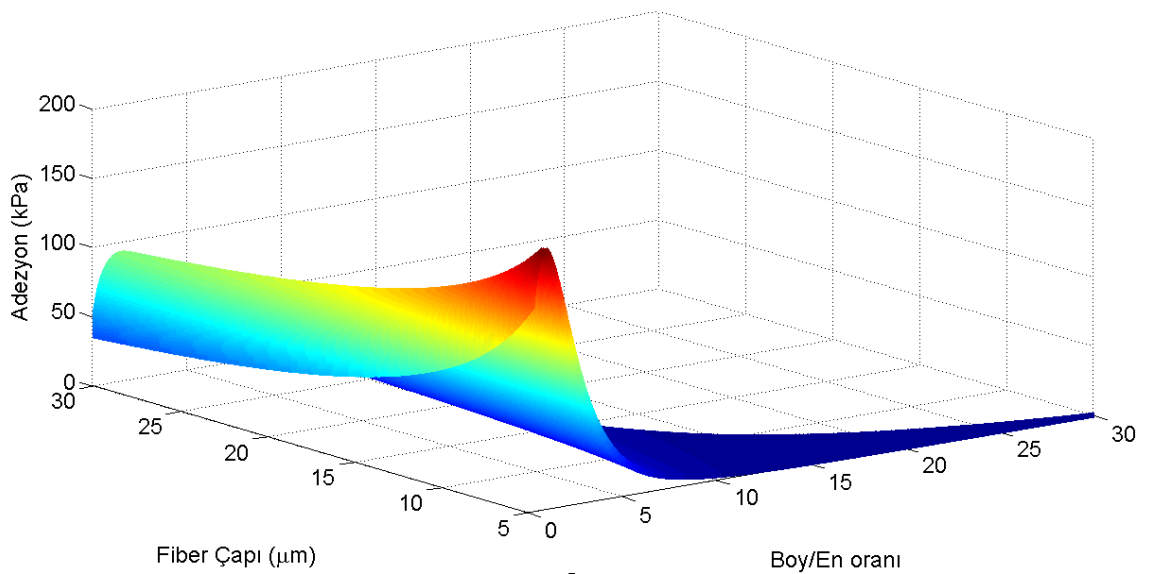
Şekil 2.30. Değişen boy/en oranı ve fiber yoğunluğuna göre oluşan adezyon basıncı grafiği.

Şekil 2.30 incelendiğinde; yüksek boy/en oranına sahip fiberlerin neredeyse hiç adezyon basıncı vermediği görülmektedir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; fiberlerin boy/en oranı arttıkça, fiberler arası çökmenin olmaması için fiberler arası boşluğun da artması gerekmektedir. Bu da fiber yoğunluğunu azaltacaktır. Yani birim alandaki fiber sayısı azalarak, yüzeye dokunan efektif alan azalacaktır. Bunun sonucunda da düşük adezyon basıncı elde edilir. Şekil 2.30'da fiber boy/en oranı 0.5-2.5 arasında olduğunda, fiber yoğunluğu(efektif fiber alanı/toplam alan) 0.6-0.8 arasındadır. Bunun sonucunda en yüksek adezyon basınç değerleri (185 kPa civarında) elde edilir.



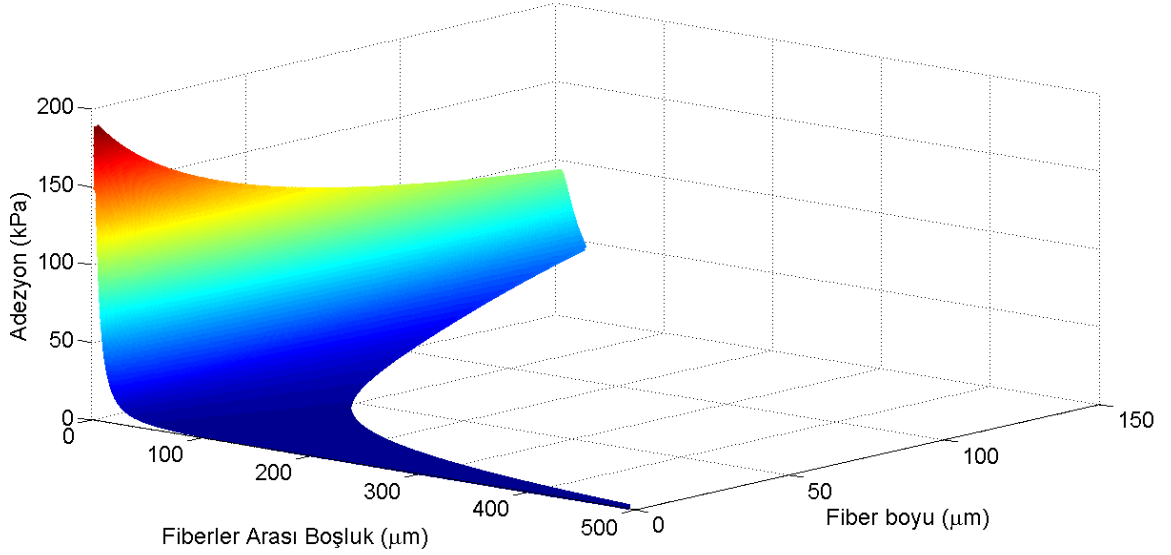
Şekil 2.31. Değişen fiber çapı ve fiber boyuna göre oluşan adezyon basıncı grafiği.

Şekil 2.31 incelendiğinde ise; literatürdeki araştırmalardan da bilindiği gibi fiber çapının küçülmesi ile birlikte yüksek adezyon basınç değerleri elde edilir. [17][30][31][42]. Fiber boyunun da etkisi ile adezyon basıncının değiştiği bilinmektedir [30][45][47]. Yapılan optimizasyon sonucunda, Şekil 2.31'den de görülebileceği gibi; fiber boyu 'h' 4-5 μm civarında ve fiber çapı '2a' minimum değerinde (5 μm) olduğunda en yüksek adezyon basıncı elde edilmiştir. Maksimum adezyon basıncının elde edildiği tepe noktasında; fiber çapı 5 μm , fiber boyu ise yaklaşık 7-8 μm 'dir. Fiber çapı 5 μm 'de sabit tutulup, fiber boyu 6-7 μm 'den büyük veya küçük olduğunda; adezyon basıncı azalmaktadır.



Şekil 2.32. Değişen fiber çapı ve boy/en oranına göre adezyon basıncı grafiği.

Şekil 2.32 de gösterilen 3 boyutlu grafikte, değişen fiber çapı ve fiber boy/en oranının ($\lambda=h/2a$) adezyon basıncına etkisi gösterilmiştir. Bunun sebebi ise yine yüksek boy/en oranlarında fiberler arası boşluğun(d) yüksek olmasıdır. Bu durum; fiber yoğunluğunun (c_f) azalmasına sebep olur ve fiber dizininden elde edilecek adezyon basıncını azalır. Şekil 2.32'den görüldüğü gibi; yüksek boy/en oranları için ($\lambda>3$) oldukça düşük adezyon basıncı elde edilmektedir. Bu durumun en büyük sebebi PDMS'in yumuşak bir malzeme olmasından kaynaklı kolay çökmelerin olması olduğu tahmin edilmektedir (bkz. Bölüm 2.3.3). Fiberlerin çökmesi, fiberlerin birbirlerinden uzaklaştırılmasıyla engellenebilir ancak bu durum birim alandaki efektif fiber alanını azaltacaktır.



Şekil 2.33. Değişen fiberler arası boşluk (d) ve fiber boyuna (h) göre adezyon basıncı grafiği

Şekil 2.33'den görülebileceği gibi; fiber dizininden yüksek adezyon basıncı elde etmek için fiberler arası boşluğun olabilecek en küçük değere çekilmesi gerekmektedir. Fiberler arası boşluğun azalması ancak fiberlerin boyunun küçülmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu sayede yüksek adezyon basıncı değerlerine ulaşılır.

Sonuç olarak, optimizasyon sonuçlarına göre üretilmesi gereken fiber dizinin özellikleri Çizelge 2.3'de belirtilmiştir.

Malzeme	PDMS
Elastisite Modülü (E)	0.5 – 2 MPa

Çap (2a)	5 – 8 μm
Uzunluk (h)	2 – 30 μm
Boy/En oranı	0.5 – 3.5
Fiberler Arası Uzaklık (d)	0.4 – 4 μm (her fiber dizini için hesap yapılacak)
Uç Şekli	Silindirik düz uçlu
Destek Tabakası Kalınlığı	Robot tasarımı ile beraber belirlenecek

Çizelge 2.3. Üretilecek fiberlerin boyut aralıkları ve özellikleri

2.4.3 Optimizasyon Doğrulaması

Yapılan optimizasyon algoritmasını doğrulamak amacı ile; Matlab programında, “fmincon” yöntemi ile tekrar çözüm sağlandı. Bu yöntem birden çok değişkeni olan fonksiyonlarda, bilinmeyen değişkenlere belirli sınır şartları tanımlanarak, fonksiyonun minimum veya maksimum değerinin çözümü için kullanılmaktadır. Bu yöntem ile bilinmeyen değerler için girilen sınır şartlarına göre hem fonksiyonun maksimum değeri hem de fonksiyonu maksimum yapan bilinmeyenler bulunabilir.

Buna göre, maksimum yapılması istenen fonksiyon, Eş.2.23’de belirtilen, fiber dizinindeki ortalama adezyon basıncıdır (σ_T). Bu fonksiyondaki bilinmeyenler ise fiber yarıçapı (a) ve fiber yüksekliğidir (h). Fiberler arası boşluk (d) değeri, ‘a’ ve ‘h’ bilinmeyenleri kullanılarak Eş.2.19’daki gibi bulunur.

Bu yöntemde bilinmeyen değerler için bölüm 2.4.1 de belirtilen sınır koşulları kullanılmıştır. Buna göre; fiber yarıçapı ‘a’ için minimum ve maksimum değerler sırası ile 2.5 μm ve 15 μm olacak şekilde girildi. Fiber boyu (yüksekliği) için minimum ve maksimum değerler sırası ile 1.25 μm , 150 μm olarak girildi.

Sonuç olarak girilen sınır koşullarına göre, maksimum adezyon basıncı değeri ve bunun için optimum bilinmeyenler değerler (a,h), yukarıda bahsedilen ‘fmincon’ yöntemi uygulanarak Çizelge 2.4’deki gibi bulunmuştur. Bu çizelgedeki sonuçlar Bölüm 2.4.2’deki optimizasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında tutarlılık göstermektedir. Bölüm 2.4.2’deki optimizasyon algoritmasında bulunduran maksimum adezyon basıncı yine 187 kPa’dır. Bu maksimum değer için Şekil 2.32’den de görüldüğü gibi minimum fiber çapının seçilmesi (5 μm) gerekmekte,

optimum fiber boyunun ise 4-5 μm civarında olması beklenmekteydi. Optimizasyon doğrulamasında bu sonuçlar beklenildiği gibi çıkmıştır (Bkz. Çizelge 2.3).

Simge	Simge İsmi	Optimum Değer	Maksimum Adezyon
(a)	Fiber Yarıçapı	2.5 μm	187 kPa
(h)	Fiber Boyu	4.3 μm	
(d)	Fiberler Arası Boşluk	0.4 μm	
($\lambda=h/2a$)	Fiber Boy/En Oranı	0.86	

Çizelge 2.4. Maksimum adezyon basıncı için optimum değerler.

2.4.4 Üretilen Fiber Çapına Karşılık Optimum Fiber Boy/En Oranı Hesabı

PDMS malzemesi kullanılarak silindirik olarak üretilen fiber dizininden maksimum adezyon elde etmek için, belli bir fiber çapı değerine göre, hangi boy/en oranına sahip fiberlerin üretilmesi gereklidir? Bu sorunun cevabı analitik olarak çözümlenerek fiber dizinin ortalama adezyon basıncı (σ_T) maksimize edilebilir. Bu maksimizasyonda kullanılan ve aşağıda verilen ' σ_T ' Eş.2.23'de, ' σ_c ' Eş.2.4'de, ' c_f ' Eş.2.22'de, ' d_{\min} ' Eş.2.4'de verilmiştir.

$$\sigma_T = \sigma_c * c_f * \lambda^{0.3}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{6Kw_f}{\pi a}}$$

$$c_f = \frac{A_f}{A_t} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{a}{a+d} \right)^2$$

$$\lambda^{0.3} = (h/2a)^{0.3}$$

$$d_{\min} = d = \sqrt{\frac{\left(\frac{h}{\left[\frac{\pi^4 E_f^* a}{2^{11} \gamma_f} \right]^{1/12}} \right)^4}{\frac{3E_f a^3}{\gamma_f}}}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{6Kw_f}{\pi a}} * \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{a}{a+d} \right)^2 * \frac{h}{2a}^{0.3}$$

Fiber dizini için ortama adezyon basıncı değeri olan σ_T eşitliğinde; fiberin efektif elastikiyet katsayısı 'K' ve adezyon enerjisi ' w_f ' değerleri, malzemeye bağlı sabitlerdir. Bu eşitliklerde (σ_T, d) bulunan sabitleri isimlendirirsek (S_1, S_2, S_3), 'd' bu sabitlerler ile daha sadeleştirilmiş bir biçimde Eş.2.24'deki gibi yazılabilir. ' σ_T ' ise daha basit olarak Eş.2.25'deki gibi yazabilir.

$$S_1 = \sqrt{\frac{6Kw_f}{\pi}} * \frac{\pi}{2\sqrt{3}} , \quad S_2 = \left[\frac{\pi^4 E_f^*}{2^{11} \gamma_f} \right] , \quad S_3 = \frac{3E_f}{\gamma_f}$$

$$d = \frac{h^2}{\sqrt{(S_2 * a)^{1/3} * S_3 * a^3}} \quad (2.24)$$

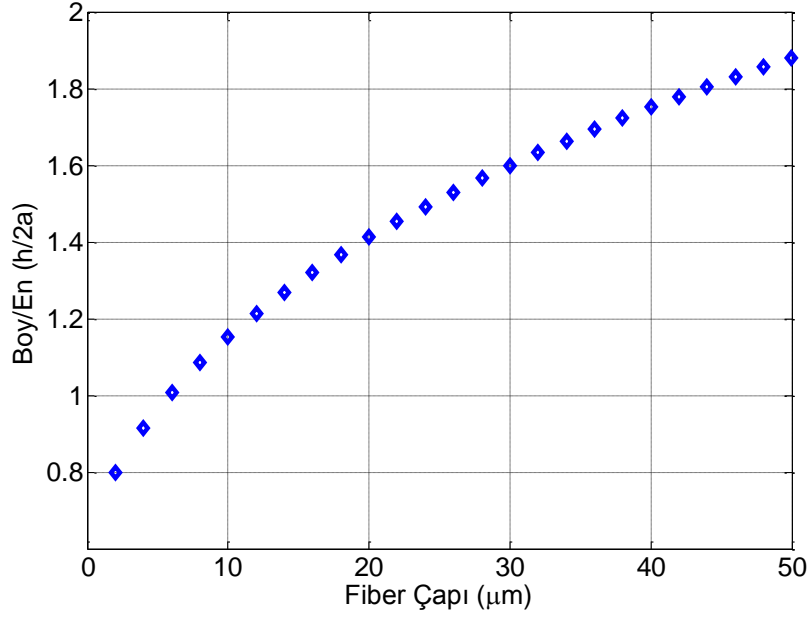
$$\sigma_T(a, h) = S_1 * \left(\frac{a}{a + \frac{h^2}{\sqrt{(S_2 * a)^{1/3} * S_3 * a^3}}} \right)^2 * \frac{h}{2a} \quad (2.25)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_T}{\partial a} \\ \frac{\partial \sigma_T}{\partial h} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

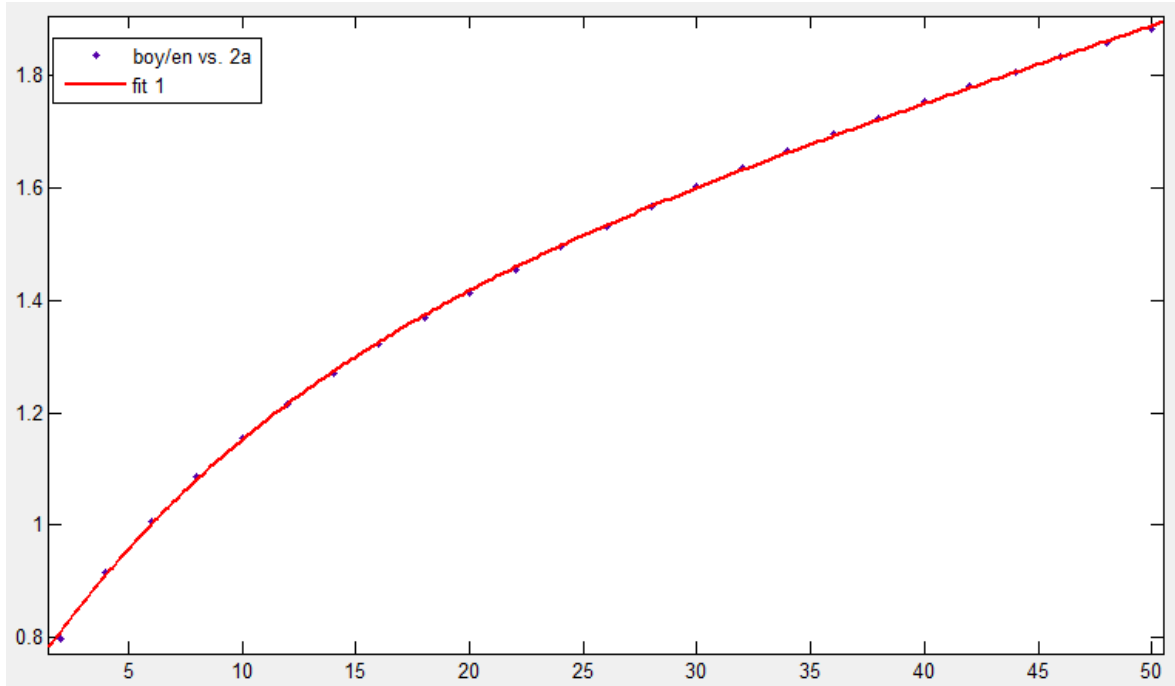
Eş.2.25'de fiber dizininde oluşan ortalama adezyon basıncı ' σ_T ' sadeleştirilmiş hali gösterilmiştir. Buna göre ' σ_T ' sadece a ve h değişkenlerine bağlı bir fonksiyon haline gelmiştir. Eş.2.26'da ise 2x1'lik 'J' matrisi, σ_T fonksiyonundaki bilinmeyenlere (a,h) göre türevini göstermektedir. σ_T fonksiyonunun maksimum olduğu değerin ve bu noktadaki a ve h bilinmeyenlerinin bulunması için J matrisinin 0'a eşitlenmesi gerekir.

Matlab programı kullanılarak; fmincon yöntemi ile farklı fiber yarıçap (a) değerleri için oluşan maksimum adezyon basıncı (σ_T) değerleri için, optimum fiber uzunluğu elde edilmiştir (bkz. Ek 6). Buna göre, fiber dizininden maksimum adezyon basıncı elde etmek için, değişen fiber çapına göre seçilmesi gereken fiber boy/en oranı ($\lambda=h/2a$) Şekil 2.34'te gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde fiber çapı arttıkça, fiberin sahip olabileceği boy/en oranı artmaktadır fakat maksimum adezyon basıncı için küçük fiber çapının (2-20 μ m) seçilmesi gerekmektedir. Bu çap

aralığında seçilen fiberlerden (PDMS ile üretilmiş) maksimum adezyon elde etmek için fiber boy/en oranı ise $0.8 < \lambda < 1.4$ aralığında olmaktadır.



Şekil 2.34. Maksimum adezyon basıncı için, fiber çapına göre optimum boy/en oranı ($\lambda=h/2a$) grafiği



Şekil 2.35 Maksimum adezyon basıncı için, fiber çapına göre optimum boy/en oranı ($\lambda=h/2a$) grafiğinin eğri uyarlama metodu ile eğri denkleminin bulunması

Fiber çapına bağlı olarak çizdirilen fiber boy/en oranı eğrisine en yakın eğrinin denklemini Matlab programında eğri uyarlama metodu (curve fitting, 'cftool') ile bulunmuştur. Buna göre Şekil 2.35'de gösterilen siyah noktalar; belirli bir malzeme ve fiber çapı için optimum boy/en oranını vermektedir, kırmızı eğri ise uyarlanan eğriyi göstermektedir.

Eğri uyarlama yöntemi ile; fiber çapına göre, optimum fiber boy/en oranının bulunduğu eksponansiyel denklemini Eş.2.26'da gösterilmiştir;

$$\lambda_{opt}(a) = k_1 e^{(k_2*a)} + k_3 e^{(k_4*a)} \quad (2.26)$$

Yukarıdaki eşitlikteki; k_1 , k_2 , k_3 ve k_4 katsayıları aşağıda verilmiştir:

$$k_1 = 1.359$$

$$k_2 = 0.006713$$

$$k_3 = -0.6664$$

$$k_4 = -0.0791$$

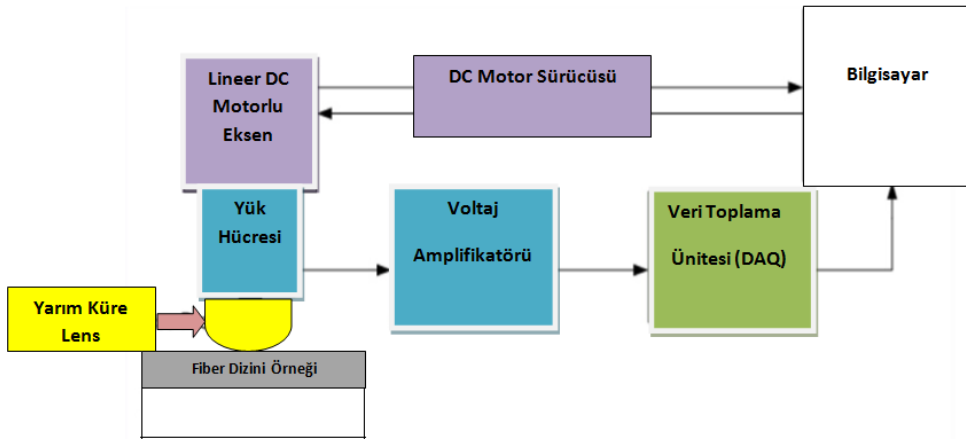
3. TEST DÜZENEĞİ VE FİBER DİZİNLERİNİN TESTLERİ

3.1 Özet

Bu bölüm; fiber dizinlerinin teorik olarak hesaplanan ve optimize edilen adezyon (yapışma) kuvvetlerinin, deneysel olarak karşılaştırılması için kurulan deney düzeneğinin çalışma prensibini, düzenekteki tüm komponentlerin görevlerini ve üretilen fiber dizinlerinin testlerinin yapılarak adezyon basınçlarının bulunması ve teorik hesaplar ile karşılaştırılması konularını kapsamaktadır.

3.2 Test Düzeneğinin Amacı

Bu test düzeneğinin amacı; teorik olarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda üretilen fiber dizinlerinin verdikleri adezyon değerlerinin ölçülerek teorinin doğruluğunun kontrolünün yapılmasını sağlamaktır. Bu test düzeneğinin çalışma şeması aşağıda gösterildiği gibidir;



Şekil 3.1. Test Düzeneği Çalışma Şeması

3.3 Test Düzeneğinin Çalışma Prensibi

Programlaması LabVIEW 2009 programı ile yapılan test düzeneğinde; bilgisayardan motor sürücüsüne gönderilen komut ile sürülen tek eksenli lineer motorun ve bu lineer motorla birlikte hareket eden küresel lensin aşağı doğru hareketi sayesinde, tablada bulunan fiber dizinlerine basma kuvveti uygulanacaktır. Böylece, fiber dizinlerine belirli bir önyükleme yapılmış olacaktır. Bu ön yükleme kuvveti, voltaj olarak yük hücresi tarafından ölçülür, daha sonra bu voltaj değeri, amplifikatörde ± 10 V aralığına yükseltilir. Bu sırada veri toplama ünitesi; yük hücresinin analog çıkış değerini, dijital değere çevirip bilgisayarda bu değerleri

okuyabilmemizi sağlayacaktır. Daha sonra, isteğe bağlı belirli bir zaman beklendikten sonra, tek eksenli lineer motorun ters yöne (yukarı) hareketi sağlanacak ve fiber dizinlerine çekme gerilmesi uygulanacaktır. Lineer eksen yukarı doğru hareket ederken yük hücresi oluşan gerilme kuvvetlerini ölçecektir. Ölçülen bu kuvvetlerden tepe noktası test edilen fiber dizininin verebileceği azami adezyon kuvveti olarak değerlendirilecektir.

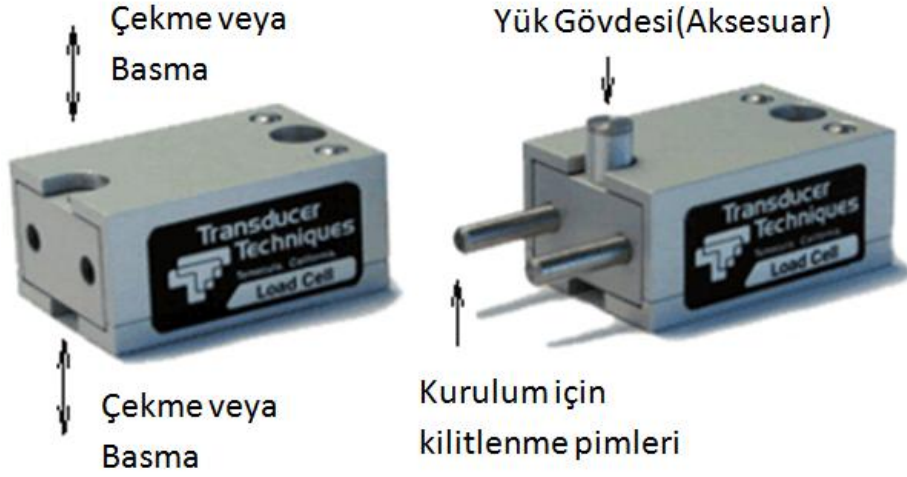
3.3.1 Yük Hücreleri

Üretilen fiber dizinlerinin adezyon kuvvetlerinin deneysel olarak bulunabilmesi için yük hücrelerine gereksinim duyulmaktadır. Fiber dizinlerine önce basma daha sonra çekme gerilmeleri uygulanacağından, kullanacak yük hücrelerinin hem basma hem de çekme yüklemelerini algılayabilmesi gerekmektedir. Bu testler sırasında kullanılacak küresel lensin çapı 5 mm'dir, bir başka deyişle en yüksek yapışma alanı yaklaşık 80 mm² olacaktır. Daha önceki tecrübelerden ve makale araştırmalarından ortaya çıkacak fiberlerin adezyonu 5-50 kPa arası olacağı tahmin edilmektedir [17] [42]. Bu durumda yük hücresinin çalışma aralığı 40 gram ile 450 gram aralığında olmalıdır. Bu kapsamda seçilecek yük hücresi bu aralıkta çalışabilmelidir. Bunun haricinde, bilimsel çalışmalarda kullanılan yük hücrelerinden istenen diğer özellikler; yüksek doğrusalılık, yüksek tekrarlanabilirlik, düşük histerezisdir. Bu bağlamda deney düzeneğinde kullanılacak yük hücrelerinin; Transducer Techniques firmasının GSO serisi 100 ve 500 gram kapasiteli yük hücreleri olmasına karar verilmiştir. Daha sonraki araştırmalarda bu marka yük hücrelerinin çok güvenilir olduğu ve bir çok adezyon testinde bilimsel çalışmalarda kullanıldığı tespit edilmiştir [29] [37] [16].

Transducer Techniques' in GSO seri yük hücrelerinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

Ekipman	Marka	Model	Özellik
Yük Hücreleri	Transducer Techniques	GSO-100	100 Gram Kapasite(Çekme ve basma)
		GSO-500	500 Gram Kapasite (Çekme ve basma)

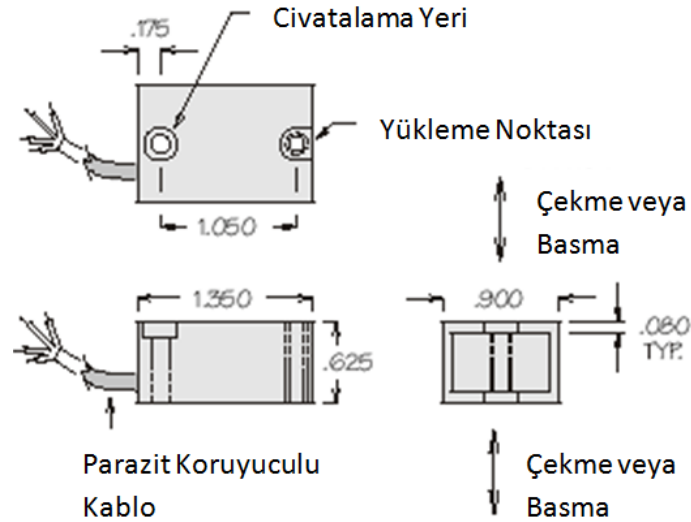
Çizelge 3.1 Yük hücrelerinin genel özellikleri



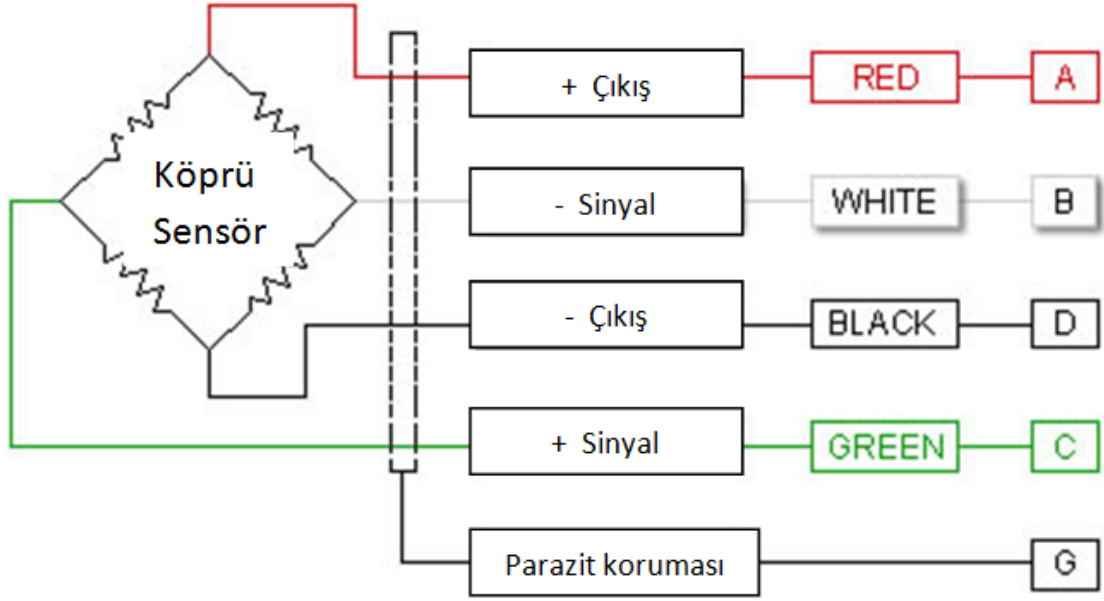
Şekil 3.2. Yük hücreleri

Çıkış Anma Gerilimi (R.O.)	1 mV/V nominal
Lineer Olamama Oranı	0.05%
Histerezis	0.05%
Tekrarlanabilirlik Hatası	0.05%
Çıkış Gerilimi	10 VDC
Azami Yük Taşıma Kapasitesi	150%

Çizelge 3.2. Yük Hücrelerinin Teknik Özellikleri



Şekil 3.3. Yük Hücresinin Teknik Çizimi ve Tanımlamaları



Şekil 3.4. Yük Hücresinin Devre Şeması ve Giriş Çıkış Kabloları

3.3.2 Yük Hücresi Amplifikatörü

Test düzeneğinde kullanılan yük hücresinin çıkış voltajı 1mV/V'dur. Bu değeri, bilgisayarda okunabilecek bir değere (voltaj aralığına) yükseltmek için bir amplifikatöre ihtiyaç vardır. Aynı zamanda test düzeneğinde kullanılan amplifikatörün, yük hücreleri ile aynı üretici tarafından üretilmiş olması sistemin uyumluluğu açısından önemlidir. Bu nedenle seçilen yük hücrelerini üreten firma olan Transducer Techniques'ten birçok veri toplama kartlarının çalışma aralığı olan ± 10 Volt aralığında çalışan TMO-2 serisi yük hücresi amplifikatörünün kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.5. Amplifikatör Fotoğrafı

TM-2 modeli ayarlı bir çıkış voltajı vermektedir. Tüm ölçekli çıkışı ± 10 Volt arasındadır. TM-2 amplifikatöründe, yük hücresine kalibrasyon uygulayan “floating shunt” kalibrasyon devresi bulunmaktadır; bu şekilde, hatta meydana gelebilecek hatalar yok edilmektedir. TM-2 amplifikatörü standart kesme frekansı 16 Hz olan “low pass filtre” ile donanımlıdır.

