

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

**OPTİK TEMELLİ DOKUNMATİK BİR PROTOTİP ALGILAYICININ
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

AHMET KIRLI

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. UTKU BÜYÜKŞAHİN**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK TEMELLİ DOKUNMATİK BİR PROTOTİP ALGILAYICININ
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ

Ahmet KIRLI tarafından hazırlanan tez çalışması 13.03.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Utku BÜYÜKŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Utku BÜYÜKŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Faruk YİĞİT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erturul TAÇGIN
Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Hikmet KOCABAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Cüneyt YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün, 20013-06-04-DOP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Ayrıca Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından da girişim sermayesi (TÜBİTAK 1512 - Proje no: 2130185) olarak desteklenmiştir.

Günlük hayatta kullanılan ve bizlere yardımcı olması amacıyla üretilen cihaz ve sistemler, teknolojik ilerleme ile paralel olarak gelişmektedirler. Bu gelişmelerin ortak paydaşları olarak yazılım, elektronik ve mekanik disiplinleri yadsınamaz ana faktörler olarak önem arz etmektedirler. Bahsi geçen bu disiplinlerin birlikteliğinin oluşturduğu “Mekatronik sistemler”, çalışılması ve değer verilmesi gereken ana bir çatı olarak ortaya çıkmaktadır. Son zamanlarda üzerinde ciddi çalışmalar yapılan konu başlıklarından biri de dokunma ve dokunmayı algılama teknolojisidir. Dokunma hissi insan 5 duyusundan biri olan dokuma/temasın algılanması, ölçülmesi ve değerlendirilmesi olarak tanımlanabilir. Bu tez çalışmasının amacı insan parmak ucu hassasiyetinde ve daha fazlasında ölçüm yapabilecek teknolojiyi geliştirmek, bu teknolojiyi bilimsel yöntemlerle irdelemek ve tanımlamaktır.

Beni yetiştiren ve kendimi geliştirmemde bana her zaman destek olan babama ve anneme, sevgili kardeşlerime ve aileme saygı ve sevgilerimi iletirim. Uzun süren, yorucu, yoğun bu süreçte her zaman yanımda olan kıymetli eşim Hacer Hanıma fedakârlığı ve desteği için teşekkür ederim.

Benim çocukluktan gençliğe, çevremi analogtan dijitalle geçtiği zamanlardan beri, arkadaşlık kavramımı dolduran ve mana veren, değerli dostum Dr. Dt. Emre Metin’e, bana yaptığı büyük katkılardan dolayı ve arkadaşlığı için teşekkür ederim. Bu çalışmada büyük katkıları olan, eğitim hayatımın tüm öğretmenlerine ve tez çalışmamda bana gösterdikleri hoşgörü ve değerli yardımları için Sayın Prof. Dr. Faruk YİĞİT’e, Sayın Prof. Dr. Ertuğrul TAÇGIN’a, Sayın Prof. Dr. Hikmet KOCABAŞ’a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Cüneyt YILMAZ’a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Y.T.Ü. Mekatronik Müh. Öğretim üyesi değerli tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Utku Büyükhahin’e gösterdiği destek, değerli yardımları, güveni ve teşvikleri için çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bütün ilmi çalışmalar gibi bu çalışma da eksiklik ve kusurları bünyesinde barındırmaktadır. Temennimiz Allah’ın yardımı ile çalışmamızın insanlığa hayırlı bir şekilde fayda sağlamasıdır. Gayret, çalışma ve samimiyet bizden, faydasını bol kılmak Allah’tandır.

Mart, 2015

Ahmet KIRLI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Optik Temelli Dokunma Hissi Algılayıcıları	6
1.1.2 Literatür Taramasının Sonucu	7
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez	10
BÖLÜM 2	12
İNSANDA DOKUNMA HİSSİ	12
2.1 Somatosensöri Sistem.....	13
2.2 Mekanoreseptörler	13
2.3 Teknik Tanımlamalar ve Özellikler	16
2.3.1 Geometrik Çözünürlük.....	16
2.3.2 Baskı Kuvvet/Basınç Çözünürlüğü	16
2.3.3 Çalışma / Örnekleme Hızı	17
BÖLÜM 3	18
DOKUNMA HİSSİ ALGILAYICILARI.....	18
3.1 Dokunma Hissi Algılayıcıları Tipleri	18

3.2	En Güncel Dokunma Hissi Algılayıcıları	20
3.2.1	Dirim Benzeşimsel/ Biyobenzer Sistemler	21
3.3	Endüstriyel Ürünler	22
3.4	Konunun Önemi	23
3.5	Güncel Teknolojinin Sınırları	23
3.6	Dokunma Hissi Algılayıcıları Hakkında Sonuç ve Bu Çalışmanın Motivasyonu	24
BÖLÜM 4		26
DOKUNMA HİSSİ ALGILAYICI SİSTEMİNİN ÇALIŞMA MANTIĞI		26
4.1	Bazı Ön Tanımlamalar	27
4.2	Sistemin Çalışma Mantığı.....	29
4.3	Sistemin Teknik Özellikleri ve Özgünlüğü	33
BÖLÜM 5		36
DENEY DÜZENEĞİ ÜRETİM ÇALIŞMALARI VE MALZEME DENEYLERİ		36
5.1	Fiber Optik Kablo Seçimi ve Deneyler	36
5.2	Kablo Haznesi ve Koyucusu - Elek Tasarımı ve Üretimi	38
5.3	Silikon Ped.....	41
5.4	Yansıtıcı Yüzey	43
5.5	Kamera ve Işık Kaynağı.....	44
5.6	Kaplama Malzemeleri	45
5.7	Prototipler	50
BÖLÜM 6		52
SİLİKON PED VE MODELLEMESİ		52
6.1	Silikon Ped Malzemesi ve Hazırlanışı	52
6.2	Deney Düzeneğinde Kullanılacak Silikon Ped	55
6.3	Deney Düzeneğinde Kullanılacak Silikon Pedin Analizi.....	56
6.4	Üretilen Silikon Pedler	56
6.5	Elastik Silikon Pedin Mekanik Özellikleri.....	57
6.6	Elastik Modül Deneyleri	58
6.7	Silikon Pedin Poisson Oranı – ν	58
6.8	Sönüm Katsayısı Deney Düzeneği	59
6.8.1	Sönüm Katsayısının Hesaplanması	60
6.9	Dokunma Hissi Algılayıcısının Silikon Pede Bağlı Özellikleri	64
BÖLÜM 7		66
DOKUNMA HİSSİ ALGILAYICISI GELİŞTİRME DÜZENEĞİ		66
7.1	Tasarım.....	66
7.2	Dokunma Hissi Algılayıcısı Geliştirme Düzeneği İmalatı	66
7.3	Sistemin Teknik Özellikleri	70
7.4	Yazılım	71
7.4.1	Matlab GUI (Grafik Ara Yüzü)	72