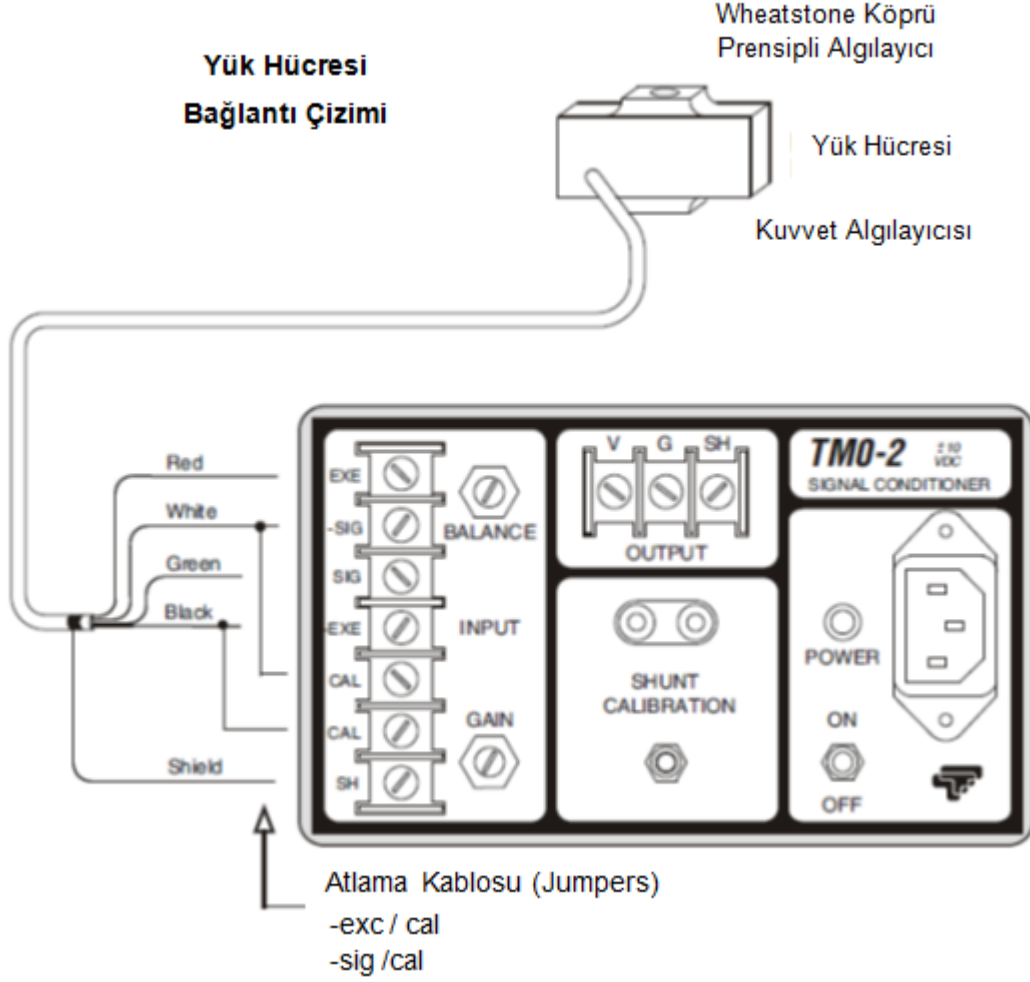
Kurulum Prosedürü ve Kalibrasyon: Amplifikatör ekipmanının kurulumu ve kalibrasyonu için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

1. Yük hücresi input terminal bloğuna Çizelge 3.3’de gösterilen giriş ve çıkışlara kablolar bağlandı.

4 Kablolü Yük Hücresi	TM-2
RED (KIRMIZI)	EXC
WHITE (BEYAZ)	-SIG
GREEN (YEŞİL)	SIG
BLACK (SİYAH)	-EXC
SHIELD (KORUYUCU)	SH

Çizelge 3.3. Yük Hücresi Bağlantı Kablo Renkleri ve Girişleri

2. V ve G çıkış terminallerine dijital voltmetre bağlanarak, pozitif prob V’ye bağlanır.
3. Güç anahtarı açılarak, güç kablosunu elektrik prizine bağlandı. Amplifikatörün çalıştığını yeşil ışığın yanması ile doğrulandı.
4. Voltmetre “sıfır” değerini gösterinceye ya da çok yaklaşıncaya kadar denge potansiyometresi ayarlandı (offset ayarı).
5. Bilinen bir ağırlığı (dead weight) yük hücresine bağlandı.
6. Bilinen ağırlığı gösterene kadar kazanım (gain) potansiyometresi ayarlandı.
7. Bilinen ağırlık kaldırıldı.
8. TM-2’nin kalibrasyonu yapıldı ve kullanıma hazırdır.



Şekil 3.6. Amplifikatör Konfigürasyonu

3.3.3 Veri Toplama Ünitesi

Deney düzeneğinde kullanılacak olan veri toplama ünitesinin amacı; yük hücresinden elde edilen verilerin dijitalleştirilerek bilgisayar ortamında kullanılabilmesini sağlamaktır. Bu ünitenin seçiminin, deney düzeneğindeki diğer ekipmanların teknik özelliklerine göre yapılması gerekmektedir. Veri toplama ünitesine, amplifikatör aracılığı ile bağlanacak olan yük hücresinin 10 bitlik bir hassasiyeti vardır. Buna göre veri toplama ünitesinin, yük hücresinden gelen verileri işleyebilmesi için, olası veri kaybını ve daha sonra diğer portlarında başka amaçlar doğrultusunda kullanılabileceğini göz önünde bulundurarak, en az 14 bitlik bir sistem olması gerekmektedir. Ancak veri toplama ünitesinin sadece adezyon testlerinde değil daha birçok farklı uygulamalarda kullanılabilmesi öngörülmektedir. Bu nedenle bu ünitenin 16 bitlik bir sisteme sahip olmasına karar verilmiştir. Adezyon ölçümü deney düzeneğinde yük hücresi amplifikatörünün tüm ölçekli

çıkışı ± 10 volt arasındadır. Bu sebeple veri toplama ünitesinin girişinin de en az ± 10 V olması, uyumluluk açısından önemlidir. “National Instruments” firmasının sertifikalandırdığı “Transducer Techniques” marka yük hücrelerini deney düzeneğinde kullanılmasından dolayı ve NI ürünlerinin güvenilirliğinden dolayı veri toplama ünitesi seçiminde de “National Instruments” markasını tercih edilmiştir. Yukarıda bahsi geçen özellikler sonucunda Şekil 4.6’daki ürün seçilerek alımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Veri Toplama Ünitesi

Şekil 3.7de gösterilen veri toplama ünitesi National Instruments firmasının NI-USB 6343 X Serisi modelidir.

Bu ünitenin ana özellikleri şu şekildedir:

- 32 analog input ,500 kS/s, 16 bit çözünürlük, ± 10 V
- 4 analog çıkış, 900 kS/s, 16 bit çözünürlük, ± 10 V
- 48 dijital I/O hattı (32 donanım - 1 MHz ye kadar zamanlama)
- PWM, frekans, sinyal kodlayıcı ve daha fazlası için dört 32 bit sayaç / zamanlayıcısı.
- Windows 7/XP/Vista da sorunsuz çalışmaktadır.

Bu veri toplama ünitesi Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliğinde bulunan LabVIEW yazılımı ile uyumludur, bu nedenle deney düzeneğinin yazılımsal tasarımı LabVIEW programı ile gerçekleştirilmiştir.

3.3.4 Lineer DC Motorlu Eksen

Deney düzeneğinde fiberlerin sıkışma (ön yükleme) miktarı farklı testler için farklı değerler gerektirebilir. Bu değerler fiberlerin boylarından dolayı hassas bir şekilde

kontrol edilmelidir. Fiberli yapıların belirlenen ön yüklemelere ulaşmasından sonra motor, belirlenen ön yükleme değerini çok fazla geçmeden durabilmelidir. Bu yüzden kullanacağımız lineer eksenli motorun oldukça düşük artımlı hızlarla hareket etmesi gerekmektedir. Fiberlerin boyları 10 – 60 μm arasında olacak şekilde tasarlanmıştır. Düşük ön yüklemeler sırasında yaklaşık 10% sıkışma gerçekleşmektedir. Buna göre 1 μm mesafe yeterli hassasiyetle ölçülebilmelidir. Bu mesafeyi %10 hassasiyette ölçebilecek lineer aktüatör düzeneğinin 0.1 μm civarında artımlı hareket kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Bu verilere uygun olarak Newport firmasından MFA-CC model Lineer DC Motorlu Ekseni seçilmiş ve tedarik edilmiştir. Bu modelin küçük artımlı hareket gerektiren uygulamalarla birlikte iyi bir tekrarlanabilirlik gerektiren ve yüksek aralıklı dinamik hız uygulamalarında da rahatlıkla kullanılabilceği belirtilmektedir. Ayrıca bu lineer aktüatör sistemi bir çok bilimsel araştırmada da aktif olarak kullanılmaktadır ve kalitesini ve hassasiyetini bu çalışmalarda kanıtlamıştır [29] [37][62][63].



Şekil 3.8. Lineer DC Motorlu Eksen

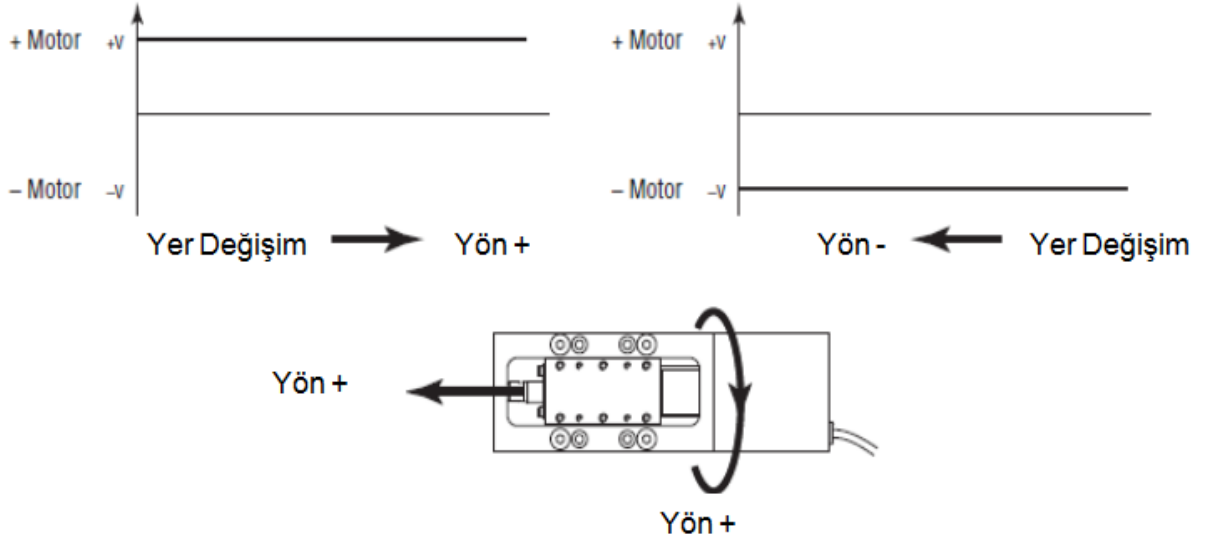
Özellik	Lineer Motorlu Eksen
Hareket Aralığı	25 mm
Çözünürlük	0.0175 μm
Minimum Artımlı Hareketi	0.1 μm
Maksimum Hız	2.5 mm/s
Ağırlık	0.6 kg

Çizelge 3.4. Lineer DC Motor Eksenin Özellikleri

Motor	Nominal Gerilim(V)	Maksimum Akım(A)	Rezistans (Ω)	Endüktans (mH)

UE1724SR	24	0.2	54.6	1.19
----------	----	-----	------	------

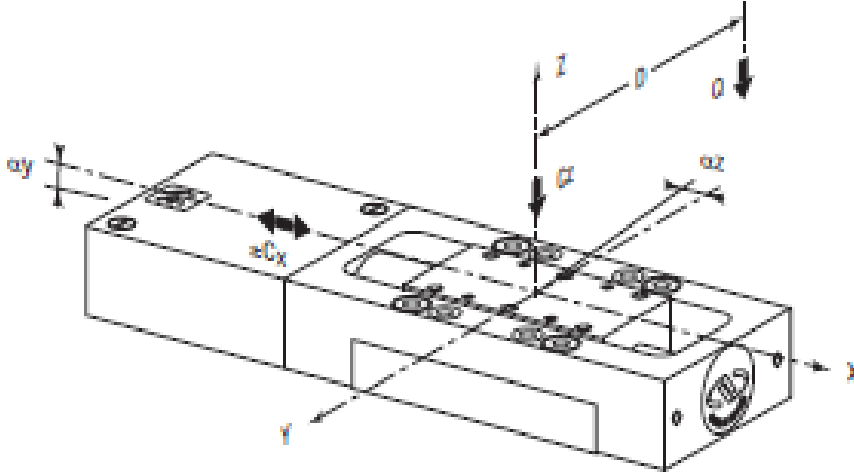
Çizelge 3.5. Motor Karakteristikleri



Şekil 3.9. DC motor için komut sinyalleri

Cz ; Normal Merkezli Yük Kapasitesi (z eks.)	50 N
$\pm C_x$; Eksenel Yük Kapasitesi (x eks.)	10 N

Çizelge 3.6. Lineer motorlu eksenin Yük Karakteristikleri ve Sağlamlığı



Şekil 3.10. Lineer motorlu eksenin eksen ve yük yönlerinin gösterimi

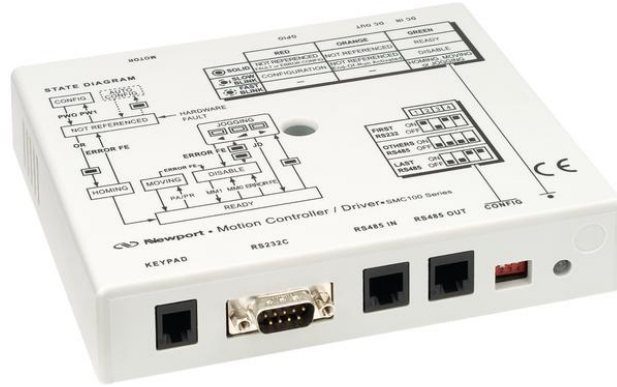
3.3.5 Lineer DC Motorlu Eksen Sürücüsü

Deney düzeneği, fiberler üzerinde sadece basma ve çekme hareketi yaptığı için tek bir eksenle hareket yeterli olacaktır. Ayrıca aynı düzenek sürtünme testlerinde de yine kullanılabilir. Bu sebeple motor sürücüsünün seçiminde tek eksenli kontrolünü sağlayan motor sürücüsü seçilmesi en ekonomik çözüm olacaktır.

Deney düzeneğinde kullanılmak üzere seçilmiş lineer DC motorun sürülmesi için geliştirilmiş motor sürücüsü, Newport firmasının SMC100CC modelidir. Bu sürücünün de kontrolü LABVIEW 2009 programı kullanılarak yapılmıştır.

Kontrol Kabiliyeti	Kapalı ve açık çevrim operasyonları
Motor Çıkış Gücü	1.5 A rms de 48 VDC, 3 A (Peak/Tepe nokta)
Kontrol Çevrimi	Hız ve sürtünme ileri besleme ile birlikte Değişken noktalı PID çevrim
	Boşluk (backlash) kompanzasyonu
Hareket	Ani süre(jerk time) kontrolü ve S-gamma profili ile noktadan noktaya hareket kontrolü
Bilgisayar ile Haberleşme	USB
Genel Kararlılık I/O	4 TTL çıkış(açık kollektör)
	4 TTL giriş(2.21 kΩ, 5V a kadar çekme)
	1 analog giriş, ±10 V, 8-bit

Çizelge 3.7 Lineer DC Motorlu Eksen Sürücüsü Özellikleri



Şekil 3.11. Lineer DC Motorlu Eksen Sürücüsü

3.3.6 Yarım Küre Lens

Fiber dizinlerinin yapışıp ayrılacağı yüzey lineer motor eksenine, fiberler ise zemindeki yüzeye sabitlenir. Bu tür deney düzeneklerindeki en büyük sorun, fiber yüzeyi ile yapışma yüzeyi arasındaki açı farkıdır. Eğer bu iki yüzey birbirine paralel değilse ölçümler gerçek değerlerinden çok fazla sapacaktır. Bu paralelliğin sağlanması amacıyla literatürde sıklıkla karşılaşılan çevrimli eksenler (tilt eksen)

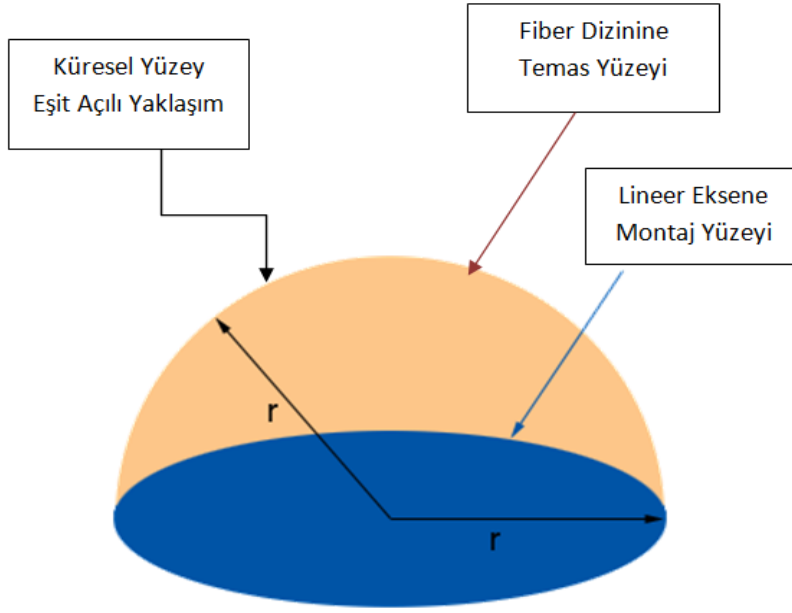
kullanılmaktadır. Bu çevrimli eksenler kullanılarak kamera, göz ya da deneme yanılma tekniği ile paralellik sağlanmaya çalışılır. Deneme yanılma tekniğinde yapılan her bir deney ile açılar değiştirilir ve ulaşılan en yüksek adezyonun alındığı açı değerleri paralelliğin sağlandığı açı değeri olarak kabul edilerek sabitlenir. Ancak bu işlem her bir fiber dizini yerleşiminden sonra tekrarlanmalıdır. Sonuç olarak; çevrimli eksen çözümleri oldukça pahalı ve pratik olmayan bir çözüm yoludur. Bu yüzden bu deney düzeneğinde; fiber dizinlerine oranla oldukça büyük çaplı (1:1000 oranında) bir yarım küre lens kullanılacaktır, bu sayede fiberler ile yarım küre şeklindeki lens arasındaki açının hiçbir önemi kalmayacak ve deneyler tekrarlanabilirlik özelliği kazanacaktır. Bu durum Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Bu yöntem sayesinde, deney düzeneğindeki olası paralellik problemi, pratik ve ekonomik bir yöntem ile çözüme ulaştırılmış olur.

Ayrıca yarım küre lenslerin yüzeylerindeki eğim, profili tam olarak bilinen pürüzlü bir yüzeyi temsil edecektir. Gerçek hayatta ise bu profili çıkarmak oldukça zahmetli olmaktadır, ya da çıkarılan yüzeyler üzerinde yapılan deneyler bir süre sonra tekrarlanabilirlik özelliğini yitirmektedir. Yarım küre lensin profilinin bilinmesi profili çok iyi bilinen bir pürüzlü yüzeyi temsil edecek ve teorik hesapların yapılmasını kolaylaştıracaktır.

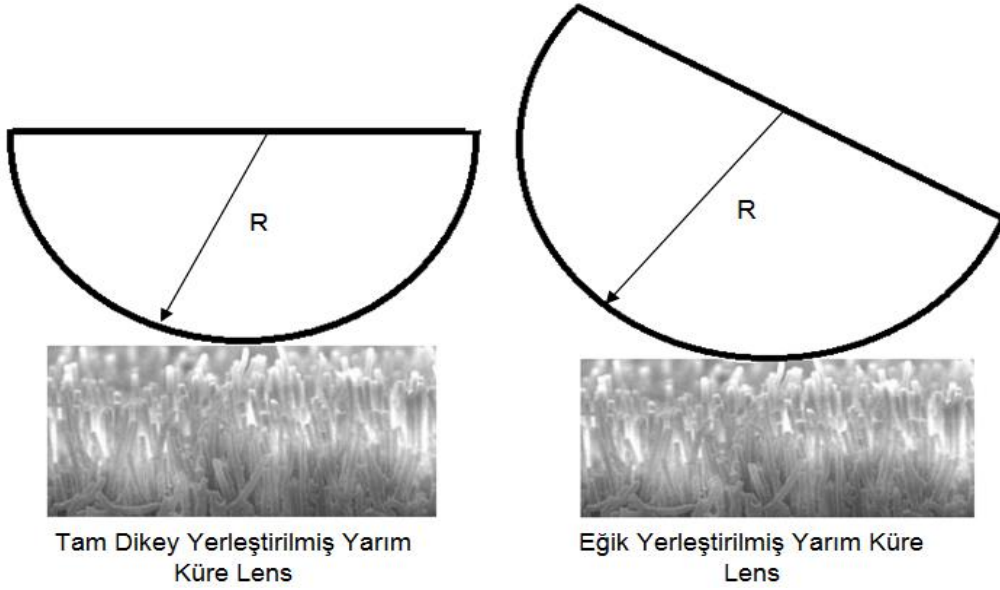
Testleri gerçekleştirilecek olan fiber çapları 4 – 20 μm arasında değişmektedir. Bu deney düzeneğinde kullanılacak olan küresel lenslerin çapları ise 5 – 10 mm olacaktır. Böylece birçok fiberin aynı anda yüzeye teması ya da ayrılması sağlanacak ve istatistiki olarak deney sonuçlarının güvenilirliği artırılmış olacaktır. Küresel lensleri kullanan birçok çalışma literatürde mevcuttur [64][65][66].



Şekil 3.12. Yarım Küre Lens Fotoğrafı



Şekil 3.13. Yarım Küre Lens Çizimi



Şekil 3.14. Yarım küre lensin fiber dizinleri ile farklı açılardaki etkileşimi

3.4 Test Düzeneginin Üretimi ve Yazılımı

Bu düzenek mekanik bir yapıya ek olarak yazılımsal ve donanımsal yapılar içermektedir. Donanımsal bilgiler bölüm 3.3'de verilmişti. Bu bölümde ise bu test düzeneginin tasarımı, üretimi ve yazılımı hakkında konular yer almıştır.

3.4.1 Test Düzeneğinin Programlanması

Fiber numunelerinin adezyon testlerinin belirli değişkenlere göre gerçekleştirilebilir. Kurulan test düzeneğinde, bu parametrelerin değerleri değiştirilerek en yüksek adezyon kuvvetlerinin hangi koşullarda elde edildiği belirlenir. Buna göre fiberlerin boyutsal değişkenlerinin haricinde test düzeneği için öngörülen değişkenler aşağıda verilmiştir;

- Lineer eksenin fiber numunesine yaklaşma hızı (0-2.5 mm/s) ,
- Lineer eksenin fiber numunesinden uzaklaşma hızı (0-2.5 mm/s) ,
- Lineer eksene bağlı olan yarım küre lensin fiber numunesine uygulayacağı basma kuvveti (500 gr'lık yük hücresi için 0 – 5 N, 100 gr'lık yük hücresi için ise 0 – 1 N)
- Lineer eksene bağlı olan yarım küre lensin, belirlenen basma kuvvetine ulaştığında, fiberler üzerinde bekleme süresi.

Yukarıda belirtilen değişkenlere göre testler gerçekleştirilirken bu testler sırasında yük hücresinden elde edilen voltaj değerleri, amplifikatörde yükseltılarak veri toplama ünitesine gönderilecek ve burada dijitalleştirilerek Newton cinsinden bilgisayar belleğine kaydedilecektir. Test düzeneğinin programlanması Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan LABVIEW 2009 programı ile yapılmıştır. LABVIEW yazılımı ile bilgisayardan motor sürücüsüne gönderilen komut ile tek eksenli lineer motorun hız ve pozisyon kontrolü yapılabilmektedir. Bu hareket sırasında, lineer eksenin üzerine montajlı yük hücresi ve küresel lens tablada bulunan fiber dizinlerine basma kuvveti uygulayacaktır. Burada kullanılan küresel lens, 3.3.6 bölümünde ayrıntılı olarak belirtildiği üzere profili iyi bilinen pürüzlü yüzeyi temsil etmektedir. Küresel lensin basma kuvveti 0 – 5 N arasında herhangi bir değer olabilmektedir (motor sürücüsü ile yük hücresi arasında bir yazılım ile oluşturulan kontrol döngüsü vardır). Böylece, fiber dizinlerine istenilen önyükleme yapılmış olacaktır. Daha sonra, isteğe bağlı olarak, belirli bir zaman beklendikten sonra tek eksenli lineer motorun ters yöne (yukarı) hareketi sağlanacak ve fiber dizinlerine çekme gerilmesi uygulanacaktır, böylece yük hücresi oluşan kuvvetleri ölçecek ve ölçülen bu kuvvetlerden tepe noktası test edilen fiber dizininin verebileceği azami adezyon olarak değerlendirilecektir.

LABVIEW yazılımı kullanılarak yazılan bu programın program akış sıralaması, Çizelge 3.8'deki gibidir;

Adım No	Test Düzeneği Aksiyon Sıralaması
1	Lineer Motor resetlenir. Lineer Eksen Başlangıç konumuna alınır.
2	Lineer Motor hareketi için ve kuvvet ölçümü için DAQ ve motor sürücüsünün, bilgisayar ile port bağlantıları kurulur.
3	Lineer eksen fiber numunesine doğru hareket etmeye başlar.
4	Newton birimine göre kalibre edilmiş yük hücresinden kuvvet değerleri okunmaya başlanır.
5	Lineer Eksenin hareketi ile, yük hücresi fiber Numunesine bastırmaya başlar.
6	Fiber Numunesine uygulanacak olan Ön yükleme kuvvetine ulaşılır.
7	Lineer Eksen durur, ve istenilen bekleme süresince bekler.
8	Lineer Eksen, yukarı (fiber numunesinden ayrılış) yönde belirlenen bir hızla belirlenen pozisyona doğru hareket eder.
9	Lineer Eksen yukarı çıkarken, elde edilen kuvvet okunarak, ön yükleme kuvvetine karşılık fiberlerden elde edilen adezyon kuvveti ölçülür.
10	Test sırasındaki tüm parametreler Excel dosyasına yazılır ve test sonlanır.

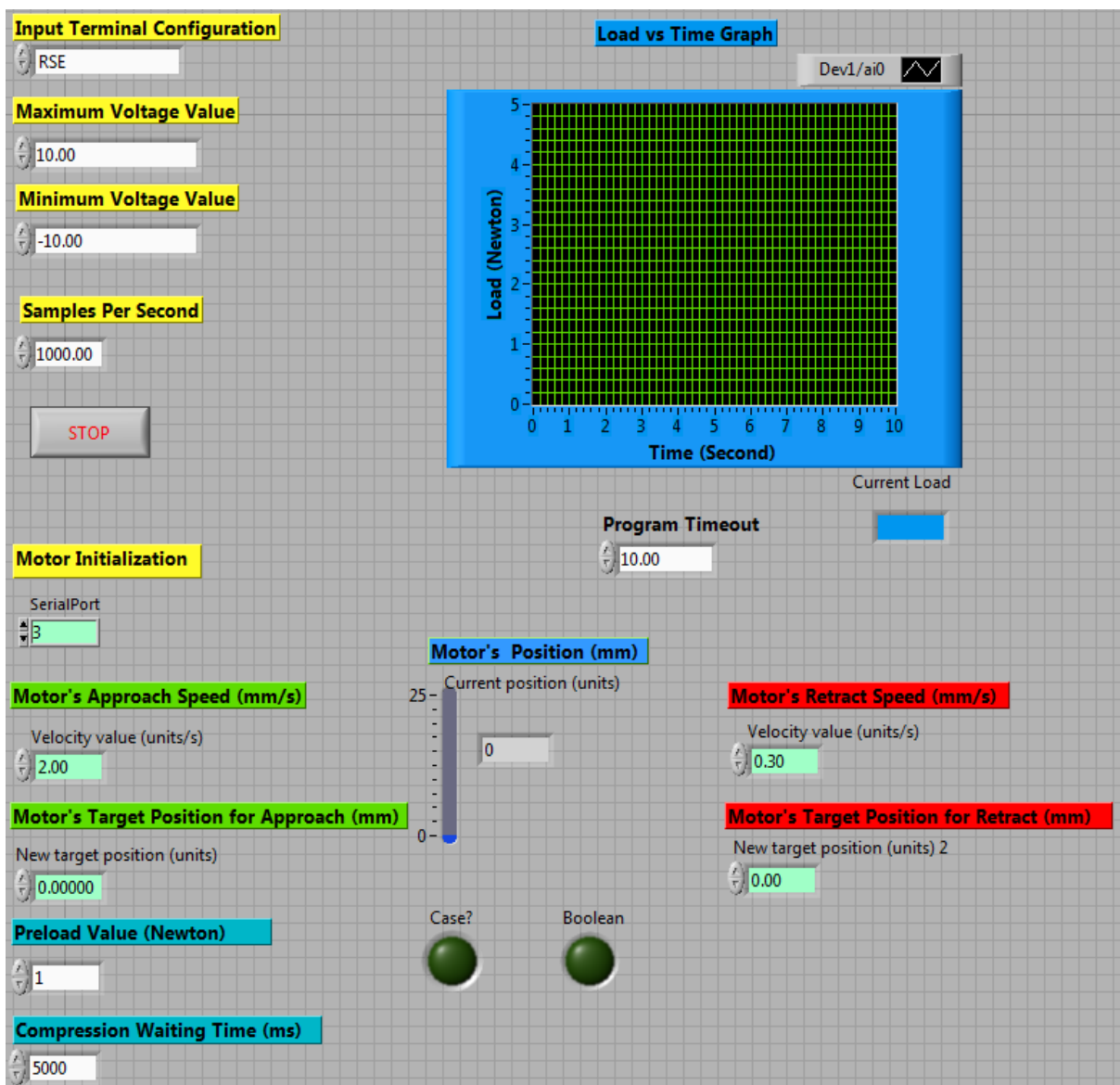
Çizelge 3.8. Program mantık adımları

Kullanıcı Arayüzü: Test sırasında istenilen tüm parametreler, Şekil 3.15'de görülen kullanıcı ön panelinden sisteme girilir ve sonrasında test için "run" tuşuna basılır. Bu arayüzünün kullanıcıya sunduğu değişkenler şu şekildedir;

- Lineer motorun haberleşeceği seri port,
- Lineer eksenin fiber numunesine yaklaşma hızı (0 - 2.5 mm/s) ,
- Lineer eksenin fiber numunesinden uzaklaşma hızı (0 - 2.5 mm/s) ,
- Lineer eksenin fiber numunesine yaklaşma için hedef pozisyonu (0-25 mm)
- Lineer eksenin fiber numunesinden uzaklaşma için hedef pozisyonu (0 -25 mm)
- Lineer eksene bağlı olan yarım küre lensin fiber numunesine uygulayacağı kuvvet (500 gr'lık yük hücresi için 0 – 5 N, 100 gr'lık yük hücresi için ise 0 – 1 N)

- Lineer eksene bağı olan yarım küre lensin, belirlenen basma kuvvetine ulaştığında, fiberler üzerinde bekleme süresi,
- DAQ'a minimum voltaj girdi değeri (-10V),
- DAQ'a maksimum voltaj girdi değeri (+10V).