7.4.2	Matlab ile Görüntü Filtreleme	73
BÖLÜM 8		74
IŞIK ve YANSIMA		74
8.1	Parlaklık Değişimi Ölçümünün Çözünürlüğünün Arttırılması	74
8.1.1	Işık Deneyleri ve Deney Algoritması	76
8.1.2	Parlaklık Seviyesi- Aydınlik Düzeyi (Lüks) Dönüşümü	80
8.1.3	İdeal Çalışma Değerleri	82
8.2	Refraktif İndeks (Sönme Katsayısı)	83
8.2.1	Dalga Boyu ve Beyaz Işığın Boşluktaki Dalga Boyu	84
8.3	Işık İletimi ve Soğurulma	85
8.4	DeneySEL Olarak Silikon Ped Tercihinin Sınanması	91
8.4.1	Yansıtıcı Yüzeyin Işık Yansıtma Katsayısı	92
8.5	Aydınlik Düzeyi ile Yer Değiştirme Arasındaki İlişkinin Modellenmesi	93
BÖLÜM 9		98
SİSTEME EN UYGUN MATEMATİKSEL MODELİN SEÇİMİ		98
9.1	DeneySEL Düzenekteki Sorunlar ve Sonuçları	99
9.1.1	Fiber Optik Kablolarda Yaşanan Sorunlar	100
9.1.2	Sabit Olmayan Silikon Ped	100
9.1.3	Filtre	101
9.2	Matematik Model Seçimi ve Sistemin Tanımlanması	101
9.2.1	Yapılan Çalışmalardaki Ön Kabuller ve Deney Düzenekleri Hakkında 102	
9.2.2	Matematiksel Modellerin Doğrulanmasında Kullanılan Deney Düzenekleri Hakkında	102
9.2.2.1	Tek Eksenli Kartezyen Robot Hakkında	102
9.2.2.2	Sabit Kuvvet Uygulayabilen Deney Düzeneği Hakkında	104
9.2.2.3	Değişken Kuvvet Ve Yer Değiştirme Ölçme Deney Düzeneği Hakkında	107
9.2.3	Yük Hücresi ile Kuvvet Ölçümü	108
9.2.3.1	Yük Hücresinin Kalibrasyonu	109
9.3	Kontak Mekanizmasında Bazı Kavramlar	111
9.3.1	Uyan Kontak	111
9.3.2	Uymayan Kontak	111
9.3.3	Elastik Yarı Düzlem	112
9.3.4	Bağlı ve Bağlı Olmayan Elastik Kontak	112
9.3.5	Sıkıştırılabilirlik ve Sıkıştırılamazlık (Bulk Modülü)	112
9.3.6	Silikon Pedin Bulk Modülü ve Sıkıştırılamazlığı	112
9.3.7	Rijit Tahrik Elamanının Elastik Modülü ve Poisson Oranı - ν	113
9.4	Silikon Pedde Gerçekleşen Kontak için Kullanılabilecek Modeller Hakkında 114	
9.4.1	Kabuller	115
9.5	Boyut İndirgeme Metodu	116
9.5.1	Silindirik Kontak	117

9.5.2	Küresel Kontak.....	118
9.5.3	Hertzian Kontak Teorisi	120
9.5.4	Kontak Alanında Gerilim Dağılımı.....	121
9.6	Sönümlü Boyut İndirgeme Metodu Modeli.....	122
9.7	Viskoelastisite ve Doğrusal Viskoelastik Malzemelerin Modellenmesi..	123
9.7.1	Maxwell Modeli	125
9.7.2	Kelvin – Voigt Modeli.....	127
9.7.3	Zener (Standart Doğrusal Katı Modeli) Modeli	129
9.8	Silikon Pedin Viskoelastik Davranışı.....	130
9.9	Deney Sonuçları ile Matematiksel Modellerin Karşılaştırılması	131
9.10	Tez Çalışmasında Gerçeklenen Sisteme En Uygun Matematiksel Modelin Seçimi.....	136
9.11	En Uygun Model Tercihi Çalışması Sonucu	139
BÖLÜM 10		145
SONUÇ VE ÖNERİLER		145
10.1	Gelecek Çalışmalar	148
KAYNAKLAR.....		150
EK - A		159
MATLAB GRAFİK ARAYÜZ KODU		159
EK - B		164
ÇİZELGELER.....		164
ÖZGEÇMİŞ.....		167

SİMGE LİSTESİ

x	Pozisyon [mm]
ΔI	Işık parlaklığı değişimi [lüks]
v	Hız [mm/saniye]
t	Zaman [saniye]
F	Kuvvet [N]
P	Basınç [N/mm ²]
k_{sil}	Silikonun yay sabiti [kg/s ²]
b_{sil}	Silikonun sönüm katsayısı [kg/s ²]
E_{sil}	Silikonun elastisite modülü [N/mm ²]
ϕD_1	Tahrik elemanının çapı [mm]
ϕD_2	Ölçülen tahrik çapı [mm]
A	Tahrik oluşan bölgenin alanı [mm ²]
Δh	Yer değiştirme - Batma miktarı – deplasman [mm]
Δx	Yer değiştirme - Batma miktarı - deplasman [mm]
E_1	Silindirik tahrik elemanının elastisite modülü [N/mm ²]
E_2	Silikon pedin elastisite modülü [N/mm ²]
E^*	Efektif elastisite modülü [N/mm ²]
Δy	Her bir yay arasındaki mesafe
ν_1	Silindirik tahrik elemanının poisson oranı
ν_2	Silikon pedin poisson oranı
Δk_i	-x- yönünde her bir yayın rijitliği, yay sabiti [kg/s ²]
k	Kontağın rijitliği [kg/s ²]
n	adet
d	Tahrik elamanının yarıçapı [mm]
a	Tahrik oluşan bölgenin yarıçapı – kontak yarıçapı
R	3 Boyutlu kontaktaki küresel katı cismin yarıçapı
R_1	1 Boyutlu kontaktaki küresel katı cismin yarıçapı - kabul (Geiko & Popov

	kuralı)
r	3 Boyutlu küresel tahrik elemanının kontağı gerçekleştiren bölgesinin yarıçapı- tahrik yarıçapı
$\vec{u}_x$	Küresel tahrik elemanı ile kontak halindeki yüzeyindeki her bir noktanın yer değiştirmesi
$p(r) = -\sigma_{xx}$	Ortogonal/dikey normal stres (-x- ekseninde)
$q(y)$	Doğrusal kuvvet yoğunluğu
b	Sönüm katsayısı [kg/s]
$\vec{F}_k$	Yaydaki kuvvet [N]
$\vec{F}_b$	Damperdeki kuvvet [N]
x	Toplam yer değiştirme [mm]
x_k	Yaydaki yer değiştirme [mm]
x_b	Damperdeki yer değiştirme [mm]
$\mathcal{E}$	Birim uzama
$\mathcal{E}_b$	Damperdeki birim uzama
$\mathcal{E}_k$	Yaydaki birim uzama
k_1	Maxwell elemanı yay sabiti
k_2	Dengeleme yay sabiti
D	Silindirik tahrik elemanının çapı [mm]
Σ	Soğurma katsayısı [1/mm]
I_0	Kaynak ışık şiddeti
I_V	Kameraya gelen ışık şiddeti
n_r	Refraktif indeks