Kullanıcı ara yüzünden test sırasında ortaya çıkan kuvvet ve lineer motor pozisyonları okunabilmekte ve bu bilgiler bir Excel tablosuna yazılmaktadır. Böylece bu bilgiler test sonrasında ikincil işlemler ve değerlendirme için kullanılabilir. Bu test düzeneğinin yazılım açıklama tablosu Çizelde 3.9.'da verilmiştir.



Şekil 3.15. Test Düzeneği Yazılımı Ön Panel Görüntüsü

Durum	Lineer Motor Sürücüsü	Veri Toplama Ünitesi (DAQ)
Kurulum ve Haberleşme	Kurulumun başlaması için 5 saniye beklenir.	Voltaj ölçümü için port bağlantısı kurulur.
	Port bağlantısını kurulur.	
	Lineer Eksen Motor sürücüsünü resetlenir.	Alınacak örnek sayısını belirlenir.
	Lineer Motor istenilen değere ayarlanır.	Ölçüme başlanır.
	Lineer Eksen başlangıç konumuna gelir.	
1. Durum(True Case)	Lineer Eksen, aşağı doğru harekete başlıyor.	Ölçülen Kuvvet değeri, zamana bağlı olarak okunur ve Excel programına yazılır.
Yük değeri önyükleme değerine ulaşıncaya kadar 1. Durumda kal.	Lineer Eksen, aşağı doğru hareketine devam ediyor.	
Yük değeri, ön yüklemeye ulaştığında 2.Duruma geç.	Lineer Eksen, aşağı doğru hareketine devam ediyor.	
2.Durum	Lineer eksen "Dur" komutunu alır ve istenilen basma(fiber üzerine) süresince bekler.	
2.Durum	Yukarı çıkış hızını belirlenir.	
2.Durum	Eksen yukarı doğru harekete başlar Okunan anlık kuvvet değeri, önyüklemeye değerinin altına düştüğünde, yukarı doğru hareketine devam et.	

Çizelge 3.9 Test düzeneği durum açıklamaları

Test Düzeneği Programı Blok Diyagramı: Ek1'de test düzeneğinin programı gösterilmiştir. Bu program; Veri toplama ünitesi (DAQ) ve Lineer motor sürücüsü komutlarından oluşmaktadır. Ek 1'deki programda Veri toplama ünitesinin komutları mavi kutucuklar içinde () numaralandırılmıştır, lineer motor sürücüsünün komutları ise kırmızı kutucuklar içinde () numaralandırılmıştır. Bu kutucukların bulunduğu bölgedeki komutların işlevleri ise numaralarına göre Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11'de tanımlanmıştır.

No	Veri Toplama Ünitesi (DAQ) Program Adımları
1	Ölçümlerin yazılacağı Excel dosyası için bilgisayar belleğinde yer belirlenir.

2	Analog voltaj ölçümü için iletişim kanalı kurulur, minimum ve maksimum ölçülecek voltaj aralığı belirlenir.
3	Saniyede alınacak örnek sayısı belirlenir.
4	Voltaj ölçümüne başlanılır.
5	Ölçülen voltaj değerleri zamana bağlı olarak, Veri toplama ünitesi (DAQ) tarafından okunur.
6	Voltaj değerleri Newton birimine göre kalibre edilir.
7	Test ölçüm zamanı elde edilir.
8	Ölçülen kuvvet değerleri elde edilir.
9	Test ölçüm zamanı excel dosyasına yazılır.
10	Test sırasında ölçülen kuvvet değerleri excel dosyasına yazılır.
11	Excel dosyası kapatılır.
12	Test sırasında elde edilen kuvvete bağlı zaman grafiği çizilir.
13	Tüm ölçümler veri toplama ünitesinde yaratılan göreve yazılır.
14	Test sırasındaki oluşan hatalar(varsa) görüntülenir.

Çizelge 3.10. Veri Toplama Ünitesi(DAQ) Program Komut Açıklamaları

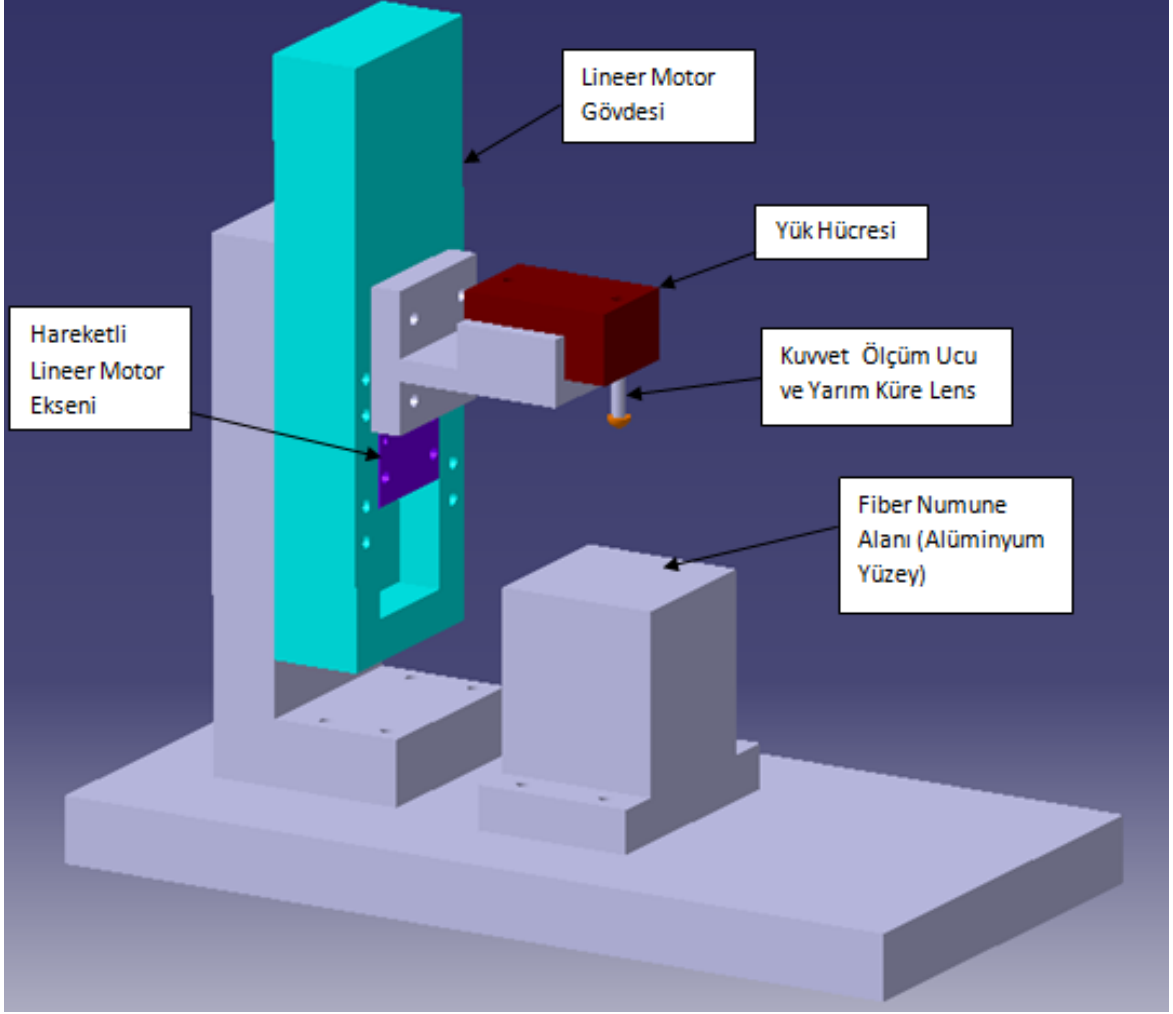
No	Motor Sürücüsü Program Adımları
1	Motor Sürücüsünün port bağlantısı kurulur, kurulum başlatılır, 5 saniye bekleme süresinden sonra, lineer eksen başlangıç pozisyonuna gelir.
2	Lineer eksenin anlık pozisyon bilgisi elde edilir.
3	Lineer eksenin fiber numunesine bastıracağı, ön yükleme kuvveti, belirlenir.
4	Lineer eksenin fiber numunesine yaklaşma hızı belirlenir.

5	Lineer eksen girilen hedef pozisyonuna göre, aşağı doğru (fiber numunesine doğru) harekete başlar.
6	Lineer eksen hedef pozisyonuna giderken, fiber numunesine bastırmaya başlar ve giderek artan bir kuvvet uygular.
7	İstenilen önyükleme değerine ulaşıldığında, lineer eksen durur
8	Lineer eksen, durduğunda, istenilen bastırma süresince bekler.
9	Lineer eksenin fiber numunesinden ayrılış/yukarıya çıkış hızı belirlenir.
10	Lineer eksenin fiber numunesinden ayrılış/yukarıya pozisyonu belirlenir.
11	Lineer motor sürücüsü ile iletişim kapatılır.

Çizelge 3.11. Lineer Motor Sürücüsü Program Komut Açıklamaları

3.4.2 Test Düzeneğinin CAD Tasarımı

Test düzeneğinin mekanik tasarımı CATIA V5R20 programı ile yapılmıştır. Fiberlerin adezyon test parametreleri doğrultusunda tasarlanan mekanik kurulum Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Şekil 3.16'da gösterilen tüm parçalar test düzeneğinde kullanılan ekipmanların gerçek ölçülerine göre tasarlanmış ve gerekli parçaların imalatları tasarımdaki ölçüler ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16'daki parçalardan açık mavi renkli parça lineer motor gövdesi, mor renkli parça hareketli lineer motor eksenidir. Bordo renkli parça yük hücresidir ve üzerinde yük hücreesine montajlı yük ölçüm ucu ve yarım küre lens bulunmaktadır. Fiber numunelerin üzerine konulacağı alan ise fiber numune alanı olarak Şekil 3.16'da gösterildiği gibi tasarlanmıştır.



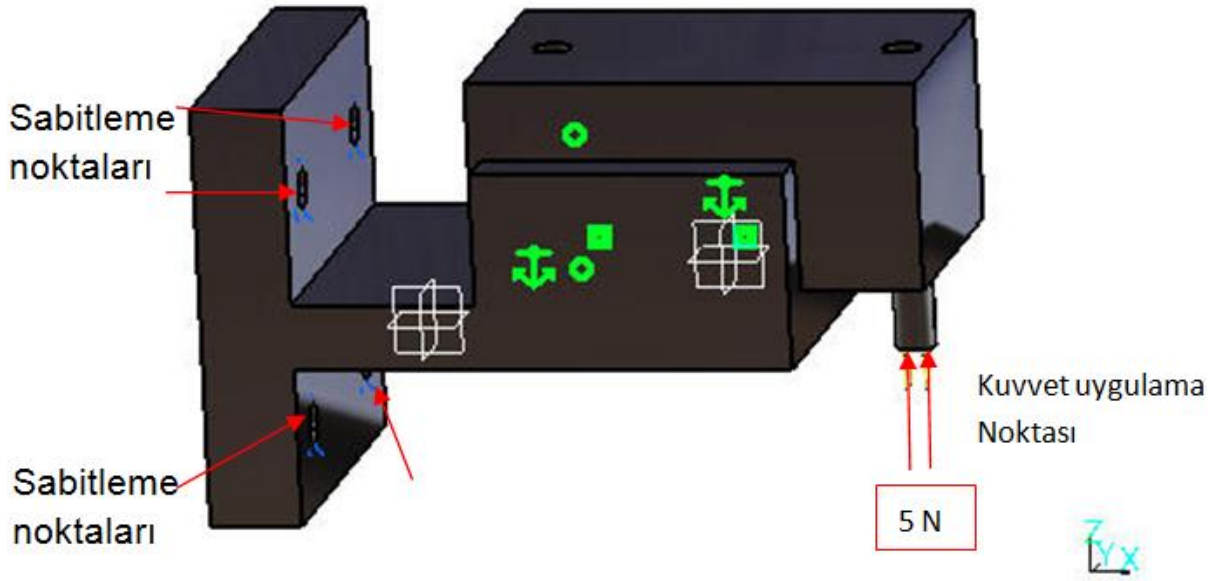
Şekil 3.16. Test Düzeneği Mekanik Tasarımı

3.4.3 Test Düzeneğinin Statik Analizi

Test düzeneğinde, fiber dizinlerine basma ve çekme gerilmelerini uygulayacak olan parça, Şekil 3.16'dan görülebileceği gibi 'kuvvet ölçüm ucudur'. Testleri yapılan fiber dizinlerinin boyları 10 μm civarında olmaktadır. Testler sırasında kuvvet ölçüm ucunda oluşabilecek mikron mertebesindeki deplasmanlar, fiberlere basma derinliğinin bulunmasında hatalara neden olabilir. bu sebeple bu test düzeneğinde kuvvetin etki ettiği bölgede (kuvvet ölçüm ucunda) oluşabilecek maksimum deplasmanın bulunması önemlidir. Buna göre bu test düzeneğinde, kuvvetin uygulandığı kritik parçalar için (kuvvet ölçüm ucu, yük hücresi ve yük hücresi taşıyıcı parça) mukavemet analizi gerçekleştirilmiştir.

Mukavemet Analizi: Test düzeneğinin CAD çizimi üzerinde kuvvetin etki ettiği kritik parçaların mukavemet analizi CATIA V5R20 programı kullanılarak Şekil 3.17'da

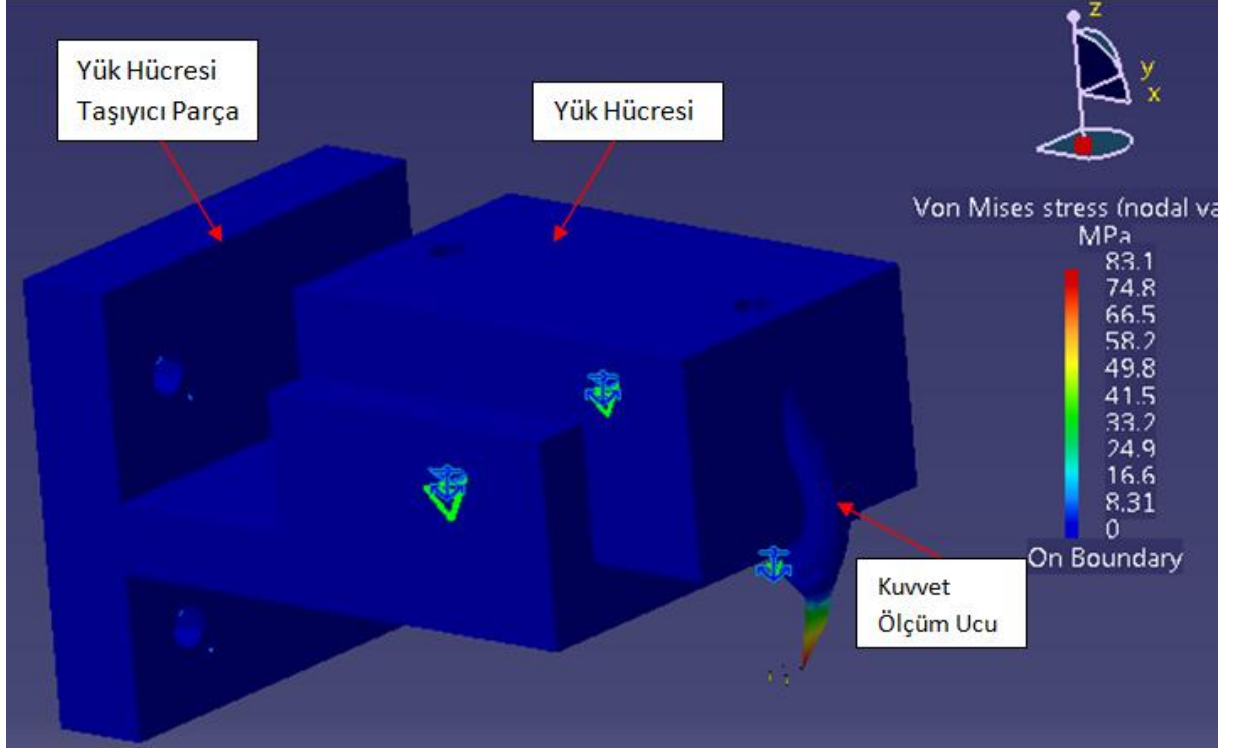
gösterildiği gibi yapılmıştır. Test düzeneğinde kullanılacak yük hücresinin maksimum kapasitesi 5 N'dur. Bu sebeple; fiberlerin yapışkanlık testleri için uygulanacak maksimum ön yükleme kuvveti de 5 N olmaktadır. Dayanım simülasyonunda bu kuvvet yük hücresinin kuvvet algılama noktası olan pime (kuvvet ölçüm ucu) uygulanmıştır. Buradaki amaç; von-mises streslerini ve malzemedeki maksimum deplasmanı bulmaktır. Bunun için gerekli olan mukavemet analizinin şart koşulları Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Statik Analiz Koşul Şartları

Yük hücresi ve yük hücresi taşıyıcısı parçaları alüminyum, yük ölçüm ucu ise çelik malzemesinden üretilmiştir. Buna göre Çizelge 3.12'de belirtilen malzeme özellikleri programda atanmıştır. Şekil 3.17'deki şart koşulları uygulanarak, test düzeneğine etki eden maksimum Von Mises gerilimi Şekil 3.18'de verildiği şekliyle 83.1 Mpa olarak yük ölçüm ucundadır. Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'de görülen deformasyon, gerçek deformasyonun ölçekleme faktörü ile çarpılması ile elde edilen çizimdir (maksimum deformasyonun nerede olduğunun görülebilmesi için deformasyonun olduğu yer abartılarak çizilmiştir). Şekil 3.19'dan görülen deplasman analizi sonuçlarına göre; kuvvet ölçüm ucunda oluşan maksimum deplasman değeri 0.314 μm 'dir. Bir başka deyişle motor 10 μm 'lik fiber yüksekliğine sahip fiber dizinine 5 N'luk bir kuvvet ile bastırıldığında yük uygulama ucu motorun olduğu pozisyondan 0.314 μm daha yukarıdadır ve ölçüm %3'lük bir deplasman hatasıyla gerçekleşmiş olmaktadır. (sistemin maksimum hata payı).

Fakat testler sırasında, fiber dizinlerine uygulanan ön yüklemeler 5 N değerine çıkmayacaktır, fiberlere uygulanan kuvvet 0-50 mN arasında olduğundan, gerçek deplasman çok daha küçük olacaktır.



Şekil 3.18. Von Mises Gerilimi Sonuçları

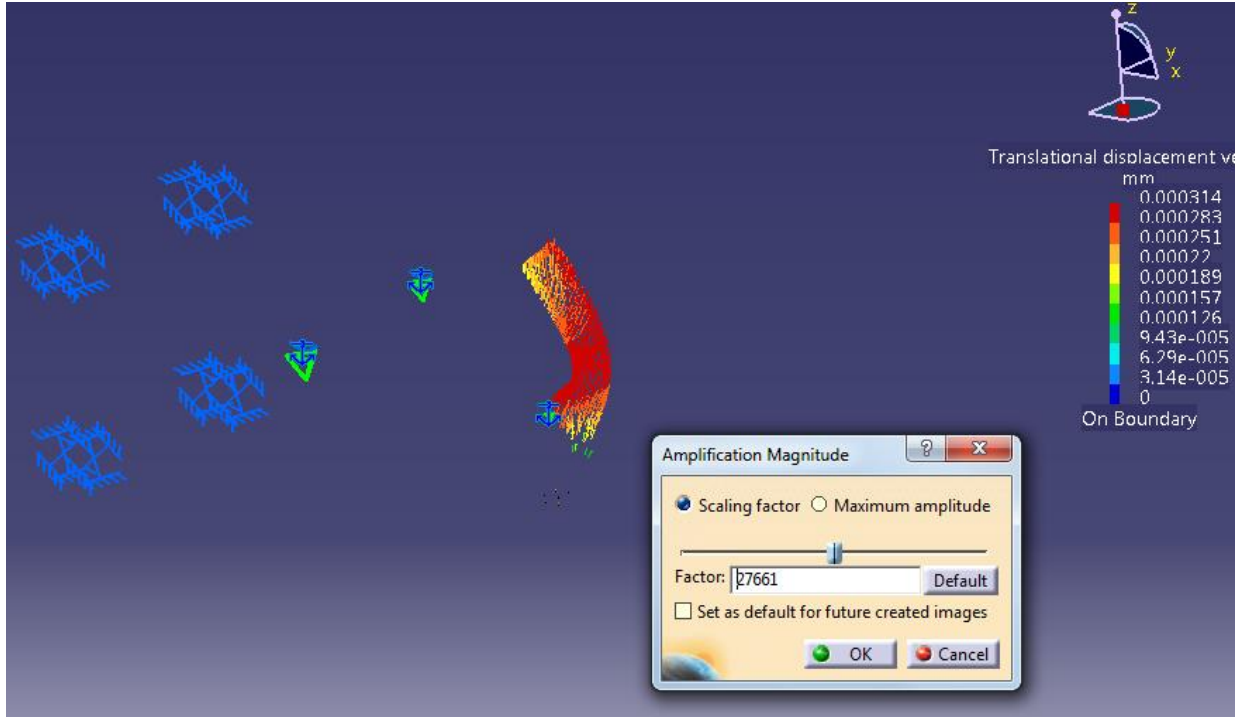
Mukavemet analizinde kullanılan, alüminyum ve çeliğin mekanik özellikleri aşağıdaki gibidir;

Parça İsmi	Yük Hücresi Taşıyıcı ve Yük Hücresi	Kuvvet Ölçüm Ucu
Malzeme	Alüminyum	Çelik
Elastisite Modülü	70 GPa	200 GPa
Poisson Oranı	0.346	0.266
Özkütlesi	2710 kg/m ³	7860 kg/m ³
Akma Dayanımı	95 MPa	250 MPa

Çizelge 3.12. Parçalarının Mekanik Özellikleri

Şekil 3.18'de verilen Von Mises gerilim sonuçlarına göre, maksimum gerilim, beklenildiği gibi kuvvet ölçüm ucunda gerçekleşmektedir. Bu parçaya etki eden maksimum gerilim değeri ise 83.1 MPa'dır. Kuvvet Ölçüm Ucu parçası çelikten üretilmiştir ve akma dayanımı 250 MPa değerindedir. Bu sebeple, maksimum

gerilimin oluştuğu bölgede plastik deformasyon ya da kısa vadede bir yorulma beklenmemektedir.



şekil 3.19. Test Düzeneği Deformasyon Analizi

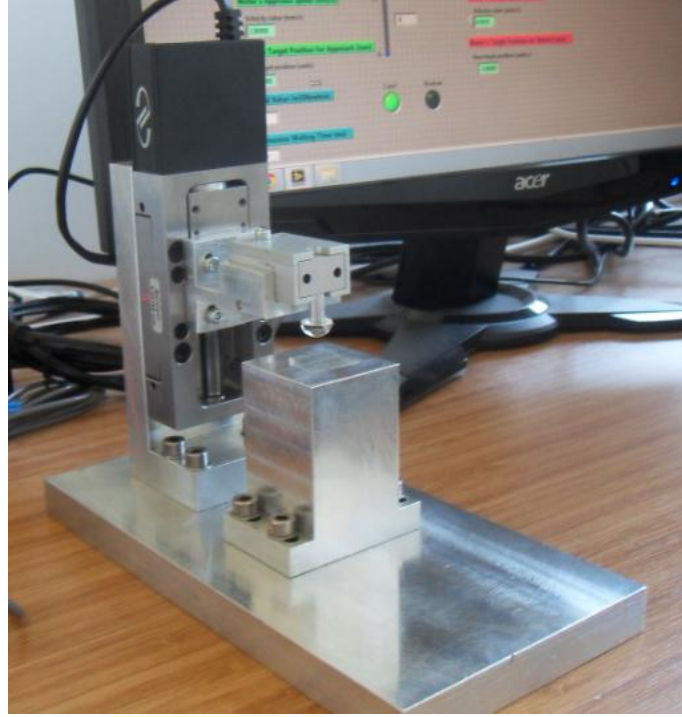
3.4.4 İmalat

şekil 3.16'daki gri renkli parçalar, test düzeneğinin mekanik olarak kurulumunun sağlanması için gereken talaşlı üretimle üretilen parçalardır. Bu testler sırasında kullanılacak olan motor 10 N'luk bir kapasiteye sahiptir, gerçekleştirilecek testler sırasında oluşan kuvvetler ise 5 N'a kadar ölçülebilecektir (yk hücresinin limiti), dolayısı ile motora bağlı hareket eden mekanik yapının 500 gram'dan daha hafif olma zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu yüzden birim ağrılıktaki mukavemeti yüksek olan, paslanmayan ve talaşlı imalatı kolay olan almiyumu tercih edilmiş ve parçalar üretilmiştir.

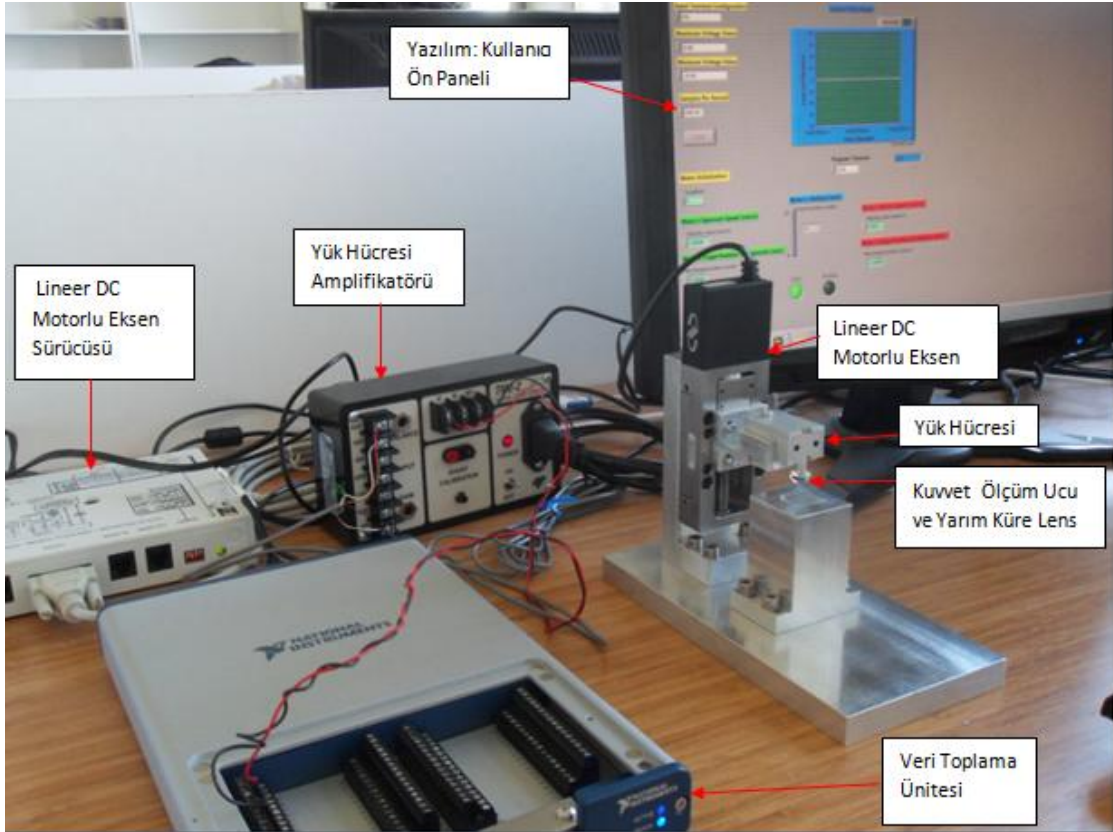
3.4.5 Test Düzeneğinin Kurulumu

CATIA V5R20 programı ile şekil 3.16'da gösterildiği gibi tasarlanan mekanik sistemin imalatı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu mekanik sistemin lineer ekseni ve yk hücresi şekil 3.20'de gösterildiği gibi montajı yapılmıştır. Bu test düzeneği daha sonra motor sürücüsü, yk hücresi amplifikatörü, veri toplama kartı,

bilgisayar ve yazılım ile birleştirilerek son haline Şekil 3.21'de gösterildiği gibi ulaştırılmıştır.



Şekil 3.20. Test Düzenekinin Mekanik Kurulumu



Şekil 3.21. Komple Test Düzenek ve Ekipmanları

3.4.6 Test Sonuçlarının Filtreleme ve Düzeltme Teknikleri

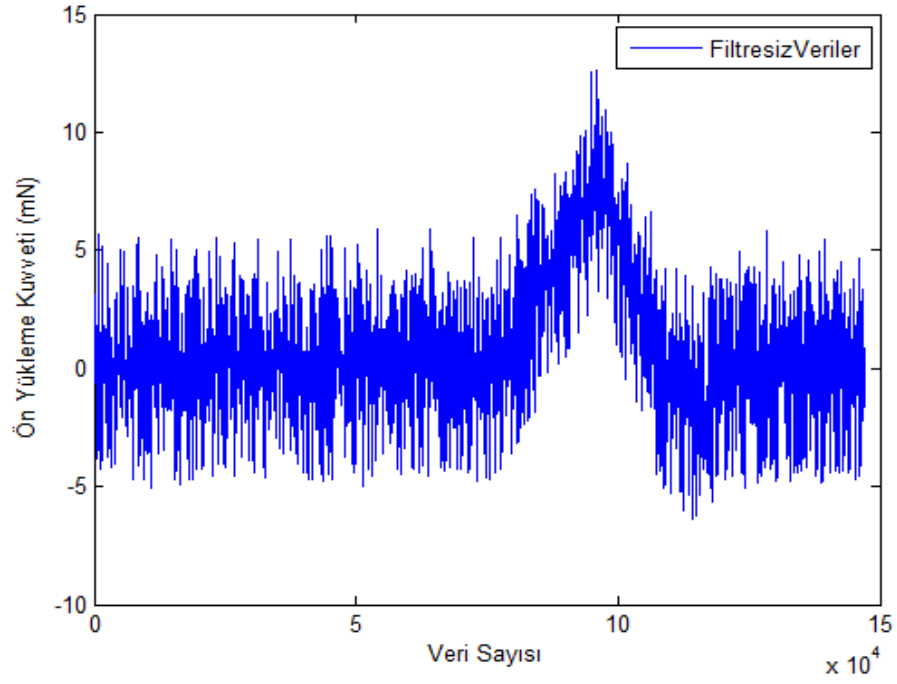
Test sırasında elde edilen tüm veriler Excel dosyasına kaydedilmektedir. Daha sonra yine Excel üzerinde bu veriler filtrelenmekte ve Matlab programı kullanılarak grafiksel olarak gösterilmektedir.

Yük hücrelerine hiçbir yük etmezken, test düzeneği çalıştırıldığında ± 5 mN 'luk bir sapma oluşmaktadır. Bu değer bazı testler için önem arz edecek kadar büyüktür ve filtrelenmek durumundadır. Bu gürültü (noise) incelendiğinde belirli bir ortalama değere sahip olduğu ve zamanla kayma (drift) yaşamadığı belirlenmiştir. Bu sebeple ortalama (mean) alma tekniği ile rahatlıkla giderilebileceğine karar verilmiştir. Yük hücresinden gelen veriler 1000 Hz ile toplanmakta ve testler genelde 60 saniyeden fazla sürmektedir. Bu ortalama tekniği ile sadece ortalama alınan sayı eksi 1 adet veri kaybı yaşanmaktadır (n-1), dolayısı ile yaklaşık 60.000 veri noktasından sadece 9 tanesi kaybolmaktadır. Bu teknik basit olmasından dolayı ve fark edilmeyen veri kaybına neden olmamasından dolayı tercih sebebi olmuştur. Bu teknik şu şekilde işlemektedir; test sonrasında Excel dosyası açılır 1. veriden 10. veriye kadar olan kuvvetlerin ortalaması alınıp, 1. veri olarak yazılır. Daha sonra 2. veriden 11. veriye kadar olan kuvvetlerin ortalaması alınıp, 2. veri olarak yazılır ve bu şekilde tüm veriler için bu yöntem tekrar edilir . Bu teknik Çizelge 3.13'de gösterilmiştir.

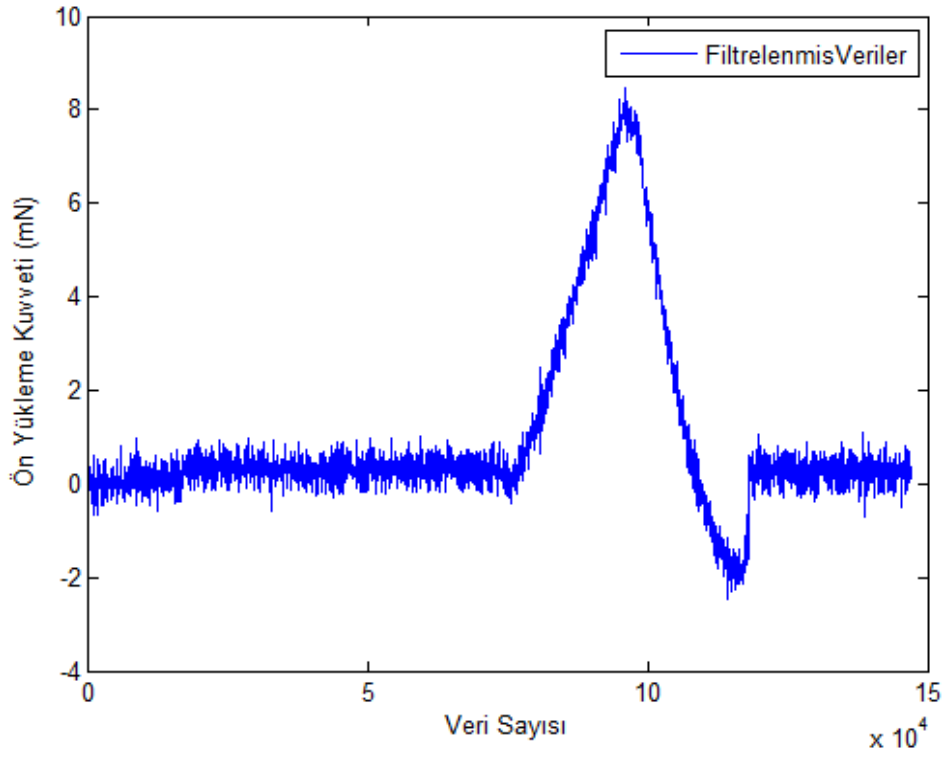
Veri Numarası	Filtrelenmiş Veriler
1	Ortalama(1:10)
2	Ortalama(2:11)
3	Ortalama(3:12)
4	Ortalama(4:13)
..	..
149999	Ortalama(149999:150009)
150000	Ortalama(150000:150010)
..	..

Çizelge 3.13. Verilerin Filtrelenme Açıklaması

Gerçekleştirilen bir test sonrasında ortaya çıkan sonuçlar filtrelenmemiş ve filtrelenmiş olarak aşağıda Şekil 3.22 ve 3.23'de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Filtrelenmemiş veriler



Şekil 3.23. Filtrelenen veriler

Testler gerçekleştirilirken karşılaşılan bir başka sorun ise verilerin her zaman 0 mN olarak başlamamasıdır (offset). Bu sorun amplifikatör üzerinde bulunan offset (dengeleme) ayarının yapılması ile çözülebilmektedir ancak bu ayar çok hassas değildir ve her testten önce bu ayarı yapmak zaman gerektirmektedir. Bu sorun şu şekilde çözülmüştür; testin ilk 4 saniyesinde henüz yük hücresi fiberlerle temas etmemektedir ve okunan değer 0 olması beklenmektedir. Dolayısıyla ilk 4 saniyede elde edilen veriler (ilk 4000 veri) toplanarak ortalaması alındığında bu değer bize offset değerini vermektedir. Elde edilen bu ortalama değer, daha sonra tüm kuvvet verilerinden çıkartılır. Böylece veriler için başlangıç noktası sıfırlanmış olur. Çizelge 3.14’de herhangi bir testten alınan verilere göre düzeltilme hesabının detaylı açıklaması gösterilmiştir.

Veri Numarası	Elde Edilen Ön Yükleme Değeri (mN)	İlk 4000 verinin ortalama değeri	Düzeltilmiş Değer = (Ön yükleme Değeri) - (Ortalama Değer)
1	-1,62	-1,60	-0,024
2	-1,61	-1,60	-0,009
3	-1,60	-1,60	0,000
..	..	-1,60	..
..	..	-1,60	..
4000	-1,58	-1,60	0,015
..	..	-1,60	..
170043	-1,44	-1,60	0,156

Çizelge 3.14. Düzeltilmiş Değerlerin Hesap Detayı

3.5 Üretilen Fiber Dizinlerinin Testleri ve Model Karşılaştırılması

3.5.1 Fiber Dizini ile Düz Elastomerlerin Adezyon Karşılaştırılması

Fiberli numunelerin, düz elastomerlere göre, pürüzlü yüzeylerde daha yüksek adezyon kuvveti verdiği, 2.4.7 numaralı bölümde bahsedilmişti. Üretilen fiberlerin testlerinden önce, bunun doğruluğunu bulup, fiberli numunelerin daha yüksek adezyon verdiği bu bölümde bulunmuştur. Test düzeneği ile fiberli ve düz yapıdaki elastomerlerin adezyon testleri yapılarak birbirlerine karşı adezyon üstünlükleri belirlenmiştir. Bu karşılaştırma testleri için kullanılan fiber numunelerinin özellikleri Çizelge 3.15’de verilmiştir;

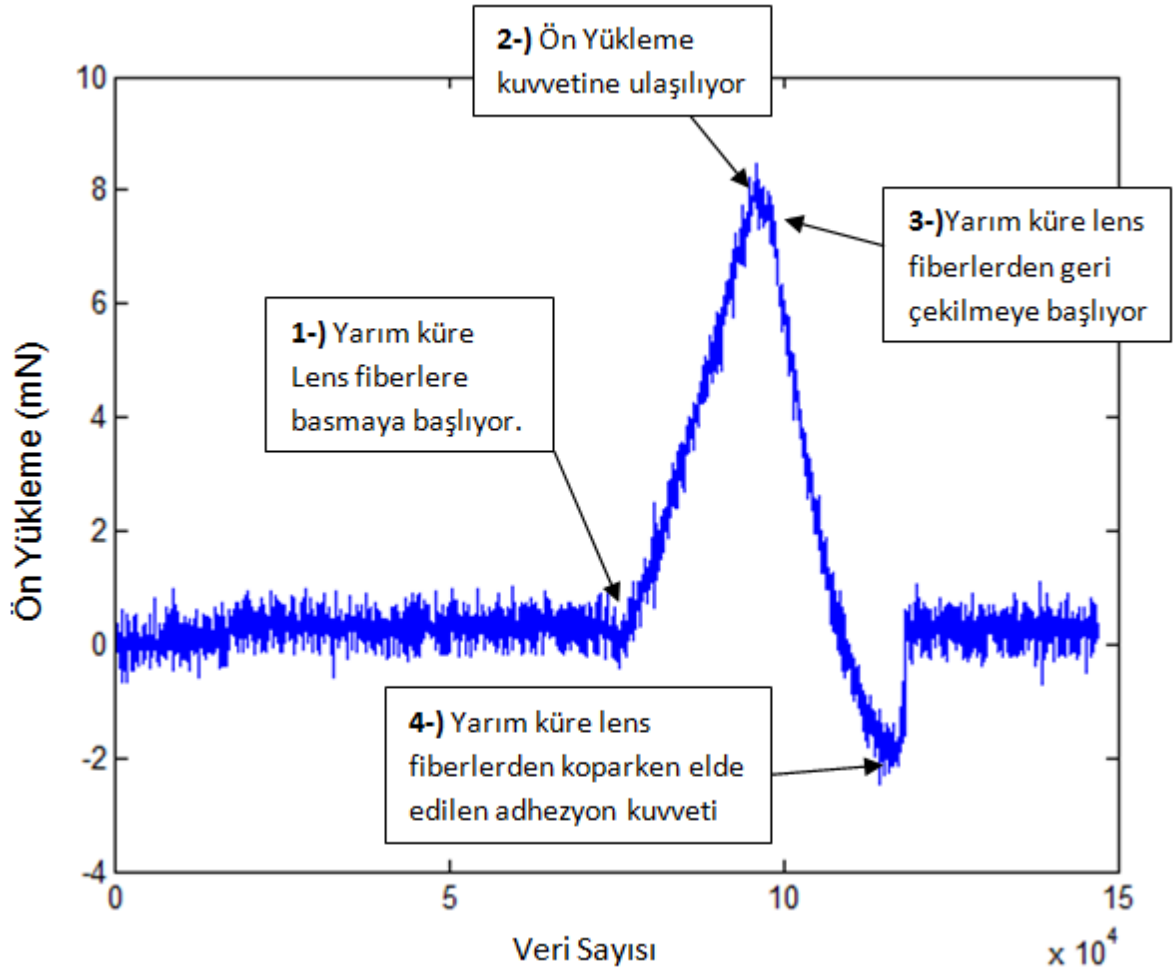
Fiber Çapı (2a)	20 µm
Fiberler Arası Uzaklık (d)	16 µm
Fiberlerin Uzunluğu (h)	15 µm

Çizelge 3.15. Fiberli ve Düz Elastomerli numunelerin adezyon karşılaştırması için kullanılan fiber dizini özellikleri

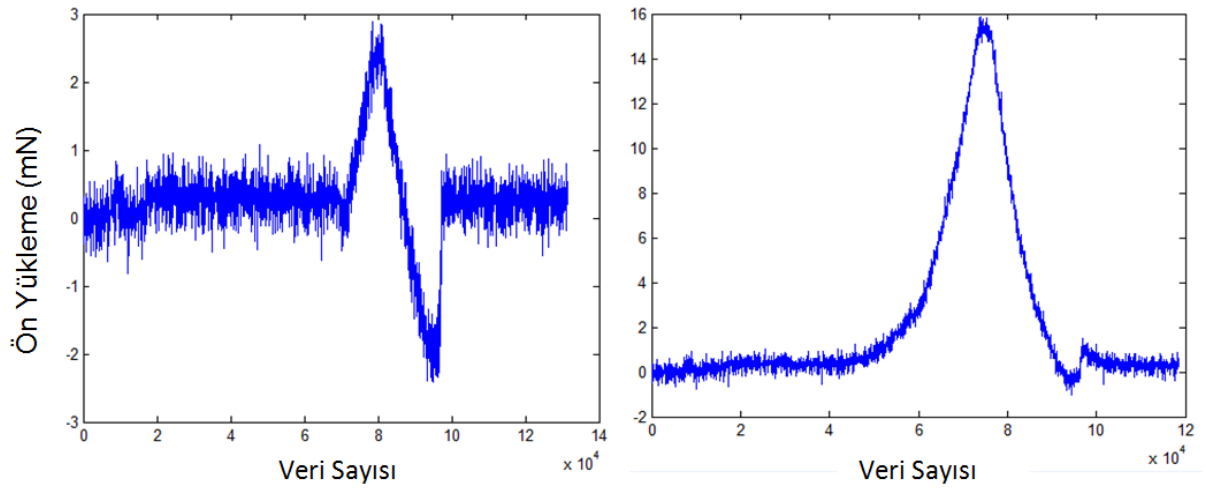
Fiberlerin vizkoelastik etkilerini minimize etmek için; fiberlere basma ve çekme hızları 1 µm/s olarak seçilmiştir [29][67][15]. Fakat test süresini kısaltmak için, fiberlere en yüksek hızla (2.5 mm/s) yaklaşım, daha sonra 1 µm/s hızla fiberlere basma gerçekleştirilmektedir.

Testlerde karşılaştırma yapmak amacı ile, ilk olarak hem fiberli numunelerin hem de düz (fibersiz) numunelerin testleri yapılmıştır. Fiberli yapılara uygulanan ön yükleme kuvvetleri sırası ile 2.8 mN, 4 mN, 8mN ve 13 mN'dur. Düz numuneler için uygulanan ön yükleme kuvvetleri ise; sırası ile 2.8, 7, 10.5 ve 15 mN'dur. Bu testler koşullar aynı tutularak gerçekleştirilmiştir (numuneye yaklaşma ve uzaklaşma hızları). Bu testler sonucunda amaç; kuvvetlerin doyuma ulaştığı noktayı bulmak ve fiberli ve düz elastomerlerin adezyonlarını karşılaştırmaktır. Bu testler boyunca bekleme zamanı 1 saniye olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.24'de gösterilen grafikte testteki aşamalar gösterilmektedir. Bu aşamalar sırası ile şu şekilde gerçekleşmektedir:

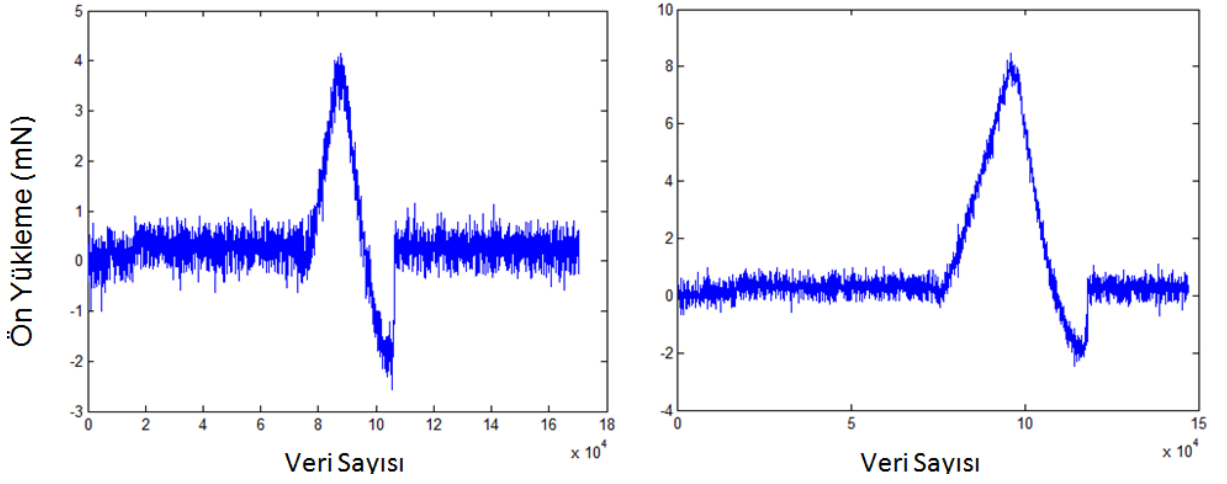
1. Yarım küre lens fiberlere bastırmaya başlıyor.
2. İstenilen ön yükleme kuvvetine ulaşıyor.
3. Yarım küre lens fiberlerden geri çekilmeye başlıyor.
4. Yarım küre lens fiberlerden koparken adezyon kuvveti elde edilebiliyor.



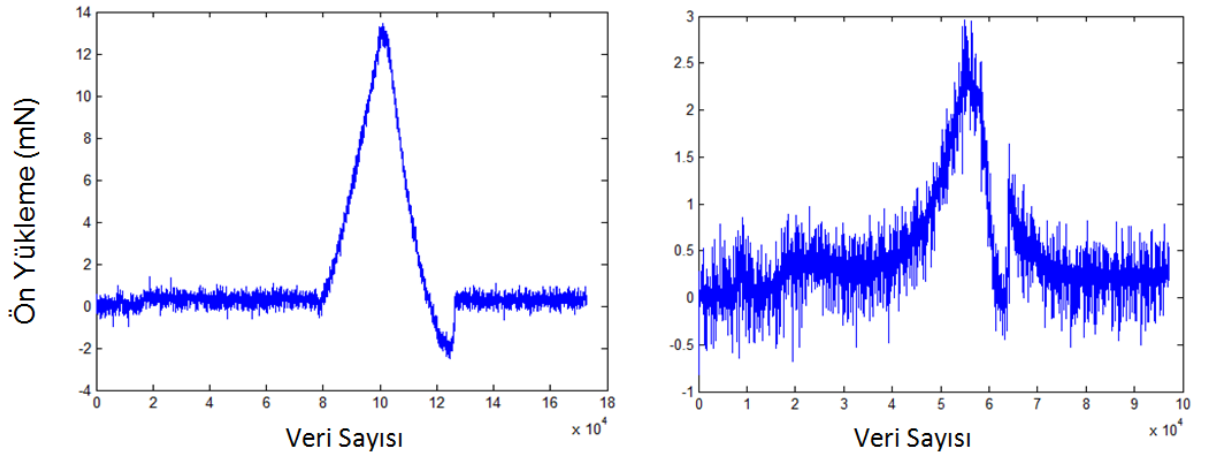
Şekil 3.24. Test aşamalarının açıklamalı gösterimi



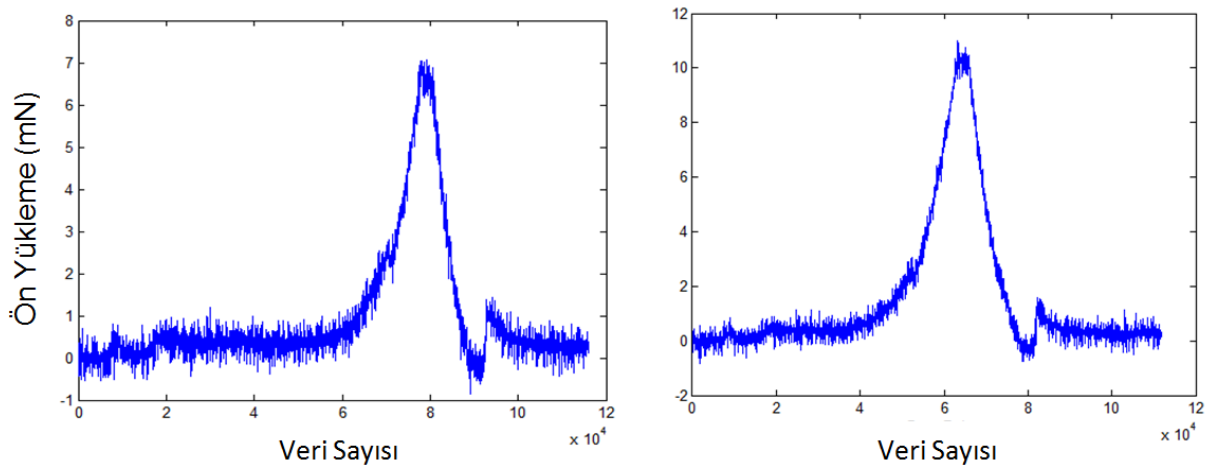
Şekil 3.25. Fiberli PDMS için 2.8mN (solda)ve Düz PDMS için 16 mN'luk (sağda) Önyükleme Grafiği



Şekil 3.26. Fiberli PDMS için 4 mN (solda) ve 8 mN (sağda) Önyükleme Grafiği



Şekil 3.27. Fiberli PDMS için 13 mN Önyükleme Grafiği (solda) ve Düz PDMS için 2.8 mN Önyükleme Grafiği (sağda)



Şekil 3.28. Düz PDMS için 7 mN (solda) ve 10.5 mN (sağda) Önyükleme Grafiği

Fiberli numune için yapılan test sonuçları değerlendirildiğinde; Şekil 3.25'de soldaki grafikte fiber dizinine 2.8 mN ön yükleme kuvvetine karşılık, elde edilen adezyon kuvveti 2 mN civarındadır. Şekil 3.26'da gösterilen test sonuçlarından soldaki grafikte, fiberli PDMS malzemesine 4 mN ön yükleme kuvveti uygulanmış ve buna karşılık adezyon kuvveti 2 mN civarında olmuştur. Şekil 3.26'da sağdaki grafikte ise fiber dizinine 8 mN önyükleme kuvveti uygulanmıştır, adezyon kuvveti ise yine 2 mN olarak ölçülmüştür. Son olarak; Şekil 3.27'deki soldaki grafikten görüleceği gibi; fiber dizinine 13 mN ön yükleme kuvveti uygulanmış ve adezyon kuvveti (maksimum çekme kuvveti) değişmeyerek 2 mN olmuştur. Sonuç olarak Çizelge 3.15'de belirtilen özelliklerde fiber dizini kullanımında, maksimum elde edilecek adezyon kuvveti 2 mN olarak bulunmuştur. Sonuçta; Fiberli numune için yapılan testlerde; artan ön yükleme kuvvetine karşılık, adezyon kuvveti değişmeyerek 2 mN civarında olmuştur.

Düz (fibersiz) PDMS numunesi için yapılan test sonuçları değerlendirildiğinde ise; Şekil 3.27'de sağdaki grafiğe göre düz numuneye 3 mN ön yükleme uygulanmıştır. Buna karşılık 0.5 mN adezyon kuvveti elde edilmiştir. Şekil 3.28'de soldaki grafikte ise düz numuneye 7 mN ön yükleme kuvveti uygulanmıştır ve çekme kuvveti (adezyon kuvveti) 1 mN civarında olmuştur. Şekil 3.28'de sağdaki grafik incelendiğinde, düz numuneye 10.5 mN ön yükleme kuvveti ile bastırılmış ve 1 mN civarında adezyon kuvveti elde edilmiştir. Son olarak Şekil 3.25'de sağdaki grafikten görüleceği gibi düz numuneye bastırma kuvveti 16 mN'dur ve elde edilen adezyon kuvveti ise yine 1 mN civarında olmuştur. Bu testlere göre, düz numuneye uygulanan farklı ön yükleme değerlerinde elde edilen maksimum adezyon 1 mN civarındadır.

Sonuç olarak; cam yarı kürenin modellediği pürüzlü yüzeylerde fiberli numunelerden elde edilen adezyon kuvveti, fibersiz numunelerden elde edilen adezyon kuvvetinin yaklaşık 2 katı olarak ortaya çıkmıştır.

3.6 Fiberli Numunelerin Testleri

Bu bölümde Çizelge 3.16'da gösterilen fiber dizini numunelerinin testleri gerçekleştirilmiştir. Bu numuneler; farklı fiber çaplarına, farklı fiberler arası uzaklığa ve farklı boy/en oranlarına sahiptir. Bu numunelerin testleri yapılarak, teorik

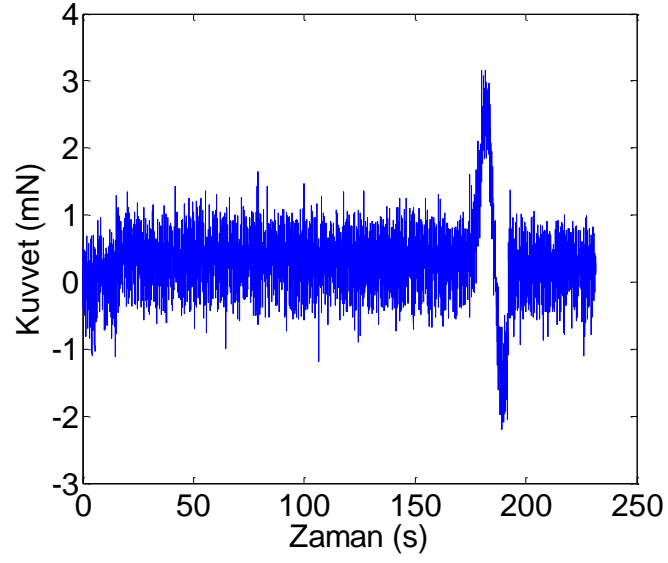
modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu testler fiberlerin burkulma limitleri de göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

Numune	Çap "2a"	Fiberler Arası Uzaklık "d"	Fiber Yoğunluğu "C _f "	Boy/En Oranı "λ"
No	(μm)	(μm)		
1	5	5	0.23	2
2	5	8	0.13	2
3	5	12	0.08	2
4	10	25	0.07	1
5	20	16	0.27	0.5

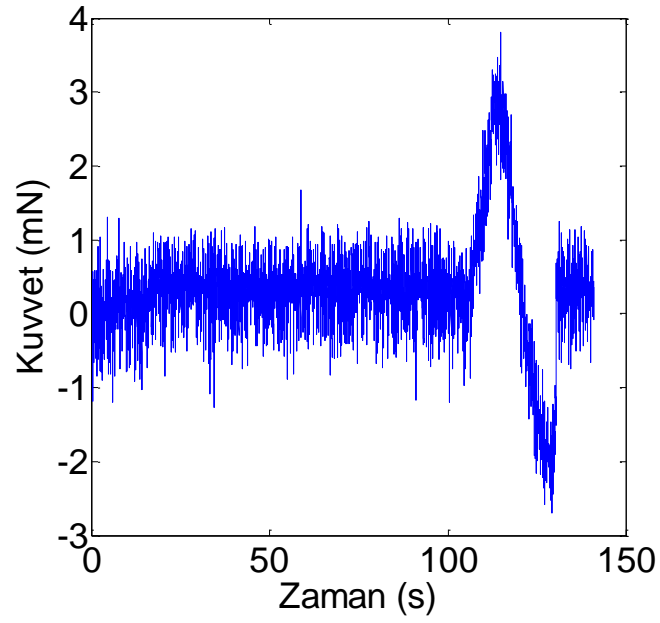
Çizelge 3.16 Üretilen fiberlerin karakteristikleri

Çizelge 3.16'da gösterilen, 1,2,3,4 ve 5 numaralı fiber dizini numunelerinin, test sonuç grafikleri, sırası ile Şekil 3.29, 3.30, 3.31, 3.32 ve 3.33'de gösterildiği gibidir. Çizelge 3.17'de ise testler sırasında fiber dizini numunelerine uygulanan kuvvetlerin, 2.5.3 numaralı bölümde de değinilen fiber burkulma limitlerini geçmedikleri gösterilmiştir.

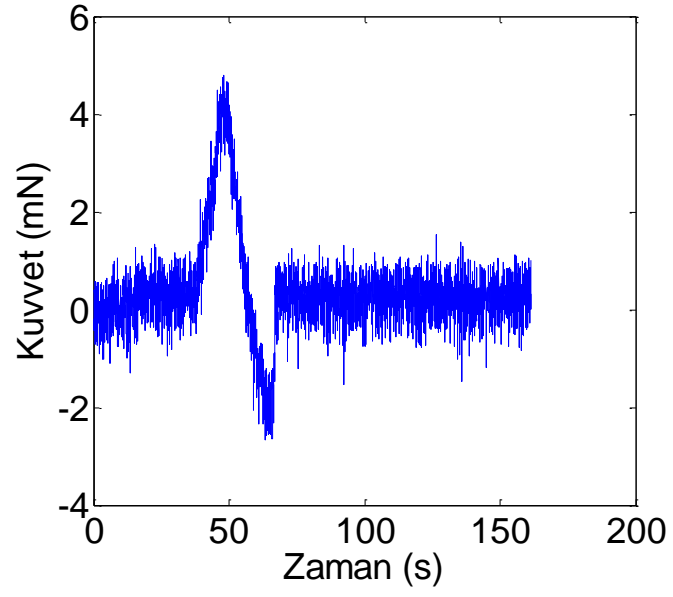
Üretilen numunelere uygulanan ön yükleme kuvvetlerine bağlı olarak, yarım küre lensin fiberler basma derinliği ve fiberlerden elde edilen adezyon kuvvetleri Çizelge 3.18'de gösterilmiştir. Fakat bu noktada fiber dizinlerinden elde edilen adezyon kuvvetlerine bakıp, buna göre bir adezyon sıralaması oluşturmak doğru değildir. Çünkü yarım küre lensin, fiber dizinleri üzerinde oluşturduğu temas alanı bütün numunelerde farklılık göstermektedir. Bu sebeple elde edilen bu adezyon kuvvetlerini, yarım küre lensin fiberler üzerinde oluşturduğu temas alanına bölüp, fiber numunelerinden elde edilecek adezyon basınçları ile karşılaştırma yapılmalıdır. Bu karşılaştırma bir sonraki bölümde gerçekleştirilmiştir.



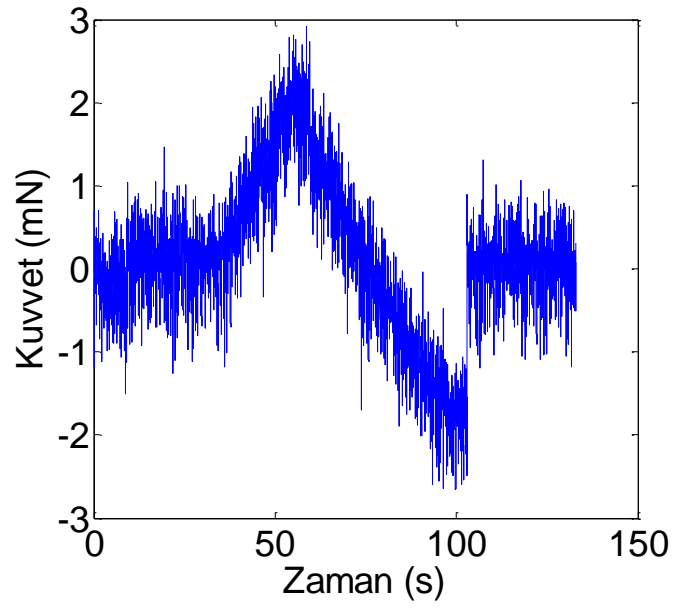
Şekil 3.29. "1" numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği



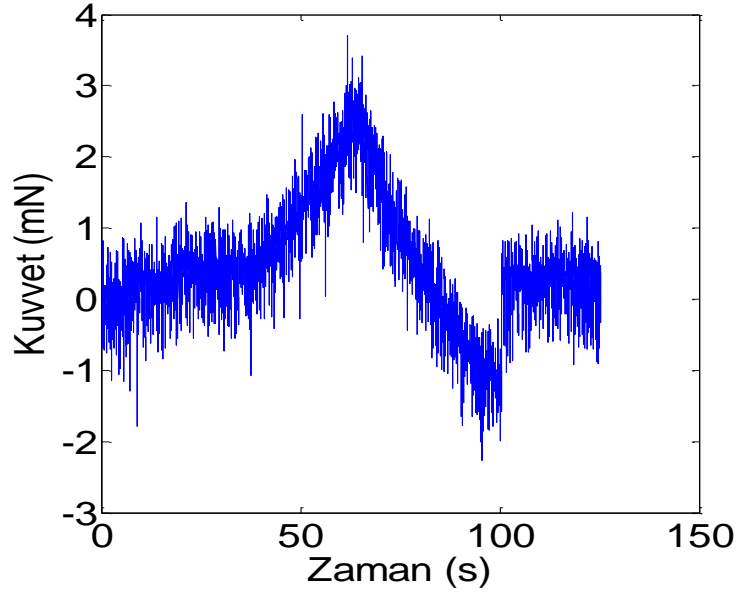
Şekil 3.30. "2" Numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği



Şekil 3.31. “3” numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği



Şekil 3.32 “4” numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği



Şekil 3.33. “5” numaralı fiber dizini numunesinin test sonuç grafiği

Fiber Dizini Numune No	Ön Yükleme Kuvveti (mN)	Fiber Sayısı	Fiber Burkulma Limit Kuvveti (mN)
1	3,16	2175,00	14,50
2	3,81	1501,00	10,00
3	4,80	1254,00	8,40
4	2,91	325,00	34,70
5	3,70	753,00	1285,00

Çizelge 3.17. Fiber dizinlerine etki eden ön yükleme kuvvetlerinin, fiber burkulma kuvvetleri ile karşılaştırılması.

Fiber Dizini Numune No	Ön Yükleme Kuvveti (mN)	Adezyon Kuvveti (mN)	Yarım Küre Lens Basma Derinliği “ δ ” (μm)
1	3,16	2.3	6
2	3,81	2.6	7
3	4,80	2.85	10
4	2,91	2.8	11
5	3,70	2.5	27

Çizelge 3.18. Fiber Dizinlerine uygulanan ön yükleme miktarına göre elde edilen adezyon kuvvetleri ve yarım küre lensin fiberlere basma derinliği.

3.6.1 Model ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması:

Bu bölümde; test edilen fiber dizinlerinin adezyon basınçlarının bulunması ve bu değerlerin önceki bölümlerde hesaplanan teorik basınç değerleri ile karşılaştırılması konuları incelenmiştir.