KISALTMA LİSTESİ

CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	Bilgisayar Destekli İmalat
CCD	Yüklenme İliştirilmiş Araç
cm	Santimetre
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
CNC	Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
Fps	Saniyede resim karesi
FSR	Kuvvet ölçen direnç
Full HD	1920 x 1080 piksel çözünürlük
GPa	Gigapaskal
GUI	Grafik Arayüz
Hz	Herz
kPa	Kilopaskal
LED	Işık Yayan Diyot
m	Metre
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MPa	Megapaskal
N	Newton
NASA	National Aeronautics and Space Administration
nm	Nanometre
Pa	Paskal
PCB	Baskılı Devre Kartı
PDMS	Polydimethylsiloxane
san	Saniye
VGA	Video Grafik Dizisi
webcam	Bilgisayar kamerası
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 İnsan da hissetme ve algılama	12
Şekil 2.2 Mekanoreseptörler	14
Şekil 2.3 İnsan ve makinelerde algılama blok diyagramı	15
Şekil 2.4 Geometrik çözünürlük.....	16
Şekil 4.1 Bazı ön tanımlamalar.....	28
Şekil 4.2 Optik çiftlerde yansıma	29
Şekil 4.3 Fiber kablolar ile ışık iletimi.....	30
Şekil 4.4 Fiber optik kablo ve optik çiftlerin yerleşimi.....	31
Şekil 4.5 Kamera ile analog veri ölçme	31
Şekil 4.6 Sistemde giriş ve çıkış.....	32
Şekil 4.7 Dokunma hissi sistemi genel çalışma mantığı.....	33
Şekil 4.8 Parlaklık ile deplasmanın ölçülmesi	34
Şekil 4.9 Sensörün bileşenleri	34
Şekil 4.10 Renk skalası ve seviyeler	35
Şekil 4.11 Sistemin çalışma şeması.....	35
Şekil 5.1 Pleksiglas üretim	40
Şekil 5.2 Pleksiglas dizim.....	40
Şekil 5.3 Pleksiglas elek yapısı	40
Şekil 5.4 Fiber kabloların dizimi.....	40
Şekil 5.5 Elek dizim tasarımı	41
Şekil 5.6 Kalıba silikon dökümü	42
Şekil 5.7 Silikon malzeme kabının içerisinde	42
Şekil 5.8 Silikon ped	42
Şekil 5.9 Farklı sıcaklıklarda döküm deneyleri.....	42
Şekil 5.10 Yansıtıcı yüzey	43
Şekil 5.11 Sim tozu ile boyama deneyleri.....	43
Şekil 5.12 Silikon yansıtıcı yüzey	43
Şekil 5.13 LED ışık kaynağı	44
Şekil 5.14 Homojen ışık kaynağı	44
Şekil 5.15 LED devresi.....	45
Şekil 5.16 Işık kaynağında zamanla sıcaklığın artışı.....	45
Şekil 5.17 Algılayıcının dış kaplaması	46
Şekil 5.18 Algılayıcının iç kaplaması: Aydınlatma fiber kabloları kaplama malzemesinin doldurulacağı hacim.....	46

Şekil 5.19	Farklı Bileşen Oranlarında Malzeme Karışım Deneyleri	46
Şekil 5.20	Malzeme deneyleri	47
Şekil 5.21	Polyester - erime.....	48
Şekil 5.22	Saten alçı katılaşma süreci termal deneyi	48
Şekil 5.23	Epoxy katılaşma süreci termal deneyi	48
Şekil 5.24	Polyester katılaşma süreci termal deneyi.....	48
Şekil 5.25	Termal deneylerin grafiği.....	49
Şekil 5.26	İç kaplama malzemesi: saten alçı	50
Şekil 5.27	İlk prototipler	50
Şekil 5.28	Dokunma hissi algılayıcısı deney düzeneği üretimi öncesi üretilen son prototip	51
Şekil 6.1	Silikon ped karışımın hazırlanma gereçleri: Hassas tartı, karışım haznesi ve karıştırıcılar	53
Şekil 6.2	Döküm öncesi silikon karışımın hazırlanışı: Vakumlama sistemi bir vakum pompası ile karışımdaki hapsolan havayı dışarı tahliye edilmesi	53
Şekil 6.3	Silikon ped döküm kalıpları.....	54
Şekil 6.4	a. b. c. Kalıplara dökülmüş silikon karışımı sıcaklığı kontrol edilerek fırınlanması	54
Şekil 6.5	Pedin şeffaflığı.....	55
Şekil 6.6	Pedin ışık geçirgenliği.....	55
Şekil 6.7	Tahrik ile yer değiştirme (deplasman) oluşumu	55
Şekil 6.8	Üretilen ve seçilen silikon pedler	56
Şekil 6.9	Silikon pedin yay sabiti.....	57
Şekil 6.10	Silikon pedlerin çekme deneyleri ve elastik modül değerleri.....	58
Şekil 6.11	Sönüm katsayısı hesaplama deney düzeneği	59
Şekil 6.12	Sönüm katsayısı deneyleri test uçları: farklı çaplardaki küresel başlar	60
Şekil 6.13	Sönüm katsayısı deneylerindeki nicelikler ve anlamları.....	61
Şekil 6.14	Ped 1 için sönüm katsayısı deneyi grafiği	62
Şekil 6.15	Farklı test uçları ile ped 1 için sönüm katsayısı değerleri	63
Şekil 6.16	Dokunma sensörünün geometrik ve ölçüm çözünürlüğünün hesaplanması	64
Şekil 7.1	Dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği içyapısı	67
Şekil 7.2	Algılayıcı fiber optik kablo dizimi	68
Şekil 7.3	Algılayıcı alttan görünüş.....	68
Şekil 7.4	Algılayıcı elek yapısı, kamera ve ışık kaynağı	68
Şekil 7.5	Algılayıcının 3 boyutlu tasarımı.....	69
Şekil 7.6	Algılayıcı önden görünüş.....	69
Şekil 7.7	Algılayıcı üstten görünüş.....	69
Şekil 7.8	Algılayıcı ölçüm yüzeyi	69
Şekil 7.9	Yazılım ve deney düzeneğin birlikte çalışması ile dokumayı algılama ve ölçme.....	71
Şekil 7.10	Görüntü işleme yazılımından gelen metin dosyası.....	72
Şekil 7.11	Matlab Programı ara yüzü	72
Şekil 7.12	Matlab GUI üzerinden sistemin eş zamanlı olarak çalışması.....	73
Şekil 8.1	Yer değiştirmeye bağlı parlaklık değişiminin tespiti deneyi.....	75
Şekil 8.2	Işık deneyleri grafiği	75

Şekil 8.3	Işık deneyleri deney düzeneği.....	76
Şekil 8.4	Kaynak ışık şiddetine bağlı yansıma mesafesi ile parlaklık miktarı değişiminin grafiği.....	77
Şekil 8.5	Lüks, lümen, kandela	79
Şekil 8.6	Kaynak ışık şiddetine bağlı yansıma mesafesi ile ölçülen parlaklık miktarı değişiminin grafiği.....	81
Şekil 8.7	Parlaklık ölçümün verimli olduğu aralık.....	82
Şekil 8.8	Dalga boyu	84
Şekil 8.9	Silikon pedde ışık iletimi	85
Şekil 8.10	Silikon pedin ışık soğurma katsayısını elde etme deneyleri	86
Şekil 8.11	Silikon pedin ışığı geçirme oranı	87
Şekil 8.12	Kaynak ışık şiddeti ve ped kalınlığına bağlı ideal çalışma mesafesi grafiği..	89
Şekil 8.13	Kaynak ışık şiddeti silikon pedin kalınlığı ve pedin soğurma katsayısına bağlı seçim parametresi (çözünürlüğü)	90
Şekil 8.14	Farklı kaynak ışık şiddetleri altında yer değiştirmenin (batma miktarı) 0-5 mm, 0-6 mm, 0-7 mm olduğu durumlarda ölçülen aydınlık düzeyi (yansıyan ışık şiddeti) grafiği	91
Şekil 8.15	Farklı kaynak ışık şiddeti (K.I.Ş.) ile 0 – 150 mm yer değiştirmeye bağlı aydınlık düzeyi (ölçülen ışık şiddeti) grafiği	94
Şekil 8.16	Ölçülen ışık şiddeti ile yansıma mesafesi arasındaki modelin doğrulama grafiği	95
Şekil 8.17	Işık şiddeti (aydınlık düzeyi) ile yer değiştirme modeli deneyleri.....	96
Şekil 8.18	Batma miktarı ile ışık şiddeti arasındaki modelin doğrulanması	97
Şekil 9.1	Matematik model basamakları	99
Şekil 9.2	Matematik modelleme deney düzeneği	103
Şekil 9.3	Tek eksenli kartezyen robot deney düzeneği	104
Şekil 9.4	Matematik modelin doğruluğunun sınanmasının blok diyagramı.....	104
Şekil 9.5	Sabit kuvvet uygulanabilen ve yer değiştirmenin ölçüldüğü deney düzeneğinin resmi.....	105
Şekil 9.6	Sabit kuvvet uygulanabilen ve yer değiştirmenin ölçüldüğü deney düzeneğinin 2B açıklaması	105
Şekil 9.7	Sabit kuvvet uygulanabilen ve yer değiştirmenin ölçüldüğü deney düzeneğinin serbest cisim diyagramı.....	106
Şekil 9.8	Değişken kuvvet uygulanabilen yer değiştirme ve uygulanan kuvveti ölçen deney düzeneği.....	107
Şekil 9.9	Platform tipi yük hücresi ile ölçüm	108
Şekil 9.10	Platform tipi yük hücresi silikon pede uygulanan kuvvetin ölçülmesi	108
Şekil 9.11	a. Ölçümün doğrusallığı b. Ölçümün doğrusallığı - yakınlaştırılmış görüntü	110
Şekil 9.12	Uyan kontak	111
Şekil 9.13	Uymayan kontak	112
Şekil 9.14	Küresel ve silindirik tahrik elemanlarının gerçek fotoğrafı.....	114
Şekil 9.15	Fiziksel modelin serbest cisim diyagramı.....	114
Şekil 9.16	Tahrik elemanları ve elastik yarı düzlem	115
Şekil 9.17	İki boyutlu serbest cisim diyagramı	117
Şekil 9.18	3 boyutlu silindirik kontağın tek boyuta indirgenmesi	117

Şekil 9.19	3 boyutlu küresel kontaktağın tek boyuta indirgenmesi	119
Şekil 9.20	Hertzian kontak modeli	120
Şekil 9.21	Elastik ped de gerçekleşen kontaktağın klasik model alternatifleri	122
Şekil 9.22	Doğrusal viskoelastik modeller ile sürünme ve gerilme-gevşeme eğrileri.....	124
Şekil 9.23	Maxwell modeli	125
Şekil 9.24	Kelvin - Voigt modeli	129
Şekil 9.25	Zener modeli	130
Şekil 9.26	Sabit kuvvet altında yer değiştirme deneyi	130
Şekil 9.27	Tek eksenli kartezyen robot.....	131
Şekil 9.28	Değişken kuvvet ve yer değiştirme ölçme deney düzeneği.....	132
Şekil 9.29	Silikon pedin sabit kuvvet ve sabit yer değiştirme uygulandığında davranışı	132
Şekil 9.30	Çapı 10 mm küresel tahrik elemanı ile toplam 5 mm sabit hızda yer değiştirme için matematiksel modeller ile ölçümün kıyaslanması.....	134
Şekil 9.31	Çapı 10 mm silindirik tahrik elemanı ile toplam 4 mm sabit hızda yer değiştirme için matematiksel modeller ile ölçümün kıyaslanması.....	134
Şekil 9.32	7 N sabit kuvvet uygulandığında gerçekleşen yer değiştirme bilgisinden matematiksel modeller ile hesaplanan kuvvetlerin kıyaslanması deneyi	135
Şekil 9.33	Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan birinci deney: artan yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet	137
Şekil 9.34	Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan ikinci deney: sinüzoidal yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet.....	137
Şekil 9.35	Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan üçüncü deney: artan sabit yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet	138
Şekil 9.36	Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan dördüncü deney: artan ve hızla değişen yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet.....	138
Şekil 9.37	Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan beşinci deney: yavaşça artan ve azalan yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet.....	139
Şekil 9.38	Modellerin karekök ortalama hatalarına göre normalize edilmiş doğrulukları.....	140
Şekil 9.29	Modelin basınca bağlı doğruluğu.....	143

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Mekanoreseptörlerin genel özellikleri	14
Çizelge 2.2 Mekanoreseptörlerin teknik özellikleri	17
Çizelge 4.1 Fiber optik kablo ve optik çift kıyası	30
Çizelge 5.1 Fiber optik kablo tipleri ve özellikleri	38
Çizelge 5.1 Malzeme bileşenleri	46
Çizelge 6.1 Silikon pedler ve kalınlıkları	56
Çizelge 6.2 Silikon pedlerin mekanik özellikleri	63
Çizelge 7.1 Sistemin teknik özellikleri	70
Çizelge 8.1 Işık deneyleri sonuç tablosu	83
Çizelge 8.2 Silikon pedlerin ışık geçirme karakterleri	89
Çizelge 8.3 Yansıtıcı yüzeyin ışık yansıtma katsayısı deneyleri ile teorik hesabın karşılaştırılması	93
Çizelge 9.1 Her bir deneyde uygulanan maksimum basınç değerleri ve model doğruluğu	142
Çizelge B.1 Yük hücresi kalibrasyon katsayısı	164
Çizelge B.2 Verimlilik ve seçim değerleri	165
Çizelge B.3 Silikon ped üretim deneyleri	166