Test sırasında kullanılan 5 mm yarıçapa sahip cam yarım küre, fiberlere Şekil 3.34'deki gibi temas etmektedir. Yarım küre lens, fiberler üzerine basmaya başladığında, Şekil 3.36'daki gibi D yarıçapına sahip dairesel bir temas alanı oluşturur. Bu temas alanını ve temas alanındaki fiber sayısının bulunabilmesi için D yarıçapını bulmamız gerekmektedir.

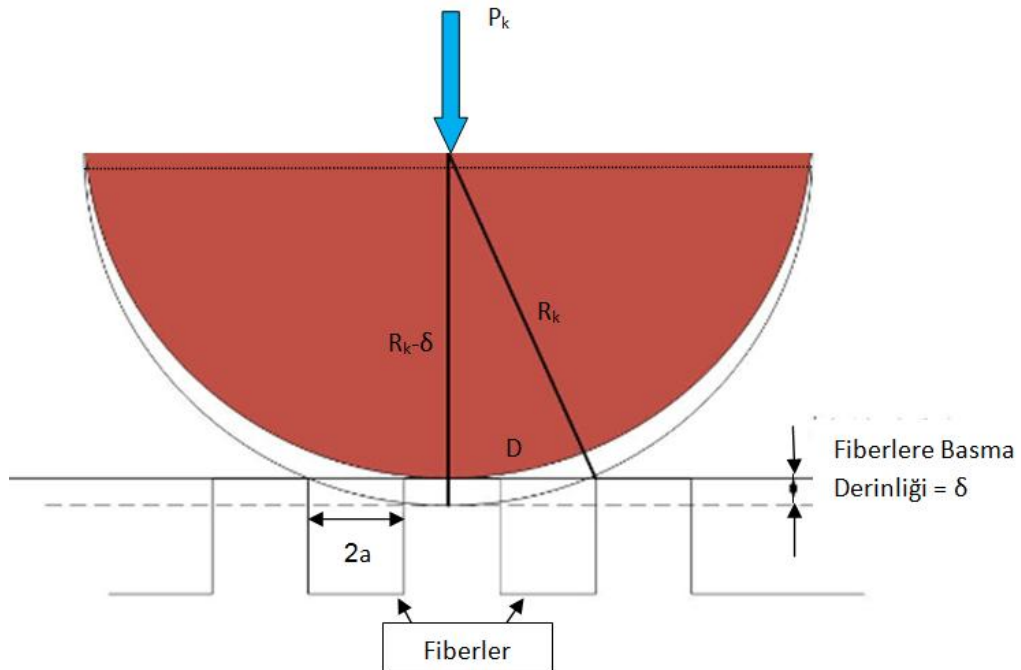
Yarım küre lens'in fiberlere bastırarak, önyüklemenin olduğu pozisyonundan, yarım küre lensin fiberlere ilk temas ettiği pozisyon çıkarıldığında, Şekil 3.34'de gösterilen δ değerini elde edilir. Bu bilgi lineer motorun hareketinden okunabilir. Buna göre; δ değeri Çizelge 3.18'de de belirtildiği gibi; 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı fiber dizini testlerinde sırası ile 6, 7, 10, 11 ve 27 μm olarak ölçülmüştür. Fiber dizinlerinin temas alanının yarıçapı olan "D" değerini bulmak için, Şekil 3.34'de gösterilen ve Eş.3.1'de belirtilen Pisagor bağıntısı kullanılabilir;

$$D^2 = R_k^2 - (R_k - \delta)^2 \quad (3.1)$$

δ = Fiberlere Basma Derinliği

D = Yarım küre lensin fiberlere bastırıldığında oluşan dairesel kontak alanının yarıçapı

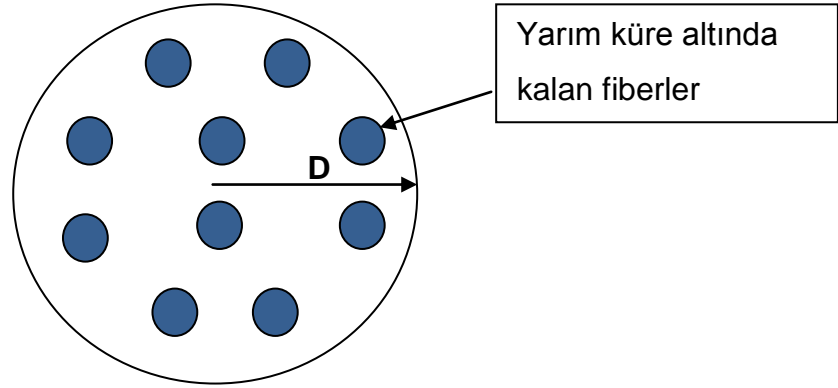
R_k = Yarım Küre Lensin Yarı Çapı



Şekil 3.34. Yarım Küre Lensin Fiberlere Basma Şeması

Yarıçapı “D” olan bir dairenin alanı, Eş.3.2’deki gibi, “A_n” yarım küre lensin oluşturduğu temas alanını verir. Elde edilen adezyon kuvvetlerinin, her bir fiber dizini için bulunan “A_n” değerine bölünmesi ile, fiber dizinlerinden elde edilen adezyon basınçları bulunur.

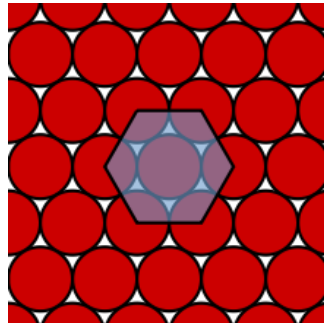
$$A_n = \pi * D^2 \quad (3.2)$$



Şekil 3.35. Yarım Küre Lensin Fiberlere Bastırıldığında Oluşan Temas Alanı (Alt Görünüş)

Yarıçapı D olan dairenin içerisinde kaç adet fiberin bulunduğu ise fiber yerleşim şekline bağlıdır. Bölüm 2.3.3’de açıklandığı üzere; birim alandaki maksimum fiber yerleşimi (efektif alan) Şekil 3.36’da verildiği gibi altıgen şeklindeki fiber yerleşimidir. Buna göre; önceden, Bölüm 2.4, Eş.2.21’de de belirtildiği gibi fiberlerin yerleştiği altıgenin alanı aşağıdaki gibi olmaktadır. (a: Fiber yarıçapı, d: Fiberler arası boşluk)

$$A_t = \frac{3\sqrt{3}*(2a+d)^2}{2} \quad (m^2)$$



Şekil 3.36. Altıgen Şeklindeki Fiber Yerleşimi Gösterimi

Şekil 3.36’de gösterildiği gibi, bir altıgenin içerisinde üç adet fiber bulunmaktadır, buradan D yarıçapına sahip dairenin alanından küresel cam yüzeyin temas ettiği fiber sayısı “N_d”, [3] nolu denklem kullanılarak bulunabilir.

$$N_d = (\pi * D^2) / (3 * A_t) \quad (3.3)$$

Dairesel uçlu fiberlerin, Eş.2.8’de belirtilen adezyon basıncı “σ_c”, Bölüm 2.4, Eş.2.22’de belirtilen fiber yoğunluğu “c_f” ile çarpılarak, fiber dizilerinin teorik adezyon basınçları bulunabilir. Düzeltilmiş teorik adezyon modelinde ise, bulunan adezyon basıncı, Bölüm 2.4’de yapılan optimizasyon modelinde, fiber basıncının boy/en oranının 0.3 kuvveti “λ^{0.3}” ile artarak modellenmişti. Buna göre fiber dizileri için düzeltilmiş teorik model (fiber dizi ortalama adezyon basıncı) “σ_T” Eş.2.23’de belirtilmişti;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{6Kw_f}{\pi a}} \quad (\text{Pa}), \quad \frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1-v_f^2}{E_f} \right) \quad (1/\text{Pa})$$

$$C_f = \frac{3 * \pi * a^2}{(3\sqrt{3} * (2a+d)^2)}$$

$$\sigma_T = \sigma_c * C_f * \lambda^{0.3} \quad (\text{Pa})$$

	Çap “2a”	Fiberler Arası Uzaklık “d”	Fiber Yoğun- luğu “C _f ”	Boy/En Oranı “λ”	Efektif Doku- nan Fiber Sayısı “N _d ”	Teorik Adezyo n “σ _c * C _f ”	Düzeltilmiş Teorik Adezyon Modeli “σ _T ”	Test Son- uç
No	(µm)	(µm)			Adet	(kPa)	(kPa)	(kPa)
1	5	5	0.23	2	2175	57.1	70.3	12.2
2	5	8	0.13	2	1501	33.8	41.6	11.8
3	5	12	0.08	2	1254	19.8	24.3	9.1
4	10	25	0.07	1	325	13.2	13.2	8.1
5	20	16	0.27	0.5	753	35.3	28.6	3.0

Çizelge 3.19 Model ve Test Adezyon değerlerinin karşılaştırılması

Üretilen fiber dizilerinin test sonuçları ve teorik model sonuçları Çizelge 3.19’da görüldüğü gibidir. Buna göre en yüksek adezyon basıncı, test sonucu 12.2 kPa değeri ile 1 numaralı fiber dizini numunesinden elde edilmiştir. Üretilen fiber dizilerinden 1,2 ve 3 numaralı numuneler aynı çap (5µm) ve boy/en (2) oranlarına

sahiptirler. Bu numunelerdeki fiberler arası boşluk ise sırası ile 5, 8 ve 12 μm 'dir. Buna göre, 1, 2 ve 3 numaralı fiber numunelerinden elde edilen test adezyon basınçları ise sırası ile 12.2, 11.8 ve 9.1 kPa'dır. Bu sonuçlara göre fiberler arası boşluk arttıkça elde edilen adezyon basınçlarının da azaldığı söylenebilir. Bu durum fiberler arası boşluk arttıkça, birim alana düşen fiber sayısının da azaldığından kaynaklanmaktadır. Üretilen numunelerden 4 ve 5 numaralı numunelerin ise çapları sırası ile 10 ve 20 μm 'dir. Bu numunelerin boy/en oranları ise sırası ile 1 ve 0.5'dir. 4 ve 5 numaralı numunelerden sırası ile 8.1 ve 3 kPa adezyon basıncı elde edilmiştir. Çizelge 3.19 incelendiğinde, numuneler çap büyüklüklerine göre sıralandığında $5 > 4 > 3 = 2 = 1$ dizilimini gösterir. Fakat buradaki çap dizilimine bakıp, adezyon basınçlarında da sadece fiber çapının neden olduğunu söylemek yanlış olur. Çünkü bu numunelerin boy/en oranları da farklıdır. Adezyon basınçlarındaki artışın boy/en oranından mı yoksa fiber çaplarının farkından mı olduğunu söylenemese de; en yüksek adezyon basıncının elde edildiği numunenin; 4 ve 5 numaralı numunelere göre daha küçük çaplı ($a=5\mu\text{m}$), en/boy oranları daha yüksek ($\lambda=2$) ve fiberler arası boşluk daha küçük ($d=5\mu\text{m}$) olduğu söylenebilir.

Test sonuçlarının, Teorik Adezyon'dan ve Düzeltilmiş Teorik Adezyon'dan 5-6 kat daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun en büyük nedenlerinden biri, destek katman kalınlığının adezyona etkisidir. Bölüm 2.4.5'te belirtildiği gibi, S.Kim ve M.Sitti'nin yaptığı çalışmada; destek katmanı kalınlığı arttıkça adezyon kuvvetinin 9 kata kadar azaldığı tespit edilmiştir, bu çalışmadaki destek katmanı kalınlıkları 160 μm – 1120 μm arasında olacak şekilde üretilmiştir [38]. Elde edilen en düşük adezyon kuvveti ise 1120 μm destek katmanı kalınlığına sahip fiber dizininden olmuştur. Elde edilen en yüksek adezyon kuvveti ise 160 μm destek katmanı kalınlığına sahip fiber dizininden olmuştur. Fakat çok ince destek katman kalınlığına (150-160 μm) sahip fiber dizinlerini kalıptan çıkarmak oldukça zordur. Bu sebeple, fiber dizinlerinin yırtılmaya uğramaması için 1mm civarında kalınlığa sahip olacak şekilde üretimini gerçekleştirdik. Fakat bu durum da, fiberlerden elde edilen adezyon basıncını düşürmektedir. Çizelge 3.19'da belirtilen teorik sonuçlara ulaşmak oldukça güçtür. Çevre şartları ve üretim tekniklerinden dolayı da kusursuz bir fiber üretimi ve kusursuz adezyon basınç testlerinin yapılması oldukça zordur. 2.4.8 numaralı bölümde yapılan literatür çalışmalarına göre, farklı şekillerdeki

fiberlerin adezyon basınçlarının gösterildiği Şekil 2.27 ve Şekil 2.28'de; üretilen düz uçlu silindirik fiber dizinlerinin, 2-30 µm arasında çapa sahip olanların adezyon basınçlarının 13-4 kPa arasında olduğu, 3-40 µm arasında üretilenlerinin ise 15-5 kPa arasında adezyon basıncı elde edildiği bilinmektedir. Bu araştırmalardaki adezyon basınçları da Çizelge 3.19'daki test sonuçları ile tutarlılık göstermektedir.

3.7 PDMS Malzemelerinin Elastisite Modül ve Yay Sabiti Değerlerinin Belirlenmesi

PDMS malzemesinin elastisite modülü değeri fiberlerin teorik adezyon kuvvetini doğrudan etkilemektedir (Bkz. Eş.2.2 ve Eş.2.3). Teorik ve test karşılaştırmalarının doğru bir şekilde yapılması için PDMS malzemesinin de elastisite modülünün belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple aynı malzemelerden üretilen numuneler, deformasyon testlerine tabi tutularak, Eş.3.4 ve Eş.3.5'deki eşitliklerde olduğu gibi Hooke kanunundan yararlanarak, süngerin ve PDMS malzemesinin yay sabiti ve elastisite modülü değerleri bulunmuştur.

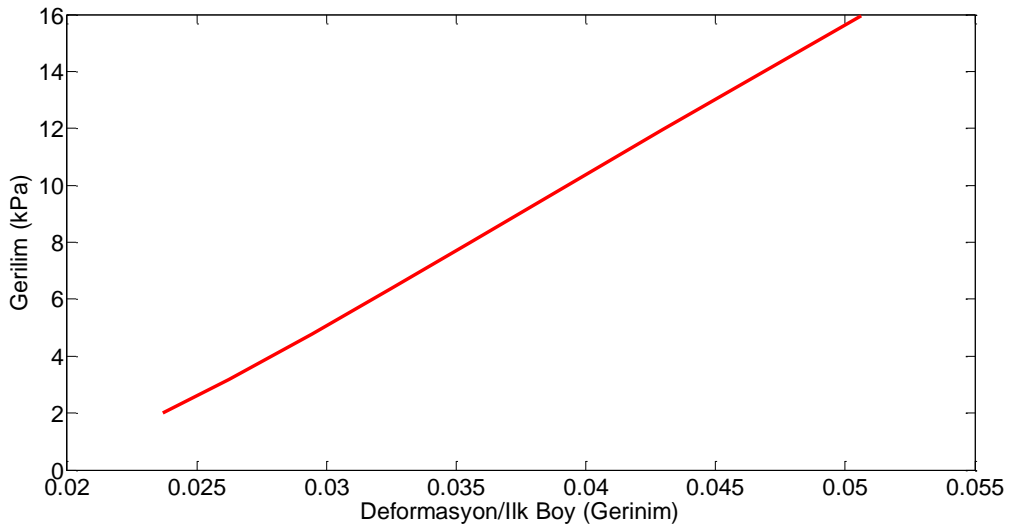
Belirli en, boy ve yüksekliğe sahip olan PDMS numunesine (Bkz. Çizelge 3.20), Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde kurulan test düzeneği ile, farklı kuvvetler uygulanarak, malzemenin deformasyon miktarları belirlenmiştir. PDMS malzemesine uygulanan ön yükleme değerlerine bağlı olarak, malzemenin uğradığı deformasyonlar (ΔL_p), lineer motor pozisyonundan okunmuştur. Böylece Eş.3.4'de bilinmeyen ΔL_p değeri bulunarak, malzemelerin Elastisite modülü (E_p) bulunmuştur. Eş.3.5'dan ise, artık Elastisite modülü (E_p) bilinen malzemelerin yay sabitleri bulunabilir.

$$E_p = (F_p/A_p)/(\Delta L_p/L_p) \quad (3.4)$$

$$k_p = \frac{E_p * A_p}{L_p} \quad (3.5)$$

Fiberlerin adezyon kuvvet hesabında kullanılan, PDMS malzemesinin elastisite modülünün (E_f) belirlenmesi için, üretilen numunenin özellikleri Çizelge 3.20'deki gibidir. Bu numuneye de farklı kuvvetler uygulayarak deformasyonu ölçülmüş ve Çizelge 3.21'deki gibi, numune üzerine uygulanan kuvvetlere göre elastisite modül ve yay sabiti değerleri belirlenmiştir. Bu numunenin, çizdirilen elastisite modül

grafiği, yani “ $(F_f/A_f)/(\Delta L_f/L_f)$ ” değerleri ise Şekil 3.37’de gösterildiği gibidir. Fakat PDMS malzemesinin bilinen özelliklerine göre oda sıcaklığında bekletildiğinde, belli bir süre sonra daha sertleşmesidir. Bu sebeple üretimden iki gün sonra yapılan bu testler, 5 gün sonra tekrarlanmıştır. Buna göre tekrarlanan testler sonucunda, uygulanan kuvvetlere göre belirlenen elastisite modül ve yay sabiti değerleri Çizelge 3.22’deki gibidir. Tekrarlanan testlerdeki uygulanan kuvvetlere göre, malzemede oluşan deformasyon grafiği Şekil 3.38’deki gibidir, kuvvete göre “ $(F_f/A_f)/(\Delta L_f/L_f)$ ” (E_f) değerleri ise Şekil 3.45’de gösterildiği gibidir. Sonuç olarak, PDMS numunesinin, hesaplanan tüm elastisite modül ve yay sabiti değerlerinin ortalama değerleri Çizelge 3.23’deki gibidir. Bu çizelgeye göre teorik hesaplamalarda kullanılan PDMS numunesinin elastisite modülü 550 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.37. PDMS numunesi için $(F_f/A_f)/(\Delta L_f/L_f)$ " E_f " grafiği

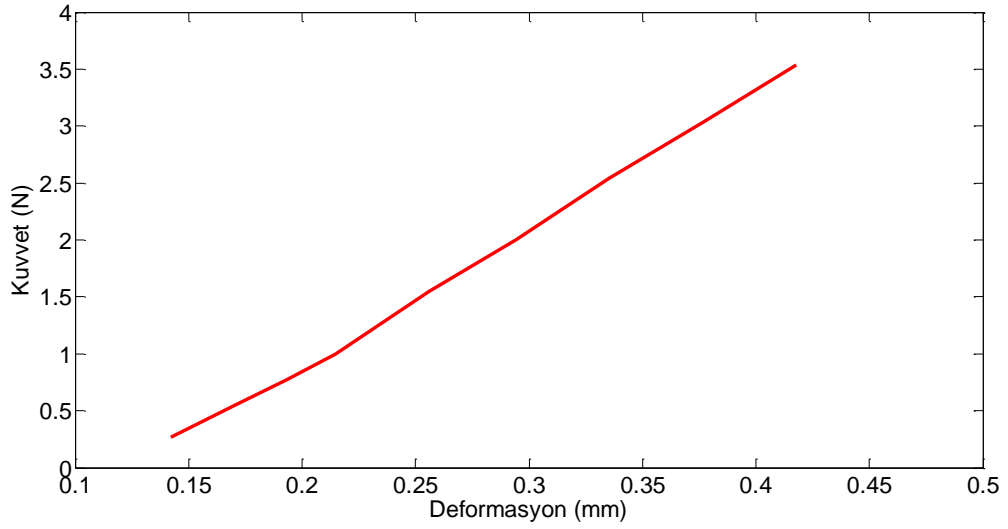
PDMS Numunesi Özellikleri	
En	11.2 mm
Boy	11.2 mm
Yükseklik (L_p)	6 mm

Çizelge 3.20 PDMS numunesinin boyut ölçü özellikleri

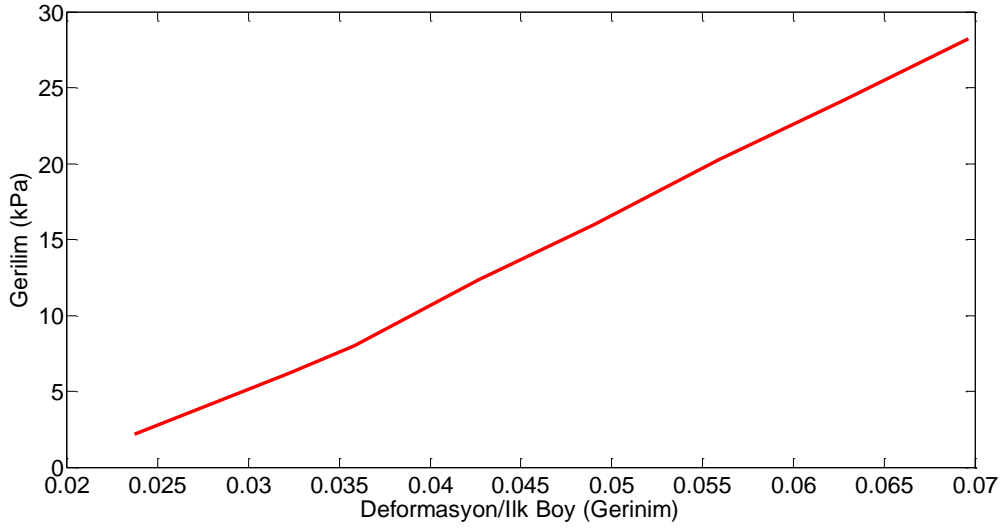
Numune PDMS Durum	Lineer Eksen Pozisyonu	Hesaplanan Elastisite Modülü	Hesaplanan Yay Sabiti

	(mm)	(kPa)	(N/m)
0.25 N Ön Yüklemede	18.71011	469	9797
0.4 N Ön Yüklemede	18.72542	495	10341
0.6 N Ön Yüklemede	18.74476	528	11025
0.8 N Ön Yüklemede	18.76290	527	11013
1 N Ön Yüklemede	18.78106	537	11231
1.5 N Ön Yüklemede	18.82558	518	10820
2 N Ön Yüklemede	18.87179	517	10824
Lineer Eksenin PDMSe Dokunmaya Başladığı Pozisyon	18.568		

Çizelge 3.21 PDMS numunesinin kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri



Şekil 3.38. PDMS numunesi üzerinde 5 gün sonra gerçekleştirilen testlerin, kuvvete bağlı olarak deformasyon grafiği



Şekil 3.39. PDMS numunesi üzerinde 5 gün sonra gerçekleştirilen $\frac{F/A}{\Delta L/L}$ (E_f) grafiği

5 Gun sonra Numune PDMS Durum	Lineer Eksen Pozisyonu (mm)	Hesaplanan Elastisite Modülü (kPa)	Hesaplanan Yay Sabiti (N/m)
0.546 N Ön Yüklemede	18.73825	469,00	9807,00
0.775 N Ön Yüklemede	18.76133	474,00	9922,00
1 N Ön Yüklemede	18.78282	500,00	10470,00
1.55 N Ön Yüklemede	18.82406	638,00	13337,00
2 N Ön Yüklemede	18.86198	567,00	11867,00
2.54 N Ön Yüklemede	18.90324	626,00	13088,00
3.03 N Ön Yüklemede	18.94448	534,00	11154,00
3.54 N Ön Yüklemede	18.98579	590,00	12346,00
Lineer Eksenin PDMS Numunesine Dokunmaya Başladığı An	18.568		

Çizelge 3.22. 5 gün sonra PDMS numunesinin kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri

Numune	Ortalama Elastisite modül(kPa)	Elastisite modülStandart Sapma (kPa)	Ortalama Yay Sabiti (N/m)	Yay Sabiti Standart Sapma (N/m)

PDMS Numune	511,50	43,50	9081,50	2149,50
PDMS Numune (5 Gün Sonra)	549,75	88,25	11498,88	1838,13

Çizelge 3.23. PDMS numunesinin ortalama elastisite modülü ve yay sabiti değerleri

3.8 PDMS Malzemesinin Yapışma Enerjisi Belirlenmesi

Daha önceden Bölüm 2.3’de anlatılan JKR teoremi, Eş.2.13 kullanılarak PDMS malzemesinin cam yüzey ile arasındaki yapışma enerjisi (w_f) bulunabilir. Aşağıda da verilen bu eşitlikteki P_c değeri; küresel lensin yapıştığı PDMS malzemesinden ayrılırken elde edilen en adezyon kuvvetidir (ortalama 2mN). Buna göre, Bölüm 2.3’de bahsedilen (Eş.2.13), aşağıda verilen eşitlik kullanılarak, cam ve PDMS malzemesi arasındaki adezyon enerjisi $w_f = 85 \text{mj/m}^2$ olarak bulunmuştur.

$$P_c = \frac{3}{2} * w_f * \pi * R_h \quad (\text{N})$$

$$w_f : \text{Adezyon enerjisi} \quad (\text{J/m}^2)$$

$$R_h : \text{Rijit kürenin yarı çapı} \quad (\text{m})$$

$$P_c : \text{Adezyon kuvveti} \quad (\text{N})$$

4. TIRMANAN ROBOT TEKERLEĞİNİN MODEL VE TESTLERİ

Süngerler elastik yapılarından dolayı, uygulanan kuvvete göre kolayca deforme olup, şekil değiştirebilirler. Bu nedenle tırmanan robotların ayaklarında da hem yüzeylere adaptasyonu arttırmasını sağlayacak, hem de yüzeye dokunan fiber sayısının artmasını sağlayacak süngerler kullanılabilir. Bu bölümde sünger teker kullanan tırmanan robotta, tekere uygulanan farklı kuvvetlere göre oluşan fiber temas alanı bulunmuştur. Aynı zamanda rijit bir tekerden elde edilecek toplam adezyon kuvveti hesaplanmıştır.

4.1 Süngerin Elastisite Modül ve Yay Sabiti Değerlerinin Belirlenmesi

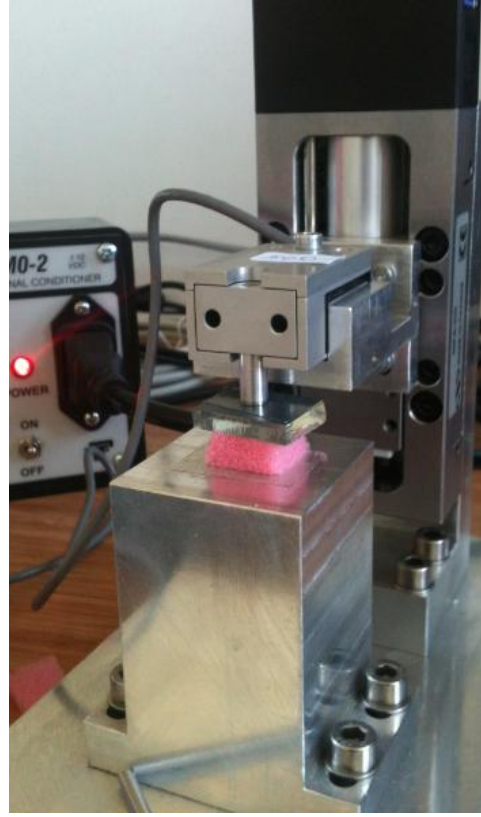
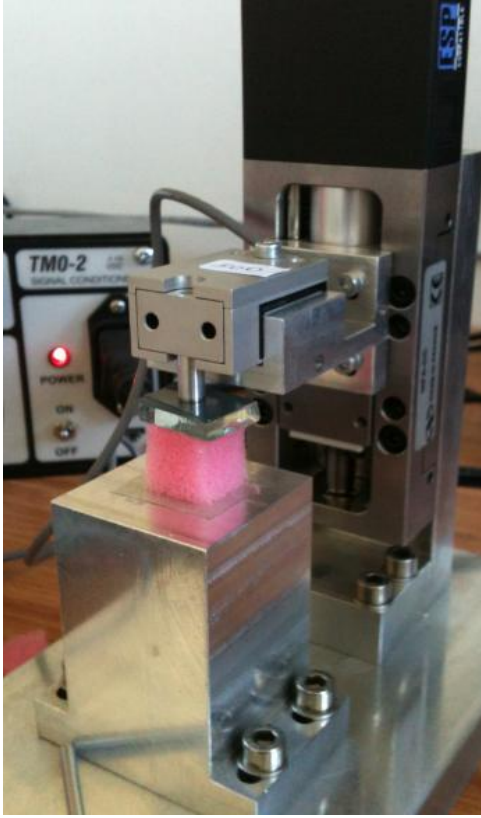
Tırmanan robotlar için kullanılacak bir sünger tekerleğin modellemesinin yapılması için, bu süngerin elastisite modülü ve yay sabiti değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Belirli en, boy ve yüksekliğe sahip olarak üretilen sünger ve PDMS numunelerine, Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde kurulan test düzeneği ile, farklı kuvvetler uygulanarak malzemelerin deformasyon miktarları belirlenmiştir. Sünger ve PDMS malzemelerine uygulanan ön yükleme değerlerine bağlı olarak, malzemelerin uğradıkları deformasyonlar lineer motor pozisyonundan okunmuştur. Böylece Eş.3.5'de bilinmeyen ΔL_p değeri bulunarak, malzemelerin Elastisite modülü (E_p) bulunmuştur. Eş.3.6'dan ise, artık Elastisite modülü (E_p) bilinen malzemelerin yay sabitleri bulunabilir.

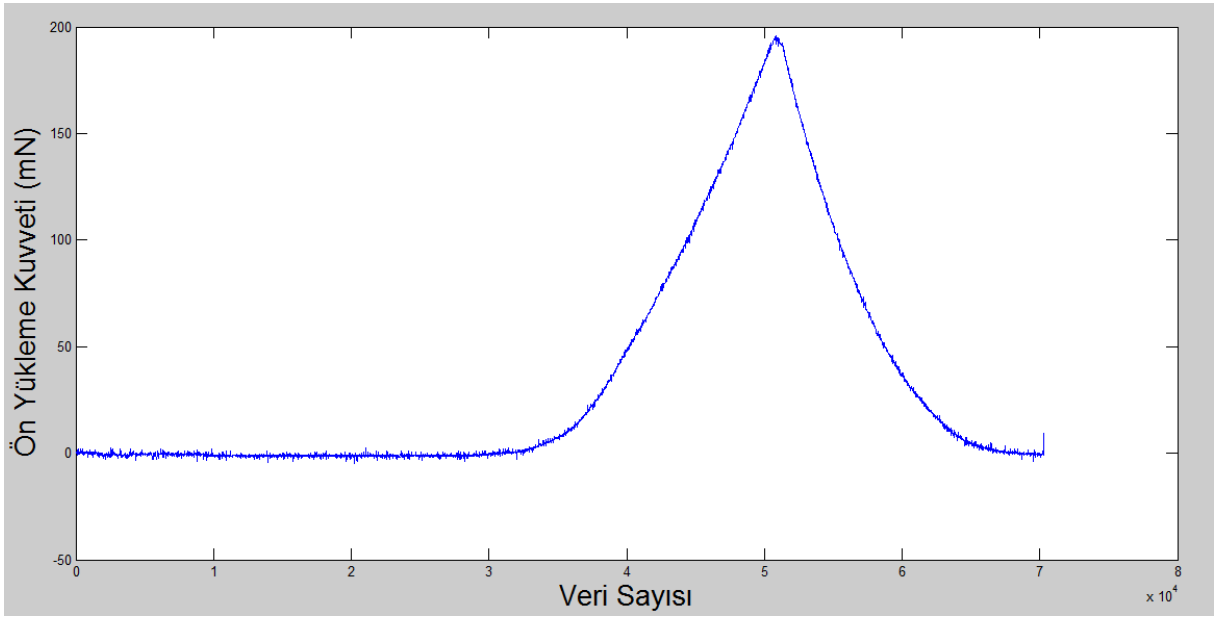
$$E_p = (F_p/A_p)/(\Delta L_p/L_p) \quad (3.5)$$

$$k_p = \frac{E_p \cdot A_p}{L_p} \quad (3.6)$$

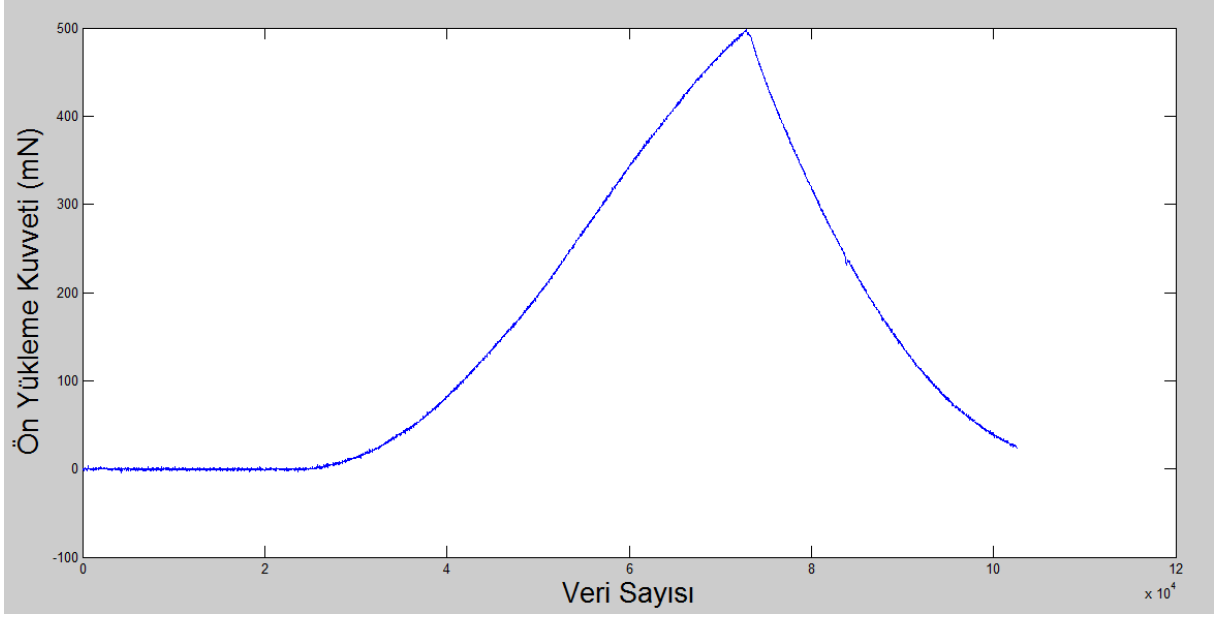
Şekil 3.37'de sünger numunelerine uygulanan deformasyon testi gösterilmiştir. Bu şekildeki soldaki resimde, lineer eksenin sünger numunesine dokunmaya başlama anı, sağdaki resimde ise sünger numunesine bastırma anı gösterilmiştir. Çeşitli sünger numunelerine uygulanan ön yükleme grafikleri, Şekil 3.38, 3.39, 3.40 ve 3.41'de gösterildiği gibidir.



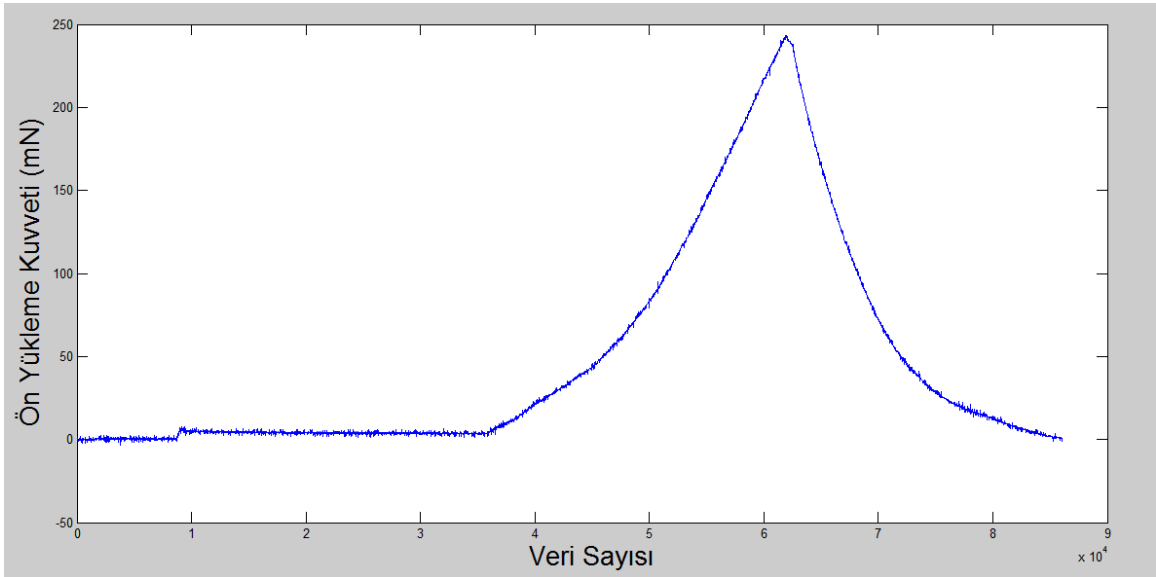
Şekil 4.1. Sünger deformasyon testi fotoğrafları



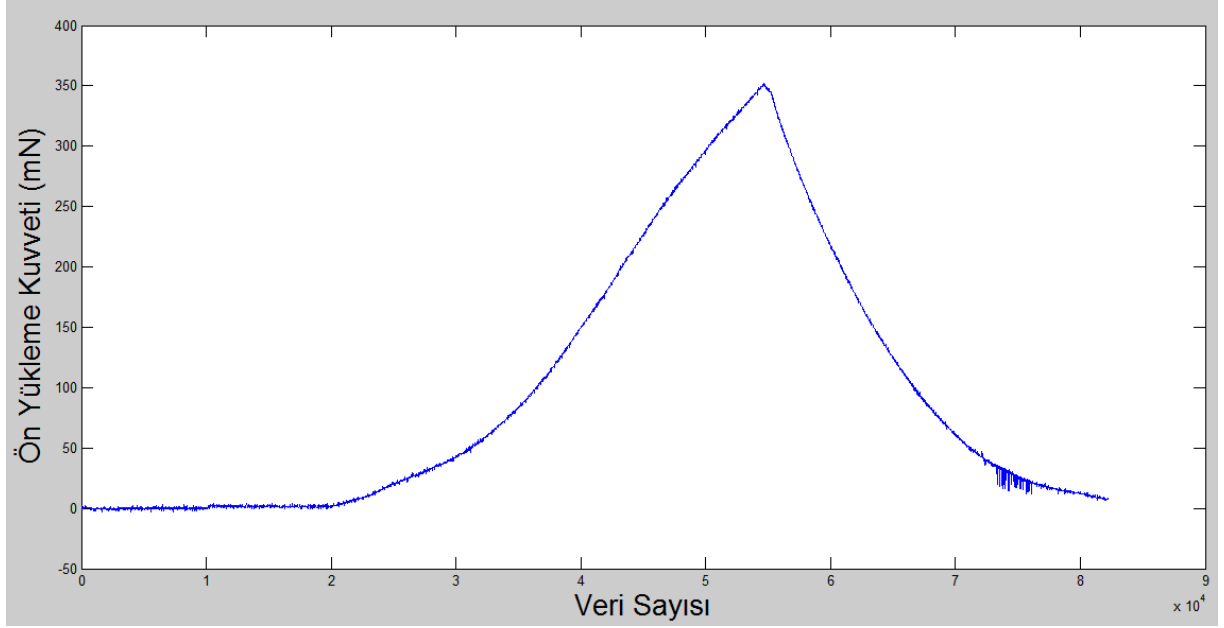
Şekil 4.2. Sünger numunesine uygulanan 200 mN ön yükleme grafiği



Şekil 4.3. Sünger numunesine uygulanan 500 mN ön yükleme grafiği



Şekil 4.4. Sünger numunesine uygulanan 240 mN ön yükleme Grafiği



Şekil 4.5. Sünger numunesine uygulanan 350 mN ön yükleme grafiği

Testleri yapılan farklı sünger numunelerinin özellikleri Çizelge 3.20’de verilmiştir. Bu çizelgede belirtilen ölçütlerdeki numunelerin yapıldığı testlerde uygulanan kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabitleri 3.21, 3.22, 3.23 numaralı çizelgelerde gösterilmiştir.

Boyutlar	Numune 1 Süngerin Özellikleri	Numune 2 Süngerin Özellikleri	Numune 3 Süngerin Özellikleri
En	12.5 mm	19,5 mm	14,5 mm
Boy	12.90 mm	13,5 mm	14 mm
Yükseklik	19.17 mm	23,5 mm	17 mm

Çizelge 4.1. Sünger numunelerinin boyut ölçüleri

Sünger Numune 1 Durum	Lineer Eksen Pozisyonu (mm)	Hesaplanan Elastisite Modülü (kPa)	Hesaplanan Yay Sabiti (N/m)
0.36 N Ön Yüklemede	10.00000	8.98	75
0.435 N Ön Yüklemede	13.55000	6.22	52
0.54 N Ön Yüklemede	16.76461	5.56	46
0.64 N Ön Yüklemede	17.95721	5.98	50

0.76 N Ön Yüklemede	18.98921	6.56	55
0.84 N Ön Yüklemede	19.44162	7.02	59
Lineer Eksenin Süngere Dokunmaya Başladığı An	5.236		

Çizelge 4.2. Sünger Numune 1'in kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri

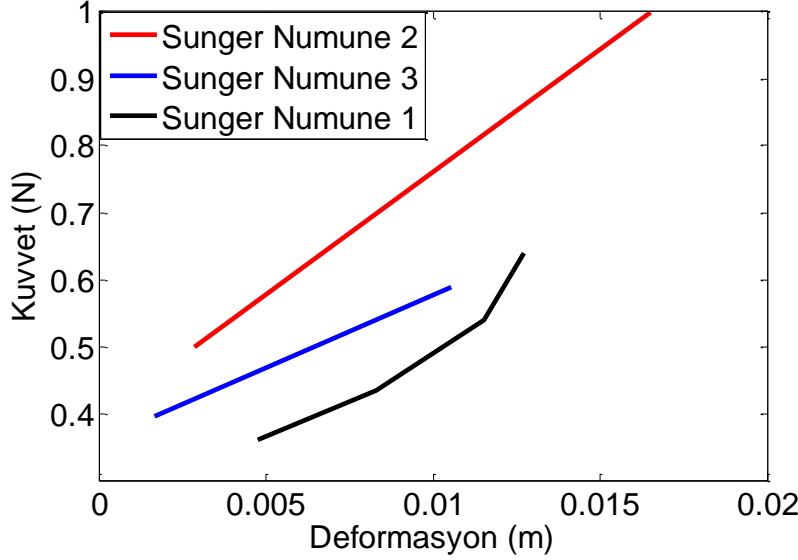
Sünger Numune 2 Durum	Lineer Eksen Pozisyonu (mm)	Hesaplanan Elastisite Modülü	Hesaplanan Yay Sabiti (N/m)
1 N Ön Yüklemede	17.46541	5.4 kPa	60
1.2 N Ön Yüklemede	18.47428	6.1 kPa	68
1.4 N Ön Yüklemede	19.17259	6.8 kPa	76
Lineer Eksenin Süngere Dokunmaya Başladığı An	0.950000		

Çizelge 4.3. Sünger Numune 2'nin kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri

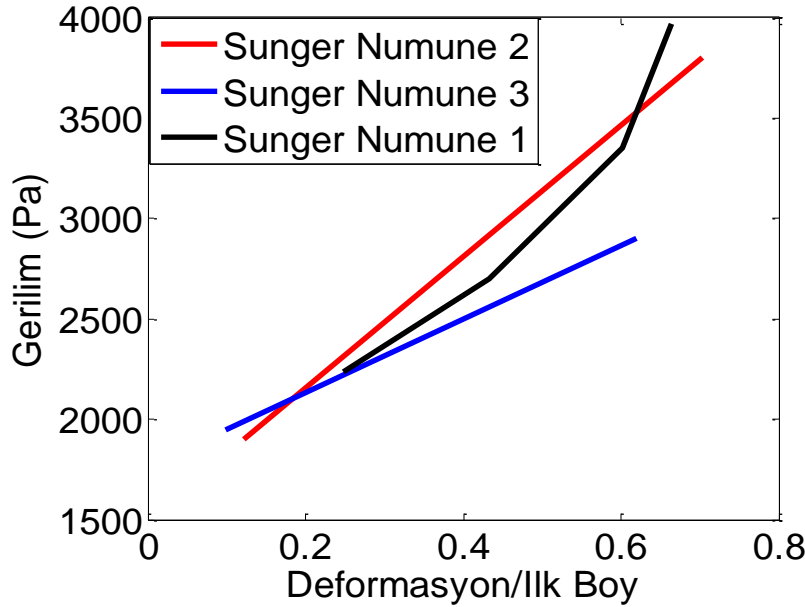
Sünger Numune 3 Durum	Lineer Eksen Pozisyonu (mm)	Hesaplanan Elastisite Modülü (kPa)	Hesaplanan Yay Sabiti (N/m)
0.1 N Ön Yüklemede	7.97576	5.6	67
0.275 N Ön Yüklemede	8.52021	8	95
0.4 N Ön Yüklemede	8.98214	8.4	100
Lineer Eksenin Süngere Dokunmaya Başladığı An	7.30000		

Çizelge 4.4. Sünger Numune 3'ün kuvvetlere göre hesaplanan elastisite modül ve yay sabiti değerleri

Sünger numunelerine etki eden kuvvetlerin, sünger deformasyonuna bağlı olarak çizdirilen grafikleri ise Şekil 3.41’de görüldüğü gibidir. Bu numunelerin, çizdirilen elastisite modül “ $(F_p/A_p)/(\Delta L_p/L_p)$ ” grafikleri ise Şekil 3.42’deki gibidir.



Şekil 4.6. Sünger Numunelerine etki eden kuvvete bağlı olarak deformasyon miktarları



Şekil 4.7. Sünger numunelerinin $\frac{F_p/A_p}{\Delta L_p/L_p}$ (E_p) grafiği

Sonuç olarak, sünger numunelerinin, hesaplanan tüm elastisite modül ve yay sabiti değerlerinin ortalama değerleri ve genel ortalamaları Çizelge 3.24’deki

gibidir. Buna göre, deformasyon testlerine tabi tutulan, tırmanan robot tekerleklerinde kullanılabilir olan süngerin elastisite modülü 6.74 kPa, yay sabiti ise 12.97 N/m olarak belirlenmiştir.

Numune	Ortalama Elastisite modül(kPa)	Elastisite modül Standart Sapma (kPa)	Ortalama Yay Sabiti (N/m)	Yay Sabiti Standart Sapma (N/m)
Sünger Numune 1	6,72	2,26	56,46	18,54
Sünger Numune 2	6,12	0,74	68,60	7,40
Sünger Numune 3	7,37	1,73	88,03	12,97
Genel Ortalama	6,74	1,58	71,03	12,97

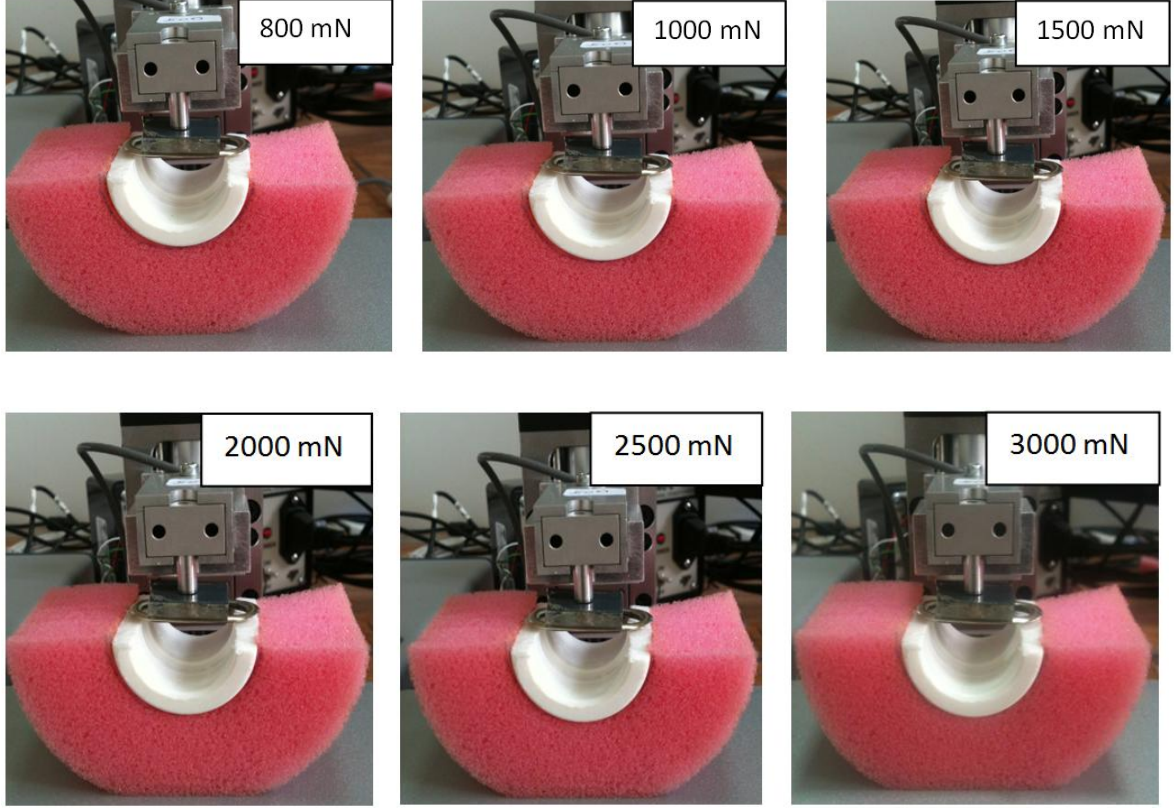
Çizelge 4.5 Sünger numunelerinin hesaplanan ortalama elastisite modül ve yay sabitleri ve genel ortalamaları

4.2 Sünger Tekerleğin Fiber Temas Alanı Testleri ve Modeli

Tırmanan robot tekeri sünger malzemesinden seçildiğinde, sünger tekerin kolay deforme olup, yüzeye uyum sağlama özelliğinden dolayı, sünger tekere yapılan ön yükleme arttıkça, robot tekeri altındaki doyuma ulaşan fiber sayısı da artacaktır. Tırmanan robotlarda kullanılacak sünger tekerin çevresine sarılacak olan fiberlerden elde edilecek adezyon kuvvetini belirleyebilmek için süngerin yüzeye temas alanını belirleyebilecek bir modele ihtiyaç duyulmaktadır.

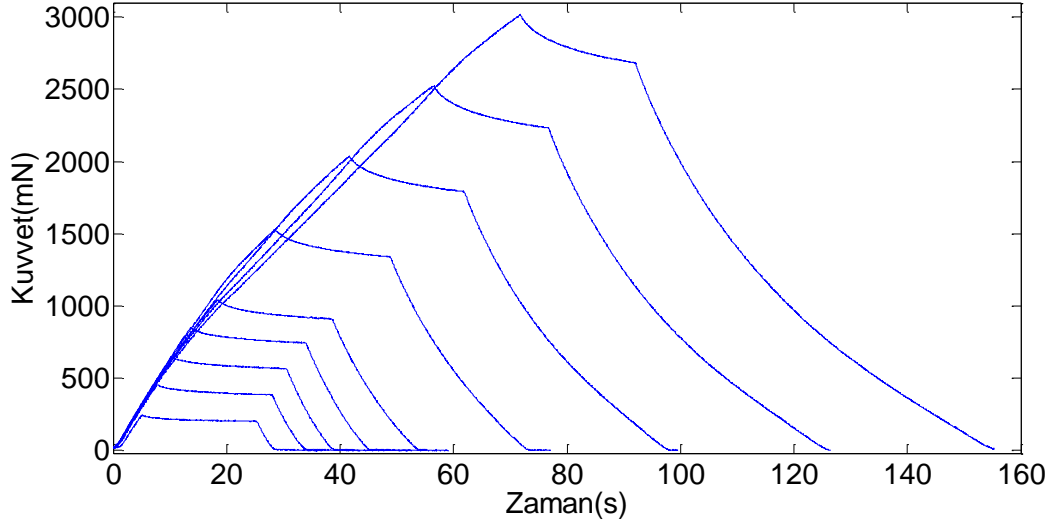


Şekil 4.8. Tırmanan robot tekeri

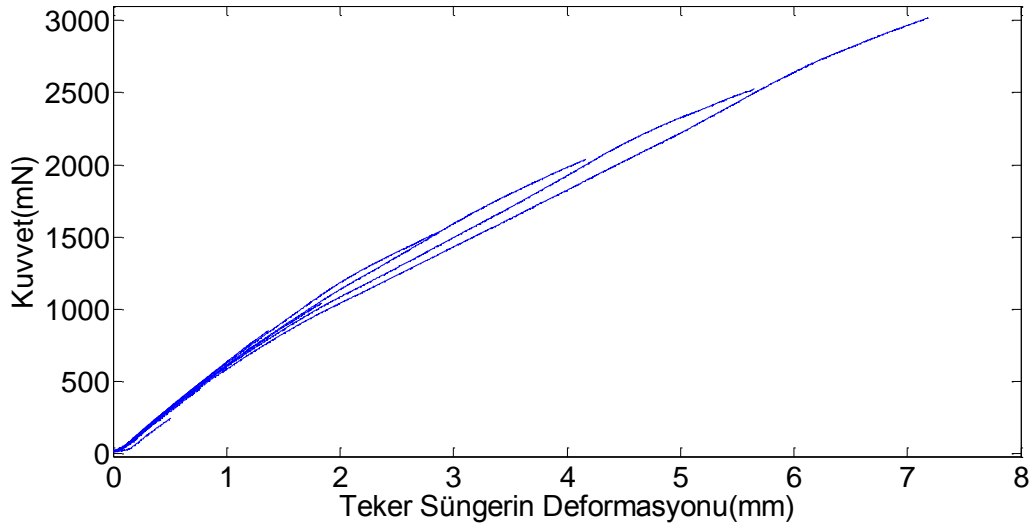


Şekil 4.10. Uygulanan yükleme kuvvetine bağlı olarak tırmanan robot tekerleğindeki fiber temas alanının değişim Testleri

Şekil 4.10'daki gibi testleri gerçekleştirilen yarım sünger tekerleğin ağırlığı 1.4 gr , süngerin içine yerleştirilen 32 mm çapındaki yarım borunun ağırlığı ise 8 gr dır. Toplam ağırlık 9.4 gr olduğundan 100 mN civarında kuvvet süngerin deforme olmasına katkıda bulunmaktadır. Bu sebeple testlerde uygulanan kuvvetlere 100 mN eklenmiş olarak testler gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde yapılan testler sonucunda, sünger tekeri yüzeye doğru bastırmak için gerekli kuvvet değerleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Bu grafiğe göre sünger tekeri yaklaşık 7.2 mm bastırmak için gerekli kuvvet 3 N'dur. Bu kuvvete karşılık oluşan fiber kontak alanı ise 1512.80 mm² olmaktadır.



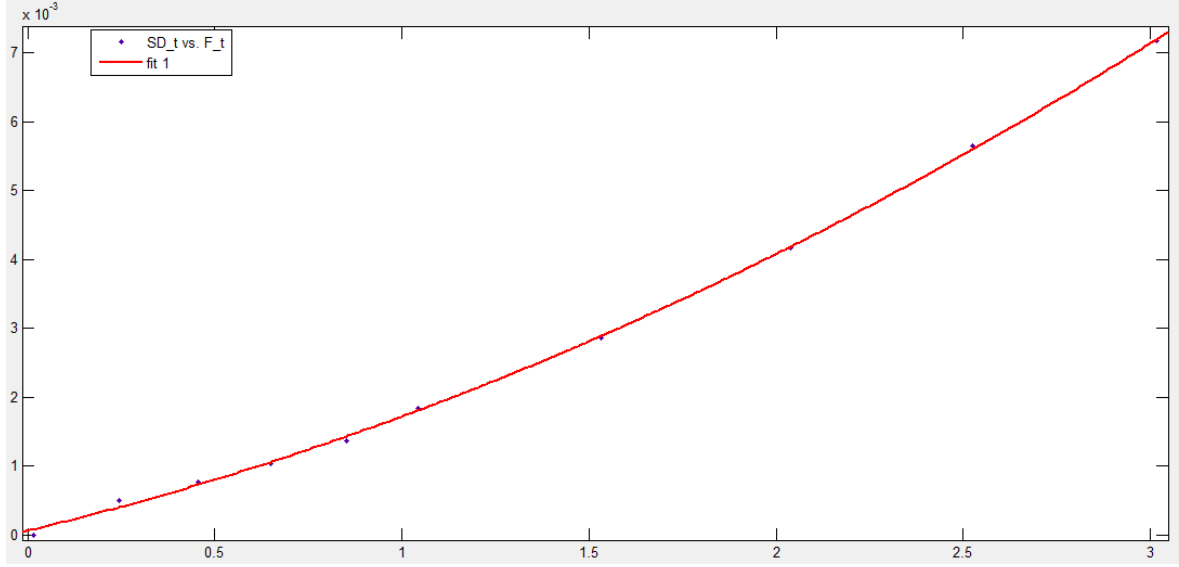
Şekil 4.11. Testleri gerçekleştirilen sünger tekerin zamana bağlı kuvvet grafiği



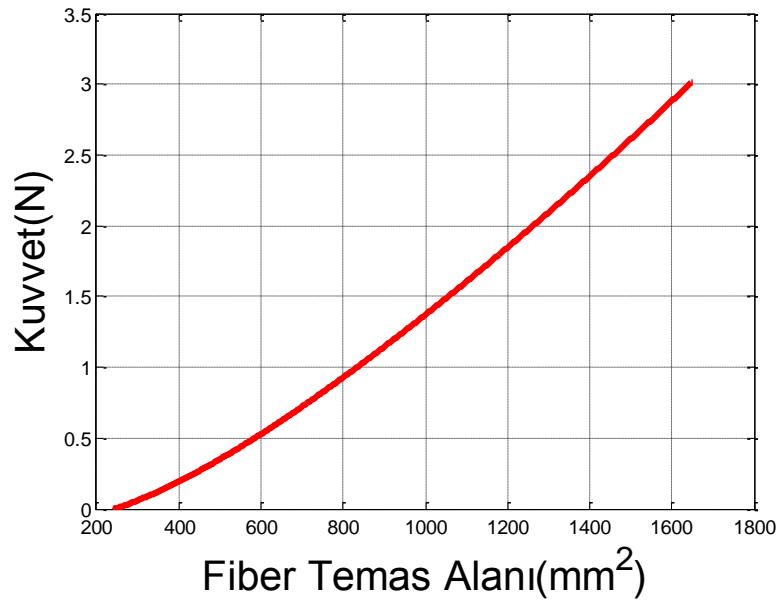
Şekil 4.12. Testleri gerçekleştirilen sünger tekerin deformasyona bağlı kuvvet grafiği

4.2.2 Sünger Tekerlek Deformasyonunun Eğri Uyarlama Metodu ile Çözümü

Şekil 4.10'da gösterildiği gibi yapılan sünger tekerin deformasyon testlerinin Fiber Temas Alanına bağlı olarak çizdirilen Kuvvet eğrisine en yakın eğrinin denklemi MATLAB R2011 programında eğri uyarlama metodu (curve fitting) ile bulunmuştur. Buna göre Şekil 4.13'de gösterilen siyah noktalar test sonuçlarını, kırmızı eğri ise uyarlanan eğriyi göstermektedir. Uyarlanan eğriye göre teker üzerindeki kuvvete bağlı oluşan fiber temas alanı grafiği şekil 4.14'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.13. Test Sonuçlarına en yakın eğri denkleminin çizdirilmesi



Şekil 4.14. Uyarlanan eğriye göre teker üzerindeki kuvvete bağlı oluşan fiber temas alanı grafiği

Eğri uyarlama metodu ile bulunan "f(x)" fonksiyonu Eş.4.19'daki gibi p1, p2 ve p3 katsayıları ile oluşturulmuştur. Burada x fiber temas alanını , f(x) ise kuvveti belirtmektedir.

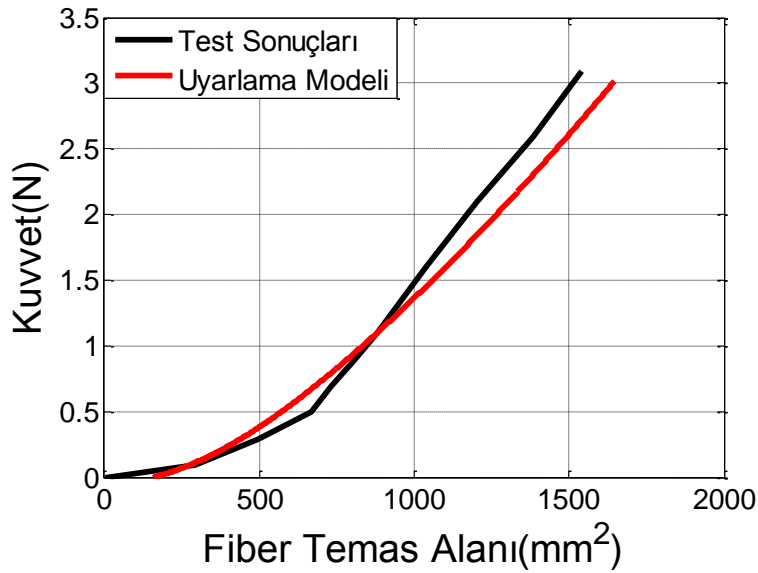
$$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3 \quad (N) \quad (4.19)$$

$$p1 = 0.0003498 \quad p2 = 0.00131 \quad p3 = 6.191e-005$$

4.2.3 Sünger Teker Deformasyon Modeli ve Test Sonuçları

Bu bölümde, sünger tekerlek için tasarlanan eğri uyarlama modeli, test sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve kuvvete bağlı olarak tırmanan robot tekerleğinde oluşacak fiber temas alanı için en uygun model anlatılmıştır.

Şekil 4.15'te sünger tekerlek için test sonuçlarında ve eğri uyarlama modelinde kuvvete bağlı oluşan fiber temas alanlarının grafiği gösterilmiştir. Bu şekilde test sonuçlarını referans değer aldığımızda, sonuçların eğri uyarlama modelinin, kuvvete bağlı olarak test sonuçlarından sapma yüzdeleri de Çizelge 4.6'da belirtilmiştir.



Şekil 4.15. Eğri uyarlama modelinin ve testlerin kuvvete bağlı oluşturdukları fiber temas alanı grafiği

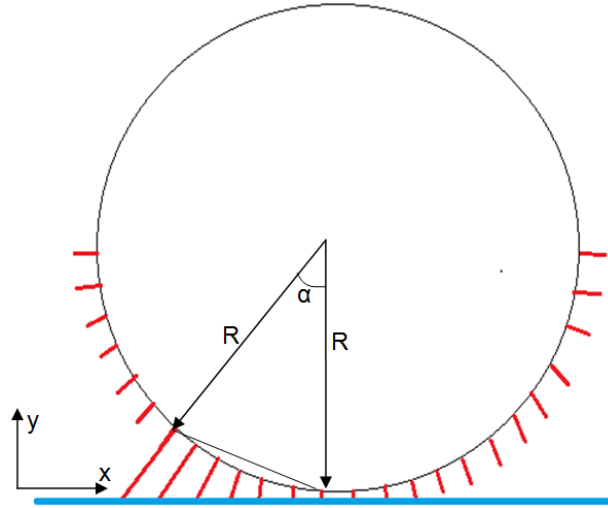
Uygulanan Kuvvet (N)	Fiber Temas Alanı		Model Sapma Yüzdesi
	Test Sonuç	Eğri Uyarlama Modeli	
0,5	667,90	574,65	-13,96%
1	845,80	835,80	-1,18%
1,5	1008,70	1061,10	5,19%
2	1190,90	1267,30	6,42%
2,5	1350,30	1460,30	8,15%
3	1512,80	1642,20	8,55%

Çizelge 4.6. Uygulanan kuvvete göre test ve modellerdeki fiber temas alanları karşılaştırılması ve test Sonuçlarından Sapma Yüzdeleri

Sonuç olarak; sünger tekerlekteki fiber temas alanını belirlemek için yapılan eğri uyarlama modeli ile çalışıldığında maksimum %14 civarında bir sapma oluşacaktır. Ek 9'da test sonuçlarının ve eğri uyarlama modelinin bulunduğu Matlab koduna ulaşılabilir.