**OPTİK TEMELLİ DOKUNMATİK BİR PROTOTİP ALGILAYICININ
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

Ahmet KIRLI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Utku BÜYÜKŞAHİN

Bilimin ve bunun pratikteki yansıması olan teknolojinin ilerlemesi ve hayata dair unsurlara her alandaki etkisinin artması ile birlikte “akıllı makineler” kavram ve terminolojisinin ortaya çıktığı gözlenmektedir. Günlük hayatta kullanılan ve bizlere yardımcı olması amacıyla üretilen cihaz ve sistemler, teknolojik ilerleme ile paralel olarak gelişmektedirler. Bu gelişmelerin ortak paydaşları olarak yazılım, elektronik ve mekanik disiplinleri yadsınamaz ana faktörler olarak önem arz etmektedirler. Bahsi geçen bu disiplinlerin birlikteliğinin oluşturduğu “Mekatronik sistemler” çalışılması ve değer verilmesi gereken ana bir çatı olarak ortaya çıkmaktadır. Mekatronik sistemlerde sensör teknolojisi öne çıkan konulardan biridir. Bu açıklamaya iyi bir örnek olan ve son zamanlarda üzerinde ciddi çalışmalar yapılan konu başlıklarından biri de dokunma ve dokunmayı algılama teknolojisidir. Dokunma insan 5 duyusundan biri olan dokuma/temasın algılanması, ölçülmesi ve değerlendirilmesi olarak tanımlanabilir. Dokunma hissi teknolojisinin örnek aldığı insan parmak ucunda 1 santimetrekarede 241 adet algılayıcı (reseptör) olduğu kabul edilmektedir. Bu durum insana, parmak ucunda 1 mm çözünürlükte ve 1.4 milisaniye hızında ölçüm yapabilme yetisi kazandırmaktadır.

Günümüzdeki uygulamalarda dokunmayı algılama, insan derisinde gerçekleştiği gibi belirli bir alandaki teması, kuvveti ve basıncı ölçmek ve değerlendirmek olarak tanımlanabilir. Dokunma algılayıcısı aslında bir arada ve birlikte çalışan bir grup algılayıcı hücre/birimden (reseptörlerden) oluşmaktadır. Son zamanlarda bu tip

algılayıcılar üzerindeki çalışmalar artmakla beraber, halen, bir insandaki dokunma duyusuna benzer nitelikteki ve nicelikteki bir yapıya özellikle birim alandaki reseptör sayısı açısından ulaşamamıştır. Bu tezin en önemli özelliği ve literatür ile çalışma sahasına en büyük katkısı; santimetrekaresindeki algılama hücresi (reseptör) adetinin milyon mertebesine arttırabilecek bir tasarımı (WO 2014011126 A1) kullanıyor olmasıdır. Bu katkının devamı olarak ikinci bir müstesna özellik ise, milyonlar âdetince reseptörden gelen verinin toplanması ve işlenmesi için kolay uygulanabilir bir metot geliştirilmesidir. Bu tezde, tez danışmanı Dr. Utku Büyükşahin'in 'Cihaz Ve Robotlara Çok Noktalı, Yüksek Hassasiyetli Dokunma Hissi Sağlayan Modül' (WO 2014011126 A1) isimli patentinin ana fikri temel olarak kullanılmıştır. Bu temel kullanılarak tasarlanıp üretilen bir prototip dokunma hissi algılayıcısı üzerinde tasarım araştırmaları, analizler, geliştirmeler, imalat ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan tez çalışması ile amaçlanan ve bu çalışmayı patent çalışmasından farklı kılan en önemli katkı, bahsi geçen patent tasarımı kullanılarak üretilen bir dokunma hissi algılayıcısında, kullanılacak malzemelerin özellikleri ile ölçüm arasındaki ilişkinin kurulması ve istenilen ölçüm niteliğini sağlamak için en uygun malzeme özelliğinin belirlenmesinin sağlanmasıdır.

Dokunma hissi algılayıcıları, yer değiştirme (deplasman), kuvvet, basınç, girinti, ağırlık, sıcaklık, titreşim, temas geometrisi gibi çeşitli mekanik özelliklerden birinin veya birkaçının ölçümünü yapmakta ve otomasyon, robotik, medikal ve uzay teknolojileri alanlarında kullanılmaktadırlar. İnsanlarda dokunma duyusu çok hassas ve gelişmiş olmasına rağmen günümüz teknolojisinde dokunma algılayıcıları bazı bakımlardan (özellikle geometrik çözünürlük) iptidai ve duyarsızdırlar.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada, temas/ölçüm yüzeyinde, dış uyarıya bağlı olarak oluşan yer değiştirme (batma miktarı) ve kuvvet ölçümü yapılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan tasarım, temelde, ölçüm yüzeyindeki temasa bağlı deformasyonun yansıyan ışık yoğunluğunu değiştirmesini ölçmektedir. Bu çalışmada hem geometrik çözünürlük hem de yapısal olarak insan parmak ucu hedef alınmıştır. İnsan parmak ucu dokusuna benzer, elastik ve şeffaf bir yapı, silikon malzeme kullanılarak elde edilmiştir. Silikon ped insanlardaki sinir sisteminin iletme benzer bir şekilde ışık taşıyan fiber kablolar ile donatılarak yüksek çözünürlüklü ve hassas bir dokunma algılayıcısına dönüştürülmüştür. Silikon ped üzerinde yapılan deneysel ve teorik çalışmalar neticesinde üretilen sistem için en uygun bir matematiksel model seçilmiştir. Bu modelin girişi fiber optik kablolar ile taşınan temas yüzeyinden yansıyan ışık ışınlarının yoğunluk/parlaklık miktarı, çıkışı ise ölçüm yüzeyindeki yer değiştirme ve kuvvet haritasıdır.

Bu çalışmanın amacı insan parmak ucu hassasiyetinde ve daha fazlasında ölçüm yapabilecek bir teknoloji kullanan bir protitipi gerçekleştirmek ve geliştirmek, bu teknolojiyi bilimsel yöntemlerle irdelemek ve tanımlamaktır.

Anahtar Kelimeler: Dokunma hissi sensörleri, yapay deri, biobenzer, yüksek konumsal çözünürlük, fiber optik, görüntü işleme, silikon malzemeler

**REALIZATION AND DEVELOPMENT OF AN OPTIC BASED PROTOTYPE
TACTILE SENSOR**

Ahmet KIRLI

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Dr. Utku BÜYÜKŞAHİN

Due to the advancements in science and technology, practical use of machinery in daily life gained a greater role as the time passed leading the invention of so called “smart machines”. Since then the development of these smart machines are still in progress parallel to the latest technological advancements. Software, electronics and mechanics are three fundamental components of these developments. Mechatronics is the main roof that gathers and coordinates these factors. Sensor technology is one of the main and important topics of mechatronic systems. Recently there has been an increased interest on tactile sensing. Tactile sensing is one of the Five Senses of Human Nature. It is estimated that the density of low threshold mechanoreceptive units that are all individual tactile sensor cells at the fingertip is approximately 241 units per centimeter square. Human fingertips have the sensitivity of 1 mm spatial resolution with 1.4 millisecond speed.