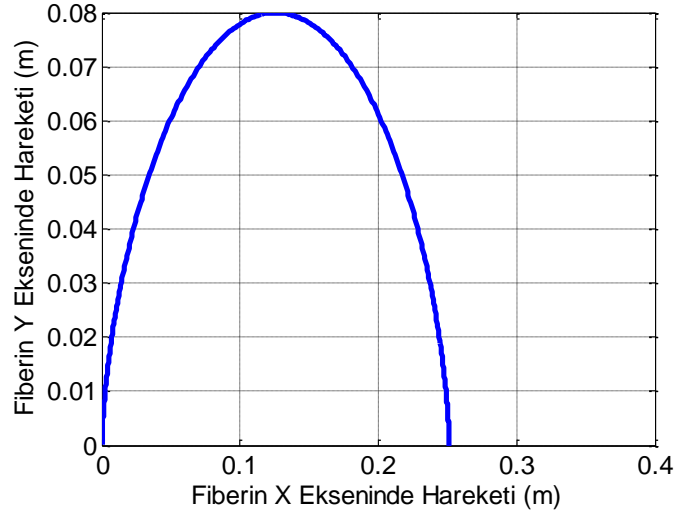
4.3 Rijit Tırmanan Robot Tekeride Adezyon Modeli

Tekerin yaptığı dönme ve öteleme hareketi sırasında, rijit teker üzerindeki bir nokta modellenerek, fiberin x ve y eksenlerinde koordinatları bulunmuştur. Bu nokta üzerindeki bir fiber, teker döndükçe uzayacaktır ve fiberi çekme kuvveti, adhezyon kuvvetini yendiği an, fiber yüzeyden kopacaktır.

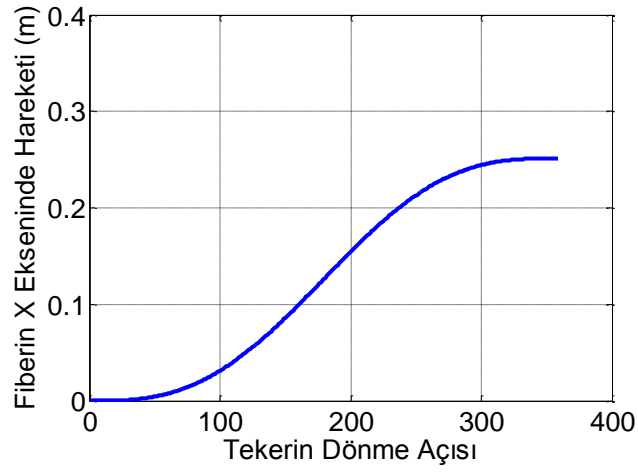


Şekil 4.16 Fiberlerin teker üzerindeki davranış modeli

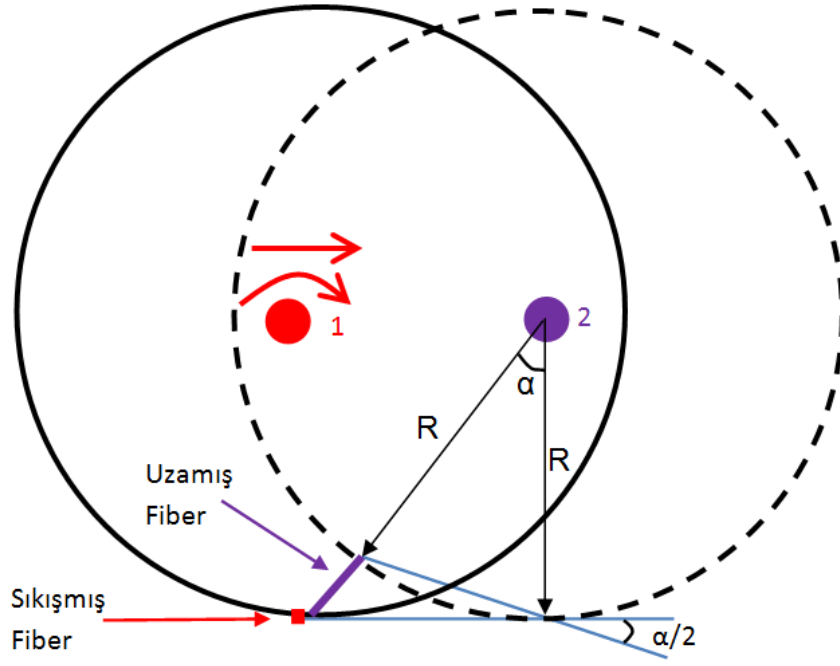
Teker üzerindeki bir noktanın(fiberin), Şekil 4.16'da gösterildiği gibi, α açısına bağlı olarak x ve y ekseninde kat ettiği yol, Eş.4.20 ve Eş.4.21'deki gibidir. Bu denklemler kullanılarak bir fiberin x ve y eksenlerinde kat ettikleri yollar Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Teker dönerek ilerlerken, yüzey ile temas halinde olan fiber, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi gittikçe uzamaktadır. Fiberin her bir açıdaki boyunu $h(\alpha)$ denklem 4.22'den bulabiliriz. Bu denklem tekerlek " α " kadar dönme hareketi yaptığında, fiberin uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 4.17.Teker üzerindeki noktanın(fiberin) x ve y eksenlerine göre yol aldığı uzunluklar. $R = 40 \text{ mm}$, $\alpha = 0:360$.



Şekil 4.18 Tekerin dönme açısına bağlı olarak, teker üzerindeki fiberin x ekseninde yol aldığı uzunluk. ($R=40\text{mm}$, $\alpha=0:360$)



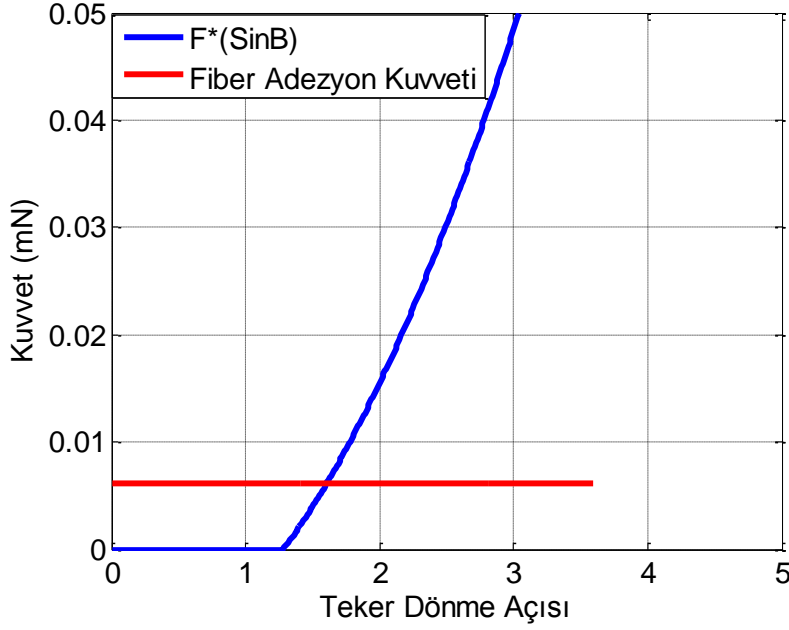
Şekil 4.19. Tekerin dönme ve öteleme hareketine göre fiber modeli

Şekil 4.12’de, tekerleğin dönme ve öteleme hareketi ile 1 konumundan 2 konumuna geçişi gösterilmiştir. Düz çizgi ile çizilen çember, çemberin 1. Konumdaki halini, bu çemberin altında kalan kırmızı çizgi ise 1. Konumdaki tekerleğin altındaki sıkışmış fiberi temsil etmektedir. Tekerlek 1. Konumda iken $\alpha=0$ ’dır, yani harekete başlamamıştır. Kesik çizgi ile gösterilen çember ise tekerleğin α kadar dönme hareketi yaparak 2. Konuma geldiğini göstermektedir. 2. Konumda ise uzayan fiber mor çizgi ile gösterilmiştir. Bu tekerlek adhezyon modelinde, tekerlek altında kalan sıkışmış fiberin boyu “0” olarak kabul edilmiştir.

$$x(\alpha) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \alpha}{360} - R \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{m}) \quad (4.20)$$

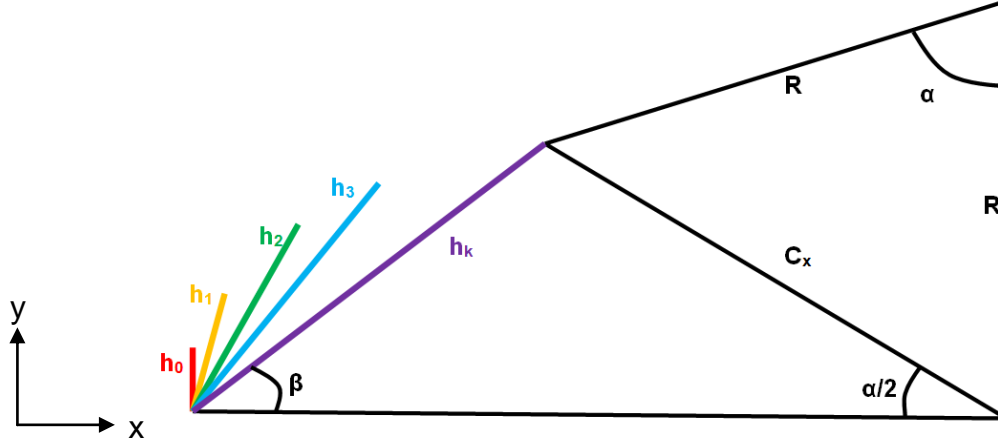
$$y(\alpha) = R \cdot (1 - \cos(\alpha)) \quad (\text{m}) \quad (4.21)$$

$$h(\alpha) = \sqrt{x(\alpha)^2 + y(\alpha)^2} \quad (\text{m}) \quad (4.22)$$



Şekil 4.20 Tekerin dönme açısına bağlı olarak, bir fiberi çekme kuvvetinin normal bileşeni ile adezyon kuvvetinin gösterimi.

Tekerlek hareket halinde iken, fibere etki eden kuvvetini $F(\alpha)$, Eş.4.23'deki gibi hesaplayabiliriz. Burada, "h" fiber boyu, E_f fiberin elastisite modülü, A_f fiberin alanıdır. $h(\alpha) > h$ olduğunda yani, fiber uzamaya başladığında, Fibere gerilme kuvveti " $F(\alpha)$ " uygulanmaya başlanacaktır. Şekil 4.14'de görüldüğü gibi fiber uzadıkça, yüzey ile β açısı yaparak çekilmektedir. Fiberi çeken kuvvetin y eksenindeki bileşeni " $F(\alpha) * \sin(\beta)$ ", fiberin adezyon kuvvetini yendiğinde, fiber yüzeyden ayrılır. Şekil 4.20'de bu durum gösterilmiştir. Buna göre, teker 1.35° derece döndüğünde fiber uzamaya başlıyor. 1.55° 'de ise, fiber çekme kuvvetinin y bileşeni " $F(\alpha) * \sin(\beta)$ ", fiberin adezyon kuvvetini yenerek, fiberin yüzeyden ayrılmasını sağlıyor.



Şekil 4.21 Fiberin α açısına bağlı olarak uzaması ilk başta h_0 boyunda, teker hareket ettikçe, h_1 h_2 h_3 yüksekliklerine ulaşıyor, en son h_k uzunluğunu ise fiberin yüzeyden kopma uzunluğu oluyor. α , β ve C_x değişken uzunluklardır.

Fiberin, tam doyuma ulaşmışken, düz bir yüzeye dik olarak çekildiğinde elde edilen adhezyon kuvvet modeli Bölüm 2'de belirtilen Eş.2.2'ye göre $P_f = \sqrt{6\pi a^3 K w}$ idi.

$$F(\alpha) = \frac{A_{f1} * E_f * \Delta h(\alpha)}{h(\alpha)} \quad (N) \quad (4.23)$$

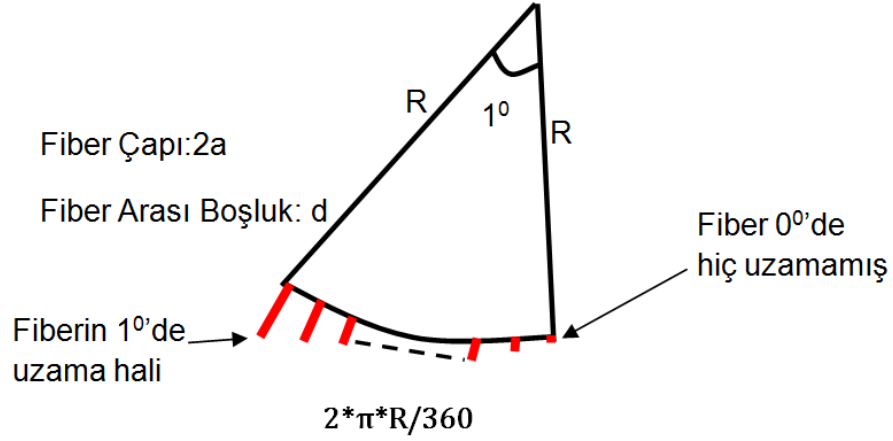
$$\Delta h(\alpha) = h(\alpha) - h \quad (m) \quad (4.24)$$

$$C_x = R^2 + R^2 - (2 * R^2 * \cos(\alpha)) \quad (m) \quad (4.25)$$

$$\frac{h_k}{\sin(\beta)} = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) * C_x \quad (4.26)$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{h_k}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) * C_x}\right) \quad (4.27)$$

Fiberin yüzey ile yaptığı, β açısını bulmak için, Şekil 4.21'de gösterilen üçgenden, Eş.4.26'daki gibi bir eşitlik yazılabilir. Bu eşitlikten β açısı denklem 4.27'deki gibi bulunabilir.



Şekil 4.22. Teker üzerinde bir dereceye karşılık gelen fiber sayısı gösterimi

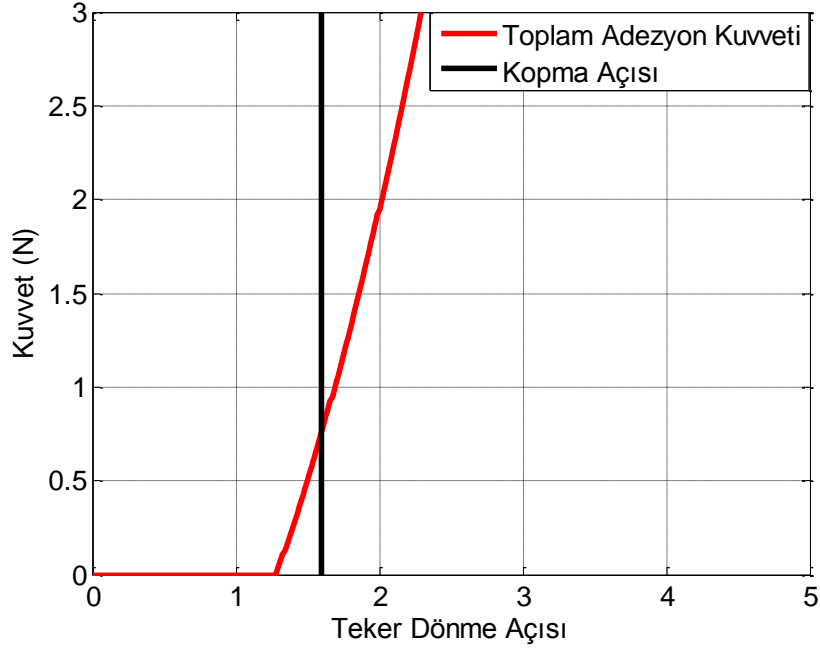
Şekil 4.22'de gösterildiği gibi, bir dereceye karşılık gelen fiber sayısı 'DF' Eş.4.28'de belirtilmiştir.

$$DF = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{360 \cdot (2 \cdot a + d)} \quad (4.28)$$

Buna göre 1°'deki fiberlerin ortalama toplam uzaması " $DF \cdot \Delta h(1) / 2$ " olacaktır. Sonuç olarak, tüm fiberlerin açığa bağlı olarak uzama denklemi: " $(DF \cdot \Delta h(\alpha)) / 2$ " Teker enindeki fiber sayısını ise " $FS = WW / (2 \cdot a + d)$ " denklemi ile hesaplanır.

Elde edilen toplam yapışma kuvvetini bulmak için, tek bir fiber yapıştığı yüzeyden ayrılanaya kadar, diğer fiberler de uzamaya başlayacaktır. Buna göre her bir derece artışındaki tüm fiberlere uygulanan kuvvet toplanır. Buna göre Toplam adhezyon Eş.4.29'daki gibi bulunabilir. Ayrıca geliştirilen bu modelin Matlab kodu, Ek 10'da gösterilmiştir.

$$\text{Toplam_Ad} = \sum_0^\alpha \frac{F(\alpha) \cdot \sin \beta}{2} * (FS * DF) \quad (N) \quad (4.29)$$



Şekil 4.23. Bir tekerin dönme açısına bağlı olarak, tüm fiberlerden elde edilen toplam adezyon kuvveti

4.4 Model Sonuç ve Yorumları

Bölüm 3.3'de bulunan, fiber dizinlerinin test sonuçlarından en yüksek adezyon basıncı elde ettiğimiz, fiber çapı $2a = 5\mu\text{m}$, fiberler arası boşluğu $d = 5\mu\text{m}$ ve fiber yüksekliğini $10\mu\text{m}$ olan numuneyi bu modele uyguladığımızda; Eş.4.29'a göre elde edilen toplam adezyon kuvveti, tekerin dönme açısına bağlı olarak Şekil 4.23'deki gibi çizdirilmiştir. Bu şekle bakıldığında; 1.55° 'lik teker dönme açısına karşılık gelen kuvvet 0.63 Newton olmaktadır. Buna göre, bir tekerden elde edilen adezyon kuvvetini yaklaşık 63 gr. olarak buluruz. Bu sonuca bağlı olarak, toplam dört adet rijit tekerlekli bir tırmanan robot tasarımı yapıldığında, buradaki parametreler kullanılarak (bkz. Ek 10) robotun ağırlığının en fazla 252 gr. ($63*4\text{ gr}$) olmalıdır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Literatüre Yapılan Katkıların Özeti

Bu tezde yapılan çalışmalarla, literatüre yapılan katkılar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Fiber dizinlerinin modellenmesi için geniş bir literatür taraması yapılmış ve fiber dizinlerinin adezyon basıncına etki eden tüm parametreler irdelenmiştir.
- Tırmanan robotlar için kullanılacak olan fiber dizinlerinin maksimum adezyonu için optimizasyonu numerik olarak modellenmiştir ve üretilen fiber dizinlerinin adezyon testleri yapılarak, teorik model ile karşılaştırılmıştır. Fiber dizinlerinden maksimum adezyon basıncı elde etmek için çapa göre optimum fiber boy/en oranı ($\lambda=h/2a$) hesaplanmıştır.
- Fiber dizinlerinin adezyon testi için tasarlanan test düzeneği ile hem fiber dizinlerinin adezyon testleri yapılmış hem de farklı malzemeleri (PDMS, sünger) basma testlerine tabi tutarak, bu malzemelerin karakteristik özellikleri bulunmuştur. Bu test düzeneğinin yapımı için; tüm komponentlerinin seçimi, kurulumu, yazılımı, CAD tasarımı, üretimi ve çalıştırılması konuları kapsamlı olarak anlatılmış ve bu tür düzenek yapacak araştırmacılar için de bir kılavuz niteliğinde olmuştur.
- Bu tezde, tırmanan robotlarda kullanılması düşünülen sünger tekerleğin, uygulanan kuvvetlere göre oluşacak fiber temas alanlarının hem modellemesi hem de testleri yapılmıştır.
- Ayrıca, Fiber dizini ile kaplı rijit tekerlekten elde edilecek teorik adezyon kuvvetinin hesaplanması için model geliştirilmiştir.

5.2 Fiber Dizinlerinin Adezyon Optimizasyonu

Literatürdeki bilgilerden yararlanılarak, Bölüm 2.4'te geliştirilen optimizasyon kodu, fiber malzemesine uygun kıstaslar kullanılarak yapılmıştır. Bu bölümde yapılan çalışmalar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- Maksimum adezyon için gereken fiber dizinlerinin boyutları tespit edilmiştir.

- Maksimum adezyon için, fiber çapına göre üretilmesi gereken optimum boy/en oranı ($\lambda=h/2a$) bulunmuştur.

Yukarıda maddeler halinde belirtilen sonuçların yorumlaması aşağıdadır;

Bölüm 2.4.2'de geliştirilen optimizasyon algoritması sonucunda, yüksek adezyon basıncı için optimum değerler; fiberlerin küçük çapta seçilip ($2a=5\mu\text{m}$), fiberlerin boy/en oranının 0.5-1.5 arasında olması ve fiberler arası boşluğun (d) minimum olması ile sağlanır. Fiberlerin çapı ($2a$) ve fiberler arası boşluk (d) değerleri minimum boyutta tutulup, fiber boy/en oranının ($\lambda=h/2a$) 0.86'dan yüksek veya düşük olduğunda, adezyon basıncında azalma olduğu görülmüştür. Bu duruma sebep olan en büyük neden PDMS'in yumuşak bir malzeme olmasındandır, bu sebeple çökmelerin olduğu tahmin edilmektedir, bu sebeple belirli çapa sahip fiberlerin boyunun (h) kısıtlanması gerekmektedir. Fiberlerin çökmesi, fiberlerin birbirlerinden uzaklaştırılmasıyla engellenebilir ancak bu durum da birim alandaki efektif fiber alanını azaltacaktır. Bölüm 2.4.3'deki optimizasyon doğrulamasında bu sonuçlar beklenildiği gibi çıkmıştır.

Bölüm 2.4.4'de şu sorunun cevabı bulunmuştur: PDMS malzemesi kullanılarak silindirik olarak üretilen fiber dizininden maksimum adezyon elde etmek için belli bir fiber çapı değerine göre, hangi boy/en oranına sahip fiberlerin üretilmesi gereklidir? Elde edilen sonuçlara göre; fiber çapı arttıkça, fiberin sahip olabileceği boy/en oranı artmaktadır fakat maksimum adezyon basıncı için küçük fiber çapının (2-20 μm) seçilmesi gerekmektedir. Bu çap aralığında (2-20 μm) seçilen fiberlerden maksimum adezyon elde etmek için fiber boy/en oranı ise $0.8 < \lambda < 1.4$ aralığında olmaktadır.

5.3 Fiber Dizinlerinin Adezyon Testleri

Üretilen fiber dizinlerinin adezyon testleri Bölüm 3.6'da yapılmış ve sonuçları teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır;

- En yüksek adezyon basıncı, test sonucu 12.2 kPa değeri ile 1 numaralı fiber dizini numunesinden elde edilmiştir.

- Test sonuçları, teorik adezyon ve düzeltilmiş teorik adezyon basınç modelleri ile karşılaştırıldığında; test sonuçlarının 5-6 kat daha düşük olduğu görülmektedir.
- Bu tezin hedeflerinde belirtilen; fiberlerden 10-15 kPa arasında adezyon basıncının sağlanması, bu test sonuçlarına göre elde edilmiştir.

En yüksek adezyon basıncının elde edildiği (12.2 kPa) '1' numaralı numunenin diğer numunelere göre artışı, fiber çapının küçük ($a=5\mu\text{m}$), boy/en oranının yüksek ($\lambda=2$) ve fiberler arası boşluğun az ($d=5\mu\text{m}$) olmasından kaynaklanmıştır.

Test sonuçlarının, teorik adezyon ve düzeltilmiş teorik adezyon basınç modellerinden 5-6 kat daha düşük olmasının en büyük nedenlerinden biri, destek katman kalınlığının adezyona etkisidir. Teorik sonuçlara yaklaşmak için, fiberlerin çok daha ince fiber destek katmanına sahip olmaları gerekmektedir. Fakat bu durumda da fiberleri kalıptan çıkartılırken, fiber dizinlerinde kopmalar meydana gelmektedir.

Literatürde yapılan fiber dizini testlerinde; 2-40 μm çap aralığında olan fiberlerden elde edilen sonuçların 4-15 kPa aralığında olduğu bilinmektedir [17][42]. Yapılan fiber dizini testlerinde elde edilen adezyon basıncı değerleri ile bu çalışmalarda ki değerler tutarlılık göstermektedir.

Test sonuçlarına göre; üretilen çeşitli fiber dizinleri içerisinde, maksimum adezyon basıncına (12.2 kPa) sahip numunedeki fiber özellikleri ile 300 gr.'lık bir tırmanan robotu taşımak için, robotun bu fiber dizinleri ile tırmanırken minimum 246 mm^2 'lik sabit bir yapışma alanına sahip olması gerekmektedir.

5.4 Tırmanan Robot Teker Model ve Testleri

Bölüm 4'de yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

- Sünger teker kullanan tırmanan robotta, tekere uygulanan farklı kuvvetlere göre oluşan fiber temas alanı bulunmuştur.
- Çevresine fiber dizini sarılı olan rijit bir teker kullanan tırmanan robotta ($R=40\text{mm}$), bir tekerden elde edilecek adezyon kuvveti 0.63 N olarak bulunmuştur.

Bu sonuç maddelerinin yorumlaması aşağıda yapılmıştır;

Tırmanan robot tekerine yapılan ön yükleme arttıkça, eğer teker rijit bir yapıya sahip değilse; robot tekeri altındaki doyuma ulaşan fiber sayısı da artacaktır. Bu sebeple tırmanan robotlarda teker olarak kullanılabilir sünger tekerleğin çevresine sarılacak fiberler sayesinde; bu sünger tekere uygulanan kuvvet ile çok sayıda fiber doyuma ulaşır ve doyuma ulaşan fiberler daha çok adezyon verirler. Buna göre, Bölüm 4.2'de tekere yapılan ön yükleme kuvvetine göre oluşan fiber temas alanı bulunmuştur. Test sonuçlarına göre, eğri uyarılma modeli ile; sünger tekerin yüzeyde oluşturacağı belirli bir fiber temas alanı için gerekli kuvvetin denklemini veren fonksiyon bulunmuştur. (Eş.4.19)

Bölüm 4.3'de Rijit tekerin yaptığı dönme ve öteleme hareketi sırasında, rijit teker üzerindeki bir nokta fiber olarak modellenerek, rijit bir tekerden elde edilecek adezyon kuvveti 0.63 N olarak bulunmuştur (Bölüm 3.6'da belirtilen 1 numaralı fiber dizini numunesi kullanılarak). Buna göre, dört adet rijit tekerlekli bir tırmanan robot tasarımı yapıldığında, buradaki parametreler kullanılarak (bkz. Ek 10) robotun ağırlığının en fazla 252 gr. (63*4 gr) olmalıdır.

5.5 İleriki Çalışmalar

Örümceklerin, süleymancıkların ve daha birçok canlının birçok farklı yüzeylere hiç zorlanmadan tırmanabilmeleri ve ters yüzeylerde bile çok uzun süre hareket etmeden kalabilmeleri ilk çağlardan beri insan oğlunun ilgisini çekmiştir. Tokay Gekko'nun yüzeye yapışma (adezyon) basıncının 200 kPa'a kadar çıkabildiği saptanmıştır. Ancak bu denli yüksek adezyon için; elastisite modülü 4 GPa olan, 0.2-5 µm arasında çapları olan ve hatta bu fiberlerin uçlarında da 100 ile 300 nm çaplarında değişen daha küçük fiberlerin üretimi gerekmektedir. Nanoteknoloji ve fiber üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar düşünülürse; gelecekte bu sonuçlar elde edilebilir.

Şuan ki teknoloji ile ancak yumuşak malzemeler ($E_f = 0.5-10$ MPa) kullanılarak fiber dizinleri üretilebilmektedir. Bu fiberler yumuşak olduğundan, yüksek boy/en oranlarına sahip fiberler ya kendi kendine çöker ya da fiberler arasında matlaşma (kenetlenme) durumları görülür. Bu durumda, boy/en oranı düşürülüp, fiberler arası boşlukların arttırılmaktadır, böylece birim alandaki fiber yoğunluğunun

kısıtlanması ile adezyon basıncı azalmaktadır. Bunun yanı sıra sert ve küçük çaplı fiberler üretilebilirse, bu fiberlerde kir ve toz parçacıkları birikimi minimum düzeye düşeceğinden yüksek adezyon kuvvetleri elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] B.L. Luk, A.A. Collie, D.S. Cooke, and S. Chen. "Walking and climbing service robots for safety inspection of nuclear reactor pressure vessels", Asia Pacific Conference on Risk Management and Safety, 2005.
- [2] J. Shang, T. Sattar, S. Chen, and B. Bridge. "Design of a climbing robot for inspecting aircraft wings and fuselage". *Industrial Robot: An International Journal*, 34:495–502, 2007.
- [3] R.L. Tummala, R Mukherjee, N. Xi, D. Aslam, H. Dulimarta, J. Xiao, M. Minor, and G. Dangi. "Climbing the walls". *IEEE robotics & automation magazine*, 9:10–19, Dec. 2002.
- [4] J. Xiao, A. Sadegh, M. Elliott, A. Calle, A. Persad, and H. M. Chiu. "Design of mobile robots with wall climbing capability". *Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 438–443, July 24-28, 2005.
- [5] H. Zhang, J. Zhang, G. Zong, W. Wang, and R. Liu. "Sky cleaner 3: A real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning". *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pages 2–12, 2006.
- [6] T. Zhu, R. Liu, X. D. Wang, and K. Wang. "Principle and application of vibrating suction method". *Proc. of the IEEE Robotics and Biomimetics Conference*, pages 491–495, 2006.
- [7] D. Longo and G. Muscato. "The alicia3 climbing robot: A three-module robot for automatic wall inspection". *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pages 2–10, 2006.
- [8] L.P. Kalra, J. Gu, and M. Meng. "A wall climbing robot for oil tank inspection". *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 1523–1528, 2006.
- [9] F. Tache, F. Pomerleau, W. Fischer, G. Caprari, F. Mondada, R. Moser, and R. Siegwart. "MagneBike: Compact Magnetic Wheeled Robot for Power Plant Inspection" 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry October, 5-7, 2010

- [10] F. Tache, W. Fischer, R. Moser, F. Mondada, and R. Siegwart. "Adapted magnetic wheel unit for compact robots inspecting complex shaped pipe structures". IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pages 1–6, 2007.
- [11] A.T. Asbeck, S. Kim, M.R. Cutkosky, W.R. Provancher, and M. Lanzetta. "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays". The International Journal of Robotics Research, 25:1165–1179, 2006.
- [12] T. Bretl. "Motion planning of multi-limbed robots subject to equilibrium constraints: The free-climbing robot problem". The International Journal of Robotics Research, 25:317–342, 2006.
- [13] M.J. Spenko, G.C. Haynes, J.A. Sanders, M.R. Cutkosky, A.A. Rizzi, R.J. Full, and D.E. Koditschek. "Biologically inspired climbing with hexapedal robot. Journal of Field Robotics", 25:223–242, 2008.
- [14] H. Prahlad, R. Pelrine, S. Stanford, J. Marlow, and R. Kornbluh. "Electroadhesive robotswall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology". IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3028–3033, 2008.
- [15] B. Aksak, M. P. Murphy, and M. Sitti (2007). "Adhesion of Biologically Inspired Vertical and Angled Polymer Microfiber Arrays", *Langmuir*, 23 (6), pp 3322–3332
- [16] M. P. Murphy, M. Kute, C., Mengüç, Y., Sitti, M. "Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesives", *The International Journal of Robotics Research* published online 13 October 2010
- [17] Luciano F. Boesel, Christian Greiner, Eduard Arzt, and Ara'nzazu del Campo "Gecko-Inspired Surfaces: A Path to Strong and Reversible Dry Adhesives", *Adv. Mater.* 2010, 22, 2125–2137

- [18] K. Autumn, Y. A. Liang, S. T. Hsieh, W. Zesch, W. P. Chan, T.W. Kenny, R. Fearing ve R. J. Full “Adhesive force of a single gecko foot-hair”, letters to nature, sayfa: 681-684, cilt: 405, 8 Haziran 2010
- [19] Unver, O. and Sitti, M. (September, 2010) “Tankbot: A Palm-size, Tank-like Climbing Robot using Soft Elastomer Adhesive Treads”. The International Journal of Robotics Research vol. 29 no. 14: 1761-177
- [20] Unver, O. and Sitti, M. (2010). “Flat dry elastomer adhesives as attachment materials for climbing robots”. IEEE Transactions on Robotics 26(1): 131–141.
- [21] Unver, O. and Sitti, M. (2010). “A Miniature Ceiling Walking Robot with Flat Tacky Elastomeric Footpads”. Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on: 2276 – 2281
- [22] Hansen, W.; Autumn, K. “Evidence for self-cleaning in gecko setae”. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2005, 102, 385-389.
- [23] K. Autumn, M. Sitti, Y.A. Liang, A.M. Peattie, W.R. Hansen, S. Sponberg, T. Kenny, R. Fearing, J.N. Israelachvili, and R.J. Full, “Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae,” Proceedings National Academy of Sciences, vol. 99, no. 19, pp. 12252-12256, September 17, 2002.
- [24] http://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic01/Old_2012_9/t1_BP_size_mass.html
- [25] N. J. Glassmaker, A. Jagota, C.-Y. Hui, and J. Kim, “Design of biomimetic fibrillar interfaces 2. Mechanics of enhanced adhesion, 7 July 2004. Pages 35–48
- [26] D. Campolo, S.D. Jones and R. S. Fearing, “Fabrication of Gecko foot-hair like nano structures and adhesion to random rough surfaces,” IEEE Nano 2003 Aug 12-14, San Francisco.
- [27] M. Schargott, V. L. Popov, and S. Gor, “Spring Model of Biological Attachment Pads,” J. of Theoretical Biology Vol.243 pp. 48-53 2006.
- [28] Hui, C-Y.; Jagota, A.; Shen, L.; Rajan, A.; Glassmaker, N.; Tang, T., “Design of bio-inspired fibrillar interfaces for contact and adhesion theory and experiments,”

Journal of Adhesion Science and Technology, Volume 21, Numbers 12-13, pp. pp. 1259-1280, 2007.