Tactile sensing usually refers to a transducer that is sensitive to touch, force, or pressure like human skin. A tactile-sensing array can be considered as a coordinated group of touch sensing receptors. Recently, there has been an increased interest in tactile sensors, yet, the desired level, which is the resolution of human’s tactile sense could not have been reached in terms of number of receptors at a certain area. The unique and the most important contribution of this dissertation to the related field of study and literature are to use a patented design (WO 2014011126 A1) in order to increase the number of sensory receptors per centimeter square up to millions. The

second contribution is the development of a method that can acquire millions of data at low costs. This dissertation uses the main idea of a patented design by Dr. Utku Buyuksahin (advisor of the thesis) named 'Multi point, high sensitive tactile sensing module for robots and devices', (WO 2014011126 A1). A prototype design is made and realized where this patent is taken as a basis and accordingly further research, production, analysis, development and experiments are done on this fundamental approach. The main goal and the unique outcome of this dissertation which also separates this work from the patent is to describe the relation that is between the measurements of the sensor with the materials used within when this patented design is manufactured. One can select the materials due to the intended features of the measurements.

Tactile sensors usually measure one or more of the following mechanical features of an external stimulus; displacement, force, pressure, indentation, mass, temperature, vibration, geometry. Tactile sensors are employed for automation, robotic, medical and space technology applications. The desired level for tactile sensing in robotics and devices compared to the humans tactile sensing ability still could not be reached in terms of receptors per measurement area.

In this dissertation a new and novel tactile sensor system is developed that measures the displacement, force and pressure that arise from an external stimulus. The design illustrated in this study proposes using change of intensity of the reflected light due to the deformation on the contact surface of the elastic medium. In this novel sensory system that is presented in this study is designed to achieve the consistency and spatial resolution of human fingertip. An elastic and transparent structure that has similar consistency with humans' fingertip tissue is produced by using elastomeric silicone substance. A high resolution and highly sensitive tactile sensor system is manufactured by fiber optic cables carrying light embedded within the silicone pad, that mimics the transmission of the human nervous system. The best mathematical model is selected due to the experimental and theoretical approaches on the silicone pad. The intensity/brightness data of the reflected light beams that are carried by fiber optic cables enter this sequent mathematical model as the input, and step by step, displacement and force map of the contact surface is evaluated as the output.

The purpose of this dissertation is to realize and develop a prototype that has the same tactile spatial resolution of a human fingertip and to examine and define this technology scientifically.

Keywords: Tactile sensors, artificial skin, biomimetic, high spatial resolution, fiber optics, image processing, silicone substances

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde otomasyon sistemlerinin temel olarak bir insan vücudun işleme sistemini örnek aldığı söylenebilir. İnsan yaşamında 5 duyunun önemi çok büyüktür. Kişi bu duyulardan aldığı bilgileri beyinde işler ve kaslar vasıtasıyla tepki verir. Aradaki iletişimi ise sinir sistemi ile gerçekleştirir. Bu biyolojik olayın mekanik olarak analojisi, duyu organları: algılayıcılar, sinir sistemi: veri iletim sistemi, beyin: yazılım/denetleyici ve kaslar: motorlar (eyleyiciler) olarak düşünülebilir.

Örneğin bir insan, sıcaklığını ölçmek istediği bir objeye, dokunur. Dokunduğunda maddenin sıcaklığı insan derisindeki reseptörler tarafından algılanır. Bu bilgi beyne gönderilir. Bilgi burada değerlendirilir. Değerlendirme sonrası kaslara yapılması gereken komut olarak gönderilir ve kaslar da eylemi gerçekleştirir.

Aynı örnek bir robot kol için düşünülür ise temas yüzeyindeki sıcaklık, sıcaklık ölçen bir algılayıcı ile algılanır. Bu veri toplama kartı üzerinden denetleyiciye ulaşır. Veri burada bir yazılım yardımıyla değerlendirilir ve gereken tepki için mekanizmayı kontrol eden motorlara komut gönderilir.

Aslına bakılırsa dokunma hissi bilgisi diye kastedilen olgu; medikal ve mühendislik açısından aynı değildir. Tıbbi bir terim olarak dokunma hissi (tactile sensing) çok daha kapsamlı ve geniştir. Mühendislerin dokunma hissi algılama olarak değerlendirdikleri ise insandaki dokunma algılayıcılarının bir bölümünü oluşturan mekanoreseptörlerin yaptığı algılama kadarıdır. Sonuç olarak mühendislik terminolojisindeki dokunma hissi tıbbi terminolojidekinin bir alt kümesidir. Tezin devamından dokuma hissi olarak

adlandırılan ölçme; mekanoreseptörlerin yaptığı kadarı olarak düşünülmelidir. Bu da batma miktarı, kuvvet, basınç ve bazen sıcaklık ölçümü ile sınırlıdır.

İnsan vücudunun en büyük sensör/duyu sistemi vücudu saran derisidir. İnsan vücudunu saran deri içerisinde bulunan ve dokunsal (tactile) bilgileri ölçen bu sistemin adı somatosensori sistemidir [1-4].

Ölçüm yapılacak kontak yüzeyi ile çevresinde, herhangi bir etkileşim olduğu durumlar için ölçüm yapılacağında somatosensori sistemi dokunma reseptörleri kullanılır. Bu reseptörlerin amacı ölçüm yapılan alana etkiyen kuvvetleri ve bu kuvvetlerin konumlarının algılanması, ölçülmesi ve ilk ön değerlendirmenin yapılmasıdır. Kısaca dokunma algılayıcıları ölçüm yüzeyindeki kuvvet dağılımının haritasını çıkarırlar [5-7].

Her biri ayrı bir algılama hücresi olan hassas mekanik reseptörlerin (mechanoreceptors) insan parmak ucunda santimetre karede 241 adet olduğu tahmin edilmektedir. Aynı reseptörlerin avuç içindeki âdeti ise santimetre karede 58'dir [8, 9]. Aslında bu açıktır, zira insan parmak ucu avuç içinden daha hassastır.

İnsan dokunuşu referans alındığında, algılamada parmak ucunun hassasiyetine günümüz teknolojisindeki dokunma algılayıcı sistemler özellikle geometrik çözünürlük noktasında ulaşmakta başarısızdırlar [10-17].

Geometrik çözünürlükten kastedilen birim alandaki algılayıcı birim/hücre yani reseptör sayısıdır. Bu sayının ortalama bir insanın parmak ucunda santimetre karede 241 olduğunu tekrar hatırlatırız. Günümüzdeki en gelişmiş insansı robotlarda bile teması algılamak ve kontrol için dokunma hissi algılayıcıları yerine robotik yapının mesnet ve/veya bağlantı noktalarına yerleştirilen çok pahalı kuvvet/tork sensörleri kullanılmaktadır [18-24].

Dokunma hissi algılayıcıları genel olarak yakınlık, deplasman, kuvvet, basınç, girinti, ağırlık, sıcaklık, titreşim, temas geometrisi gibi çeşitli mekanik özelliklerden birinin veya birkaçının ölçümünü yapmaktadırlar. Dokunma algılayıcıları otomasyon, robotik, medikal ve uzay teknolojileri alanlarında kullanılmaktadırlar [25]. Her ne kadar insanlarda dokunma duyusu çok mühim ve kritik ise de, maalesef insansı robotlar bu tip algılamada iptidai ve vasıfsızdırlar.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada, temas yüzeyindeki dış uyarıya bağlı olarak oluşan yer değiştirme (deplasman), kuvvet ve basınç ölçümü yapılmaktadır. Bu yüzden dokunma hissi algılayıcı özellikleri olarak yer değiştirme (deplasman), kuvvet ve basınç ölçümü üzerinde yoğunlaşmıştır. Literatür araştırmasında da bu tip algılayıcılara önem verilmiştir. Metnin kalanında dokunma algılayıcıları olarak anlatılmak istenen temas yüzeyindeki mekanik uyarıya bağlı oluşan yer değiştirme (deplasman), kuvvet ve basıncı ölçen sistemlerdir.