[29] Aksak, B., Murphy, M.P., ve Sitti, M. "Gecko Inspired Micro-Fibrillar Adhesives for Wall Climbing Robots on Micro/Nanoscale Rough Surfaces" 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008.

[30] Greiner, C., Campo, A.D., Arzt, E., "Adhesion of Bioinspired Micropatterned Surfaces: Effects of Pillar Radius, Aspect Ratio, and Preload", *Langmuir*, 2007, 23(7), 3495-3502.

[31] Greuter, M., Shah, G., Caprari, G., Tâche, F., Siegwart, R. ve Sitti, M. "Toward Micro Wall-Climbing Robots Using Biomimetic Fibrillar Adhesives" *AMIRE*, 2005.

[32] Murphy, M.P., Kute, C., Mengüç, Y., Sitti, M., "Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesives", *The International Journal of Robotics Research* 2011 30: 118–133.

[33] C. Greiner, R. Spolenak, E. Arzt., "Adhesion Design Maps for Fibrillar Systems: The Effect of Shape", *Acta Biomater*, 5, 597-606 (2009).

[34] James E. Mark, "Polymer Data Handbook", ISBN-10: 0195107896

[35] G. Shah, M. Sitti, "Modeling and Design of Biomimetic Adhesives Inspired by Gecko Foot-Hairs", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, China.

[36] Cheung, E., Aksak, B., Sitti, M., "The U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center-biologically inspired polymer microfibrillar arrays for mask sealing", 2009

[37] Vajpayee, S., Long, R., Shen, L., Jagota, A., Hui, C.Y., "Effect of Rate on Adhesion and Static Friction of a Film-Terminated Fibrillar Interface", *Langmuir*, Volume: 25, Issue: 5, Pages: 2765-2771, 2009

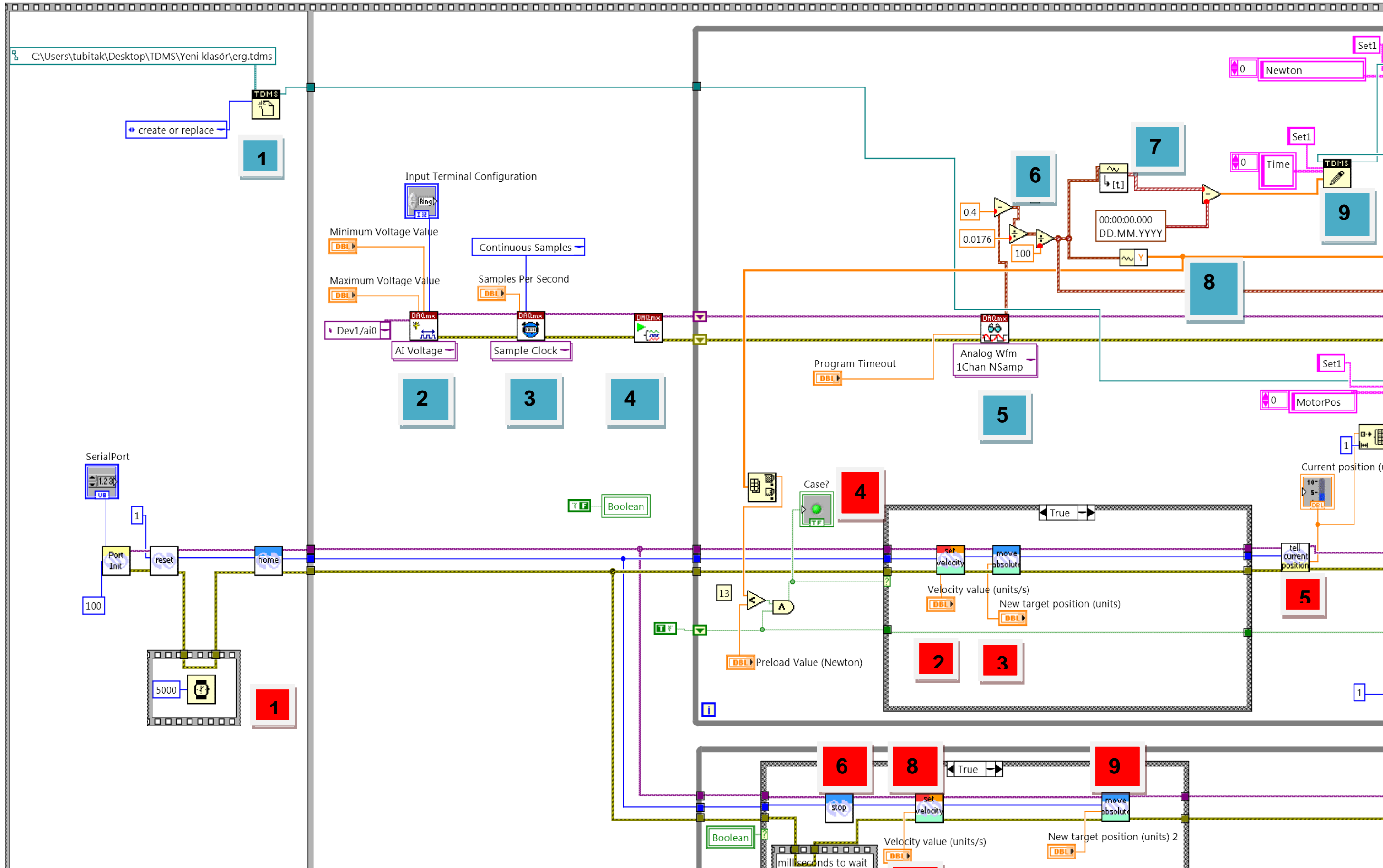
[38] Kim, S., Sitti, M., "Effect of backing layer thickness on adhesion of single-level elastomer fiber arrays", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 91 (16), 2007

- [39] A.V. Spuskanyuk , R.M. McMeeking, V.S. Deshpande , E. Arzt, “The effect of shape on the adhesion of fibrillar surfaces” *Acta Biomater*, 4(6):1669-76, 2008.
- [40] C. Greiner, R. Spolenak, E. Arzt, “Adhesion design maps for fibrillar adhesives: The effect of shape”, *Acta Biomater*, Volume 5, Issue 2, Pages 597-606, Şubat 2009.
- [41] R. Spolenak, S. Gorb, H. Gao, E. Artz, “Effects of contact shape on the scaling of biological attachments,” *Proc. R. Soc. A* (2005) 461, 305319 doi:10.1098/rspa.2004.1326.
- [42] A. del Campo, C. Greiner, and E. Arzt, “Contact shape controls adhesion of bioinspired fibrillar surfaces,” *Langmuir*, ASAP Article 10.1021/la7010502 S0743-7463(70)01050-8 Aug. 28, 2007.
- [43] Safdari, M., Baniassadi, M., Asiaei, S., Garmestani, H., Ahzi, S., “Modeling of Biologically Inspired Adhesive Pads Using Monte Carlo Analysis,” *Journal of Adhesion Science and Technology* 24 (2010) 1207–1220.
- [44] Lee, J., Majidi, C., Schubert, B., Fearing, R.S., “Sliding-induced adhesion of stiff polymer microfibre arrays. I. Macroscale behaviour,” *J. R. Soc. Interface* 2008 5, 835-844.
- [45] Schargott, M., Popov, V. K., Gorb, S., “Spring model of biological smooth attachment pads,” *J. Theor. Biol.* 2006, 243 (1), 48-53.
- [46] M. Lamblet, E. Verneuil, T. Vilmin, A. Buguin, P. Solberzan, L. Le´ger “Adhesion Enhancement through Micropatterning at Polydimethylsiloxane–Acrylic Adhesive Interfaces,” *Langmuir* 2007, 23, 6966.
- [47] Yao, H., Gao, H., “Bio-inspired mechanics of robust and releasable adhesion on rough surface,” *J. Mech. Phys. Solids* 54, 1120– 1146, 2006.
- [48] M. Sitti, R. S. Fearing, “Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives,” *J. Adhes. Sci. Technol.* 2003, 17, 1055.

- [49] P. Roca-Cusachs, F. Rico, E. Martinez, J. Toret, R. Farre, D. Navajas, "Stability of Microfabricated High Aspect Ratio Structures in Poly(dimethylsiloxane)" *Langmuir*, 2005, 21 (12), pp 5542–5548.
- [50] Shah, G.J., Sitti, M., Member, "Modeling and Design of Biomimetic Adhesives Inspired by Gecko Foot-Hairs," *ROBIO*, sf. 873 – 878, 2004.
- [51] Maugis, D., "Contact, Adhesion and Rupture of Elastic Solids," Springer Series In Solid State Sciences, 2000, VOL 130.
- [52] Persson, B.N.J, Tosatti, E., "The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids," *J. Chem. Phys.* 115, 5597 (12), 2001.
- [53] S. Kim, B. Aksak, and M. Sitti, "Enhanced friction of elastomer microfiber adhesives with spatulate tips," *Appl. Phys. Lett.* 91, 221913 (2007); DOI:10.1063/1.2820755.
- [54] B. Aksak, "A Design Methodology for Biologically Inspired Dry Fibrillar Adhesives" , ProQuest, 2008
- [55] Maugis, D. Adhesion of spheres: the JKR-DMT transition using a dugdale model. *J. Colloid Interface Sci.* 1992, 150, 243-269
- [56] O. Unver, A. Uneri, A. Aydemir, M. Sitti, "Geckobot: A Gecko Inspired Climbing Robot Using Elastomer Adhesives" 2006, IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida, May 2006
- [57] <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pdms.htm>
- [58] Jae-Seob Kwak, Tae-Wan Kim, A Review of Adhesion and Friction Models for Gecko Feet, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING* Vol. 11, No. 1, pp. 171-186, FEBRUARY 2010 / 171
- [59] Vudayagiri S., Junker M. D., Skov A. L., Factors affecting surface and release properties of thin Polydimethylsiloxane films, The Danish Polymer Centre, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark

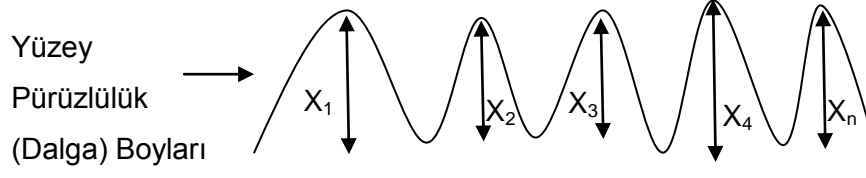
- [60] Zhou Y., Hu L., and Grüner G., A method of printing carbon nanotube thin films, *Applied Physics Letters* 88, 123109, 2006
- [61] Majidi, C.; Groff, R.; Fearing, R. "Clumping and packing of hair arrays manufactured by nanocasting." *Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congress Exposition 2004*, 579-584.
- [62] P.Lin, S. Vajpayee, A. Jagota, C. Hui and S. Yang "Mechanically tunable dry adhesive from wrinkled elastomers", *Soft Matter*, 1830-1835 June 2008
- [63] F. Yang and B. Zhao, "Adhesion Properties of Self-Polymerized Dopamine Thin Film", *The Open Surface Science Journal*, 2011, 3, 115-122
- [64] E Cheung, "Adhesion of Biologically Inspired Polymer Microfibers on Soft Surfaces" , *Langmuir*, 2009 - ACS Publications
- [65] P Glass, H Chung, NR Washburn, "Enhanced reversible adhesion of dopamine methacrylamide-coated elastomer microfibrillar structures under wet conditions *Langmuir*", 2009, ACS Publications
- [66] C Menon, J. Krahn, Y. Liu, A. Sadeghi, "A tailless timing belt climbing platform utilizing dry adhesives with mushroom caps" *IOP Science*, 2011, *Smart Materials and Structures* .
- [67] S. Kim and M. Sitti "Biologically inspired polymer microfibers with spatulate tips as repeatable fibrillar adhesives", , *Applied Physics Letters* 89, 261911 2006
- [68] http://en.wikipedia.org/wiki/Circle_packing

EK-1 TEST DÜZENEĞİ BLOK DİYAGRAMI



EK-2 ORTALAMA KAREKÖK PÜRÜZLÜLÜĞÜ HESABI

$$x_{OKP} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$$



EK-3 ADEZYON BASINCI OPTİMİZASYONU

```
clear all
close all
clc

Ef = 0.55*10^6;           % N/m2 - Fiber Youngs Modulus
vf = 0.5;                 % - Poissons Ratio
SE = 0.020;              % J/m2 - Surface Energy
wf = 0.085;              % J/m2 - work of adhesion

a_start = 2.5*10^-6;      % m - Minimum fiber radius
a_end = 15*10^-6;        % m - Maximum fiber radius
h_start = 1.25*10^-6;    % m - Minimum fiber height
h_end = 150*10^-6;      % m - Maximum fiber height
loop = 351;

for i=1:loop
    a(i) = a_start + (i-1)/(loop-1)*(a_end-
a_start);                % Fiber radius
    Adh_SF(i) = sqrt(6*wf*(4/3*Ef/(1-
vf^2))/(pi*a(i)));      % Pa-KR Adhesion for a given
fiber

    for j=1:loop
        h(j) = h_start + (j-1)/(loop-1)*(h_end-
h_start);                % Fiber height
        d(i,j) = sqrt(((h(j)/((pi^4*(Ef/(1-
vf^2))*a(i))/(2^11*SE))^(1/12)))^4)/((3*Ef*a(i)^3)/SE));
        AR(i,j) =
h(j)/(2*a(i));           % Boy/En oranı
        Coverage(i,j) =
(2*pi*a(i)^2)/(sqrt(3)*(2*a(i)+d(i,j))^2); % Effective Fiber
Area Ratio
        Adh_Pres(i,j) =
Adh_SF(i)*AR(i,j)^(0.3)*Coverage(i,j); % Pa - Total
Adhesive Pressure
    end
end

figure()
mesh(AR,2*a*10^6,Adh_Pres/10^3,'LineWidth',3)
set(gca,'FontSize',18)
shading interp
xlabel('Boy/En oranı')
ylabel('Fiber Çapı (\mum)')
zlabel('Adezyon (kPa)')
grid on

figure()
mesh(h*10^6,2*a*10^6,Adh_Pres/10^3,'LineWidth',3)
set(gca,'FontSize',18)
shading interp
xlabel('Fiber Boyu (\mum)')
ylabel('Fiber Çapı (\mum)')
```

```
zlabel('Adezyon (kPa)')
grid on

figure()
mesh(AR, Coverage, Adh_Pres/10^3, 'LineWidth', 3)
set(gca, 'FontSize', 18)
shading interp
xlabel('Boy/En oranı')
ylabel('Fiber Yoğunluğu')
zlabel('Adezyon (kPa)')
grid on
```

EK-4 ADEZYON BASINÇ ORANININ ÇAP VE BOY/EN ORANINA GÖRE ÇİZDİRİLMESİ

```
for i=1:10000
    r(i)          = i/100;
    adhesion_r(i) = r(i)^-0.4;
end

for j=1:10000
    lambda(j)     = j/100;
    adhesion_l(j) = lambda(j)^0.3;
end

figure()
x=r;
semilogx(x,adhesion_r,'b','LineWidth',3)
set(gca,'FontSize',20)
xlabel('Yarıçap (birimsiz)')
ylabel('Adezyon Basınç Oranı')
title('Yarıçap & Adezyon İlişkisi Grafiği')
grid on

figure()
y=lambda;
semilogx(y,adhesion_l,'b','LineWidth',3)
set(gca,'FontSize',20)
xlabel('Boy/En Oranı')
ylabel('Adezyon Basınç Oranı')
title('Boy/En Oranı & Adezyon İlişkisi Grafiği')
grid on
```

EK-5 OPTİMİZASYON DOĞRULAMA

```
function f = AdezOptimRev(x)

Ef = 0.55*10^6;           % N/m2 - Fiber Elastisite Modülü
vf = 0.5;                % - Poissons oranı
SE = 0.020;             % J/m2 - Yüzey enerjisi
wf = 0.085;             % J/m2 - Adezyon enerjisi

a=x(1);
h=x(2);

d = sqrt(((h/(((pi^4*(Ef/(1-
vf^2))*a)/(2^11*SE))^(1/12))))^4)/((3*Ef*a^3)/SE));
AR = h./(2.*a);
% Aspect Ratio
Coverage = (2*pi.*a.^2)./(sqrt(3).*(2.*a+d).^2);
% Effective Fiber Area Ratio
Adh_Pres = sqrt(6*wf*(4/3*Ef/(1- vf^2))/(pi*a)).*(AR).^0.3.*Coverage;
% Total Adhesive Pressure

f = - Adh_Pres; % optimizasyon

clc

Aeq=[];
beq=[];

lb = [2.5e-6; 1.25e-6]; %
ub = [15e-6; 150e-6];
x0 = [15e-6; 30e-6]; % Çözüm başlangıç tahmini

options = optimset('Display','iter','TolCon',1e-8,'TolX',1e-8)

[x,fval] = fmincon(@AdezOptimRev,x0,[],[],[],[],lb,ub,[],options)
```


EK-6 FİBER ÇAPINA GÖRE OPTİMUM BOY/EN ORANININ BELİRLENMESİ

```
function f = AdezOptimRev(x)

Ef = 0.55*10^6;           % N/m2 - Fiber Youngs Modulus
vf = 0.5;                %          - Poissons Ratio
SE = 0.020;             % J/m2 - Surface Energy
wf = 0.085;             % J/m2 - work of adhesion

a=x(1);
h=x(2);

d = sqrt(((h/((pi^4*(Ef/(1-
vf^2))*a)/(2^11*SE))^(1/12)))^4)/((3*Ef*a^3)/SE));
AR = h./(2.*a); % Boy/En oranı
Coverage = (2*pi.*a.^2)./(sqrt(3).*(2.*a+d).^2); % Effective
Fiber Area Ratio
Adh_Pres = sqrt(6*wf*(4/3*Ef/(1-
vf^2)))/(pi*a)).*(AR).^0.3.*Coverage; %Total Adhesive Pressure

f = - Adh_Pres;

for i=1:25

    a1(i)=(i)*10^-6;

    Aeq=[];
    beq=[];

    lb = [(i+1)*10^-6; (i+1)/2*10^-6]; % a ve h için alt
sınırlar
    ub = [(i+1)*10^-6; (i+1)*10^-5]; % a ve h için üst
sınırlar
    x0 = [15e-6; 30e-6]; % a ve h için Çözüme
tahmini başlangıç değerleri

    options = optimset('Display','iter','TolCon',1e-8,'TolX',1e-8);

    [x,fval] =
fmincon(@AdezOptimRev,x0,[],[],[],[],lb,ub,[],options);

    aspect(i) = x(2,1)/(2*x(1,1)); %Boy/En oranı

end

figure()
plot(2*a1*10^6,aspect,'d','LineWidth',3)
set(gca,'FontSize',18)
xlabel('Fiber Çapı (\num)')
ylabel('Boy/En (h/2a)')
grid on
cftool(2*a1*10^6,aspect)
```

EK-7 FİBER NUMUNELERİNİN TEORİK ADEZYON HESABI

```
h = 10*10^-6 ; % m - Fiberin uzunluğu
a = [2.5*10^-6 2.5*10^-6 2.5*10^-6 5*10^-6 10*10^-6]; % m - fiber yarıçapı
Ef = 550*10^3; % Pa - Fiberin Elastisite modülüsü
vf = 0.5; % Poissons Sabiti
KR = 5*10^-3; % Küre yarıçap
wf2 = 0.085; % J/m2 - Adezyon enerjisi JKR teoremi
Kure_Ad = (3/2)*pi*KR*wf2;
Adh_SF = sqrt(6*wf2*(4/3*Ef/(1-vf^2))./(a.*pi)); % Pa - 1 fiber için JKR Adhezyon formülü
Force_Adh_SF = sqrt(6*wf2*(4/3*Ef/(1-vf^2))./(pi.*a)).*(pi*(a.^2)); % Newton!- Adhezyon kuvveti
d = [5*10^-6 8*10^-6 12*10^-6 25*10^-6 16*10^-6]; % m - Fiberler arası boşluk
Coverage = (3*pi*a.^2)./(((3*sqrt(3)).*((2.*a)+d).^2)./2); % Efektif Fiber alan oranı(Fiber yoğunluğu)
A = pi*a.^2; % m^2 - 1 Fiberin Alanı
APF = Force_Adh_SF.*Coverage; % N- Teorik adezyon kuvveti
APF_M = Force_Adh_SF.*Coverage.*(h./(2*a)).^0.3; % N- Düzeltilmiş teorik adezyon kuvveti
BaTeo = APF./A; % Pa- Teorik Adhezyon basıncı
BaTeo_M = APF_M./A; % Pa- Düzeltilmiş teorik adezyon basıncı
```

EK-8 FİBER NUMUNELERİNİN TEST ADEZYON BASINÇLARININ HESAPLANMASI

```
h = 10*10^-6; % Fiberin uzunluğu
vf = 0.5;      % Fiberin poisson sabiti
Kuv = [18*10^-3 12*10^-3 12*10^-3 12*10^-3 18.67*10^-3];
% N - Yarım kürenin fiberlere bastıracağı kuvvet
Ef = 550*10^3;
% Pa - Fiberin Elastisite modülüsünün hesaplanması
K = (4/3*Ef/(1-vf^2));
% Pa - Fiberin Efektif Elastisite modülüsünü
R = 5*10^-3;
% Yarım küre lensin yarıçapı (m)
Delta = [6*10^-6 7*10^-6 10*10^-6 11*10^-6 27*10^-6];
% Yarım küre lensin fiberlere basma derinliği [1,2,6,10,11 nolu
fiberler sırasıyla] (m)
D = sqrt((R^2)-((R-Delta).^2));
% Yarım küre lensin kontak yarıçapı (m)
CA = pi.*(D.^2);
% Kontak alanı(m^2)
a = [2.5*10^-6 2.5*10^-6 2.5*10^-6 5*10^-6 10*10^-6];
% Fiber yarıçapı(m)
d = [5*10^-6 8*10^-6 12*10^-6 25*10^-6 16*10^-6];
% Fiberler arası boşluk(m)
Altigen = ((3*sqrt(3)).*((a.^2)+d).^2)./2;
% fiberlerin çap ve boşluğuna göre Bir Altıgenin alanı (m^2)
Z = 3.*(CA./Altigen);
% Kontak alanındaki Fiber sayısı
P = [2.3*10^-3 2.6*10^-3 2.85*10^-3 2.8*10^-3 2.5*10^-3];
% N - Fiberlerden elde edilen maksimum yapışma kuvveti!
P1 = P./Z;
% N - 1 fiberden elde edilen yapışma kuvveti
Ba = P1./(pi*a.^2);
% Pa - 1 fiberden elde edilen basınç değeri
L = 10*10^-6 ;
% m - Fiberin uzunluğu
Ba_P = P./CA;
%Patchden elde edilen yapışma basıncı
P_Cr = ((pi^3)*Ef.*(a.^4))/(h^2);
% Tek Bir fiberin burkulma limit kuvveti
Top_P_Cr= Z.*P_Cr;
% Fiberlerin burkulmaması için Patch'e etki edilmesi gereken
maksimum kuvvet
Wad2 = (2*10^-3)*2/(pi*R^3);
% PDMS in cam küre ile adhezyonu
```

EK-9 SÜNGER TEKERLEK DEFORMASYON MODELİ

```
%% Sünger Tekerlek Deformasyon Modellemesi %%
clear all
close all
clc
format long
Es = 6740; % Pa- Süngerin
Elastisite Modülü
WW = 0.036; % m - Wheel Width
Rm = 0.016; % m - İç Teker
Yarıçapı
Rs = 0.024; % m - (R-Rm)
REVF2 = [0 0.094 0.294 0.494 0.694 0.894 1.094 1.594 2.094 2.594
3.094]; % N - Tekerleğın uygulanan kuvvet
R = Rs+Rm; % mm - Sünger
Tekerleğın Yarıçapı

TEST = [0.01373 0.01456 0.01533 0.01665 0.01775 0.01862 0.01948
0.02011 0.02109 0.02205 0.02383 0.02558 0.02796 0.02920 0.03134
0.03791 0.04259];
REVTEST = [0 8.1825*10^-3 13.775*10^-3 18.4975*10^-3 20.3475*10^-3
22.3675*10^-3 24.4925*10^-3 28.835*10^-3 33.4125*10^-3 38.455*10^-3
42.8475*10^-3];
TESTFTA = TEST.*WW.*10^6; % mm^2 - Test Fiber
Temas Alanı
REVTESTFTA = REVTEST.*WW.*10^6;
h3 = R-sqrt(R^2-Rm^2);
AX3 = 2*Rm;
Top_A = (2*(R-h3)*Rm) - (pi*Rm^2)/2 + (4*Rm*(R-sqrt(R^2-Rm^2)))/3;
AL3 = Top_A/AX3;
AA3 = AX3*WW;
SD3 = (REVF2.*(AL3))./(Es*AA3);
TA3 = sqrt(R^2 - ((R-SD3).^2));
FTA3 = TA3.*2*WW.*10^6; % mm^2 - Teorik Fiber Temas alanı

for z=1:3017
FN(z) = (z-1)/1000;
DL(z) = (0.0003498*(FN(z)^2)+0.00131*FN(z)+6.191*10^-5);
xN(z) = sqrt(R^2 - (R-DL(z))^2);
A_t(z) = 2*xN(z)*WW*10^6;
end

plot(REVTESTFTA,REVF2,'black','LineWidth',3)
ylabel('Kuvvet (N)')
xlabel('Fiber Temas Alanı (mm^2)')
h_xlabel = get(gca,'XLabel');
set(h_xlabel,'FontSize',20);
h_ylabel = get(gca,'YLabel');
set(h_ylabel,'FontSize',20);
set(gca,'FontSize',15)
hold on
plot(A_t,FN,'red','LineWidth',3)
grid on
legend('Test Sonuçları','Uyarlama Modeli')
```

EK-10 RİJİT TEKER ADEZYON MODELİ

```
h = 10*10^-6; % m Fiber boyu
R = 40*10^-3; % m Wheel yarıçapı
a = 2.5*10^-6; % m Fiber yarıçapı
d = 5*10^-6; % m Fiberler arası boşluk
FA = pi*a^2; % m^2 Fiber kesit alanı
Ef = 550*10^3; % Pa Fiber Elastisite Modülüsü
w2 = 0.085; % J/m^2 Adhezyon Enerjisi
WW = 36*10^-3; % Teker eni
vf = 0.5; % Fiber Poisson Sabiti
Kf = 4/3*(Ef/(1-vf^2)); %Yay Sabiti Fiber
FSa = (WW)/(2*a+d); % Tekerin eninde bulunan fiber
sayısl
DSa = (2*pi*R)/(360*(2*a+d)); % Tekerin 1 derecesindeki Fiber
Sırası
GDs = round(DSa);
for k=1:360; % 1'den
50 kadar 1'er arttırarak, aşağıdaki işlemleri yap
    Slope(k) = (k-1)*0.01; %
Açıyı 0.1 derece arttırarak 5 dereceye kadar çıkar
    PFM(k) = sqrt(6*pi*a^3*Kf*w2);%*(h./(2*a)).^0.3); % Fiber
Model Adhezyon Kuvveti
    x(k) = (2*pi*R*Slope(k)/360) - (R*sin(Slope(k)*pi/180)); %
Teker üzerindeki noktanın x eksn.de gittiği yol
    y(k) = (R*(1-cos(Slope(k)*pi/180))); %
Teker üzerindeki noktanın y eksn.de gittiği yol
    L(k) = sqrt((x(k)^2)+y(k)^2); %
Teker üzerindeki noktada bulunan fiberin uzunluğu
    D_kop(k) = 1.55;
    if L(k)>h %
Fiber kendi boyunu geçtiğinde
        UZ_L(k) = L(k)-h; %
Fiberin ne kadar uzadığı hesaplanır
        FD(k) = (Ef*FA)*(UZ_L(k)/h); %
Fibere uygulanan kuvvet hesaplanır
        cx(k) = sqrt(2*R^2-(2*R^2*cos((Slope(k)*pi)/180))); %
Cx uzunluğu bulunur
        Beta(k) =
asin(cx(k)*sin((Slope(k)/2)*pi/180)/L(k))*180/pi; %Beta açısı
        bulunur
        FD_B(k) = FD(k)*sin(Beta(k)*pi/180); %
Fibere uygulanan kuvvetin sinüs bileşeni bulunur.
        Top_FD(k) = (FD_B(1)+FD_B(k))*FSa*DSa/2; %
Toplam Adhezyon Kuvveti (N)
    else
        UZ_L(k)=0; % Eğer
fiber uzamıyorsa, fiberin uzaması "0"dır
    end
end

figure()
plot(Slope,FD_B*10^3,'LineWidth',3)
hold on
plot(Slope,PFM*10^3,'r','LineWidth',3)
```

```

h_xlabel = get(gca, 'XLabel');
set(h_xlabel, 'FontSize', 15);
h_ylabel = get(gca, 'YLabel');
set(h_ylabel, 'FontSize', 15);
set(gca, 'FontSize', 15)
legend('F*(SinB)', 'Fiber Adezyon Kuvveti')
xlabel('Teker Dönme Açısı')
ylabel('Kuvvet (mN)')
axis([0 5 0 0.05])
grid on

figure
plot(Slope, Top_FD, 'r', 'LineWidth', 3)
hold on
plot(D_kop, Top_FD, 'black', 'LineWidth', 3)
h_xlabel = get(gca, 'XLabel');
set(h_xlabel, 'FontSize', 15);
h_ylabel = get(gca, 'YLabel');
set(h_ylabel, 'FontSize', 15);
set(gca, 'FontSize', 15)
legend('Toplam Adezyon Kuvveti', 'Kopma Açısı')
xlabel('Teker Dönme Açısı')
ylabel('Kuvvet (N)')
axis([0 5 0 3])
grid on

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : ERGÜL İLASLAN

Doğum Yeri : KADIKÖY

Doğum Yılı : 1986

Medeni Hali : BEKAR

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lisans: 2005-2010

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ

Lise: 2001-2004

ÖZEL ORTADOĞU KOLEJİ

Yabancı Dil: İNGİLİZCE

İş Tecrübesi: 2010 - 2012 TÜRK HENKEL KİMYA SAN. VE TİC. A.Ş.
ANKARA/TÜRKİYE