NASA tarafından uzay istasyonlarında çalışması için geliştirilen insan ebat ve özelliklerinde ve beş parmaklı bir eli olan robot, hassas dokunma kontrolü için kuvvet/tork sensörleri kullanmaktadır [26 -27]. Daha sonra NASA, Interlink Electronics firması tarafından geliştirilen dokunmaya duyarlı bir eldiven kullanmaya karar vermiştir. Burada hedef insansı robotun tornavida yardımıyla bir civatayı yerine takip sökebilmesidir [28]. ‘Robonaut glove’ isimli bu yeni dokunma algılayıcı sistem; kuvvet algılayıcı direnç (FSR) tekniği kullanarak bir el için toplam 33 farklı noktadan ölçüm yapabilmektedir [29]. Dokunma hissi algılayıcısı kullanan günümüz teknolojisinin en iyi ve seçkin insansı robotlarından biri olmasına rağmen el kontrolü için toplam sadece 33 farklı noktadan ölçüm yapmaktadır. Unutulmamalıdır ki insan parmak ucunda mekanik tahrikleri ölçmek için sadece 1 santimetre kare alanda yaklaşık olarak 241 adet dokunma algılayıcı reseptör bulunmaktadır.

Bu alanda yapılan öncü ve iddialı çalışmalardan biri olan Sarcos Inc firması tarafından MIT ve Utah üniversiteleri ile birlikte geliştirilen ve ticari bir ürün olan ‘Utah/MIT Dextrous Hand’ isimli çalışmada 25 serbestlik dereceli bir el üretilmiş ve kontrol için tendon noktalarına yerleştirilen yük hücreleri (strain gauge) kullanılmıştır [30].

Dokunmayı algılamak için ölçme tekniğinde temel bir ayrım vardır. Bu ayrım ölçmenin nerede yapıldığı ile açıklanabilir. Mesela NASA’nın ilk robotunda ölçme bağlantı noktalarından yani temas yüzeyinden uzakta kuvvet/tork sensörleri ile yapılmıştır. “Utah/MIT Dextrous Hand” çalışmasında da ölçme yine bağlantı noktalarında yük hücreleri ile yapılmıştır.

Dokunmayı dokunmanın gerçekleştiği yerden değil de, başka bir yerden ölçüp çeşitli hesaplamalar ile temas yüzeyindeki değerlere ulaşmayı sağlayan bu tip yöntemler, tezin bu kısmından sonra dokunma hissi algılayıcılarının dışında kabul edilecektir.

Tezin devamında dokunmayı algılayan algılayıcılar olarak kast edilen dokunmaya ait mekanik özelliklerin, dokumanın gerçekleştiği yüzeyde ölçen sistemler olarak kabul edilmiştir. Bu konuya insanda dokunma hissi başlığı altında insan fizyolojisinden analogi yapılarak tekrar değinilecektir.

Dokunmayı algılayan sistemler ana olarak 7 farklı teknik altında toplanabilirler. Bunlar; uyarıya bağlı olarak direnç değiştiren sistemler, uyarıya bağlı olarak kapasite değiştiren sistemler, uyarı ile birlikte potansiyel fark yani elektrik üreten piezoelektrik sistemler, manyetik, ultrasonik ve tünel efekti tekniği temelinde çalışan sistemler ve son olarak da optik sistemlerdir.

Tez kapsamında üretilen ve üzerinde araştırma yapılan sistem, optik temelli bir sistemdir. Optik temelli dokunma hissi algılayıcıları ile ilgili ilerleyen bölümlerde daha detaylı bilgiler verilecektir. Dokunma hissi algılayıcıları teknolojisinde en çok dirençli, kapasitif ve piezoelektrik yapılardaki sistemler üzerinde çalışılmaktadır. Mesela günümüzde çokça kullanılan dokunmatik ekrana sahip cep telefonları genellikle kapasitif, bazılarında ise rezistif teknoloji kullanmaktadırlar.

Mütahrik elektrotlar kullanarak kapasite değişime bağlı olarak dokunmayı ölçen bir sistem geliştiren [31] kullandığı elektrotların boyutlarından dolayı 2.77 mm geometrik çözünürlüğe sahip 50 Hz frekansında çalışan dokunma hissine sahip hassas bir robotik el geliştirmiştir. Komşuluk ilişkisine dayanan ve ortalama değerleri kullanan bir matematik model kullanarak ölçümün geometrik çözünürlüğü 1 mm mertebesine çıkarılmıştır. Bir başka kapasitif temelli çalışmada [32] içinde basınca duyarlı birimlerin yerleştirildiği yapay bir deri üretilmiştir. Modüler olan bu yapay deri esnekliği sayesinde düzgün olmayan yüzeylere de uygulanabilmektedir. 3 cm uzunluğunda kenarlardan oluşan üçgenlerden oluşan kafes sistemi ile sınırlı sayıdaki ölçme birimleri üzerinden dokunma algılama yapılmaktadır. [33] yine kapasitif çalışan polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer yapıda 1 mm geometrik çözünürlüğe sahip modüler bir algılayıcı geliştirmiştir. Kapasite değişimi kuralları ile çalışan basit, ucuz ve sağlam bir yapay deri,

dokunmayı ölçen sekizgen şeklindeki ince bakır berilyum plakalar ile [34] tarafından yapılmıştır. Yapısında akışkan kullanan kapasitif dokunma hissi algılayıcıları da mevcuttur [35].

Kapasitif teknolojisinden sonra en çok tercih edilen teknolojiler ise piezoelektrik ve dirençli malzemelerdir [36]. Piezoelektrik malzemeler üzerlerine uygulanan kuvvet ile doğru orantılı olarak bir potansiyel fark yani voltaj üretirler, Piezoelektrik özelliği, (özellikle kristaller ve belirli kristaller; kemik gibi) bazı malzemelere uygulanan mekanik basınç sonucunda, malzemenin elektrik alan ya da elektrik potansiyel değiştirme yeteneğidir [37-38]. Yapılan literatür çalışmasında piezo malzemelerin daha çok direnç varyasyonu olan piezo dirençli, yani uygulanan kuvvet ile direncin değiştiği malzemeler formunda kullanıldığı gözlemlenmiştir [39 - 40]. Bir piezodirençli malzeme üzerinde uygulanan basınç sonrası kristal yapısında bozulma olur. Dolayısıyla, dokunma hissi algılayıcısında bulunan piezodirençlerin öz dirençlerinde değişimler meydana gelir.

[41] FSR (force sensing resistors) yani kuvvete bağlı direnç değişimi teknolojisini kullanarak bir çalışma sunmuşlardır. Yine benzer bir teknoloji ile 300 mikron geometrik çözünürlüğü olan bir çalışma yapılmıştır [42]. Farklı bir çalışmada hem yüksek çözünürlükte hem de 40 Hz çalışma frekansında tasarlanan dokunma hissi algılayıcısını, protez robotik kol üzerinde kullanmışlardır. [43].

Dokunma hissi algılayıcısının esnek olması önem arz etmektedir, zira bu tip algılayıcıların ölçüm yapması istene bir robot kol düşünülürse, algılayıcının düz olmayan bir yapıyı sarması gerekecektir [36, 39]. Bu noktadan yaklaşarak piyasada ve literatürdeki esnek yapıya haiz dokunma hissi algılayıcıları incelenmiştir.

PCR Co. Ltd. firması tarafından geliştirilen üründe matris halinde dizili elektrotları iletken kauçuk ile kaplayan [44] deri benzeri elastik bir sensör tasarlamıştır. Eğri yüzeylere de uyum sağlaması için esnek devre kartı (PCB) kullanılmıştır. [45] benzer bir çalışmada elektrotlar yerine kablolar kullanılarak 3 boyutlu objeleri sarabilecek yapıda esnek ve ince bir katman halinde bir ürün gerçekleştirmiştir. Yine benzer bir çalışmada silikon ped yapısı içerisine elektrotlar yerleştirilmiştir [46].

Otonom insansı robotlarda kullanılmak üzere tasarlanan esnek yapıdaki bir diğer algılayıcıda direnç teknolojisi kullanılmış ve 6 mm geometrik çözünürlük elde edilmiştir

[47]. [48] yaptığı çalışmada yüksek çözünürlükle kuvvet ve bu kuvvetin konumunu ölçen bir sistem geliştirmiştir.

1.1.1 Optik Temelli Dokunma Hissi Algılayıcıları

Dokunma hissi algılayıcılarının büyük çoğunluğu; birlikte ve beraber çalışan ve dışarıdan uygulanan uyarıya karşı elektriksel yük, direnç veya potansiyel değiştiren alt birim/hücrelerden oluşmaktadır. Bu tezde ortaya atılan tasarım yukarıda bahsedilenlerin dışında optik temelli bir sistemdir. Bu tasarımın önemli ve öne çıkan özellikleri, yüksek geometrik çözünürlükte olması, çok noktalı ölçme yapabilmesi, çevresel bozucu etkilere karşı duyarsız olması, ucuz olması ve esnek yapıda olmasıdır.

Yapılan tasarımda temel olarak bir ışık kaynağı ve bir kamera kullanılmıştır. Çalışmalarında kamera ve ışık kaynağı kullanan makaleler literatürde bulunmaktadır. Bu bölümde özellikle literatürdeki benzer çalışmalar yani optik temelli dokunma hissi algılayıcıları irdelenmiş ve tez kapsamında geliştirilen sistem ile farkları ortaya konulmuştur. Genel olarak optik temelli dokunma algılayıcıları ya bu tezdeki gibi ışık parlaklık değişimi ile yada görüntü işleme ile şekil değişikliği üzerinden ölçüm yapmaktadır.

[49] yaptığı çalışmada eksenel ve yanal kuvvetleri ölçmek için optik frekans yönlendiricisi tekniğini kullanarak 3 eksenli bir dokunma hissi algılayıcısı geliştirmiştir. 27 mm çapındaki akrilik bir kubbe üzerine yerleştirilen silikon yapı üzerinden kuvvet bilgisi etkinin gri tonlamalı eşdeğerinin ölçülmesi ile hesaplanmaktadır. Fakat kullanılan silikon yapı 2 mm geometrik çözünürlüğe sahip olduğundan teze konu olan tasarıma göre düşük çözünürlüktedir. Optik temelli başka bir çalışmada sadece dik kuvvetler, sisteme yerleştirilen ince küçük çubukların yer değişiminin minik bir CMS VGA kamera algılayıcısı ile tespit edilerek ölçülmektedir [50 - 51].

[52-53] yaptıkları çalışmada bu tezdeki gibi elastik ve şeffaf bir yapıda olan dokunma algılayıcılarında işaretçiler ve renkli kamera ile kuvvet vektörlerinin ve dağılımını algılayan bir tasarım geliştirmişlerdir. Kuvvet dağılımı, dışarıdan uygulanan tahrik ile işaretçilerin yer değişmesi ile ölçülmekte ve hesaplanmaktadır. Membran jel kullanan benzer bir çalışmada bir kamera ve ışık kaynağı kullanılarak tahrik sonrası oluşan

deformasyon görüntü işleme ile ölçülmektedir [54]. Yüzeyde oluşan geometri değişimi ile dokunma bilgilerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Teze konu olan tasarıma çok benzer özelliklere sahip olsa da bu çalışmada dokunma bilgisine şekilsel değişiklik üzerinden ulaşılmaktadır. Teze konu olan tasarımda ışık yoğunluğu değişimi kullanılarak yüzeydeki deformasyon bilgisi ölçülmektedir. Bu farkın önemi teze konu olan tasarımda ışık kapalı çevrim olarak sistem içinde dönmektedir. Dolayısıyla görüntü işleme için çok ciddi bir bozucu olan çevresel ışık, sisteme girmemektedir.

Çok ince, esnek ve şeffaf bir tabaka halinde üretilen algılayıcı yansıyan ışık şiddeti üzerinden 0 - 3 N aralığında 16 Hz hızında ölçme yapabilmektedir [55]. Tasarlanan sistem 27 ayrı noktadan ölçme yapabilmektedir.

Yatay olarak konumlandırılmış fiber optik kablonun üzerine uygulanan kuvvet ile kablodan geçen ışığa etki üzerinden algılama yapan bir tasarım ile [56-57] tek noktalı ölçme yapmayı başarmıştır.

Yine fiber optik kablolar ile ışık taşınan bir sistemde ölçüm yüzeyine uygulanan tahrik sonrası elastik malzemenin opasitesi değişimi üzerinde kuvvet ışık parlaklığı değeri üzerinden ölçülmektedir [58].

Prizmatik tip fiber optik kablo kullanan bir diğer çalışmada fiber kablolar yatay olarak konumlandırılmıştır. Prizmatik fiber kablonun sonu 45 derece ile kesik olduğunda yatay gelen ışık ışının yüzeye dik olarak ulaşmakta ve geri yansımaktadır. Birbirine 7 mm mesafede yerleştirilen fiber kabloları ışık gönderilmiş ve yansıyan ışık ölçülmüştür [59].

Elastik bir ped, ışık kaynağı fiber kablo ve bir kamera ve fototransistor kullanan benzer çalışmalar mevcuttur. Her bir çalışmada bir şekilde ölçüm yüzeyine ışık gönderilmiş ve yansıyan ışık parlaklığı ölçülmüştür [60 - 62].

1.1.2 Literatür Taramasının Sonucu

Literatür taraması ve piyasa araştırması göstermiştir ki son dönemdeki çalışmalar dokunma hissi algılayıcılarının esnek ve kararlı olması üzerinde yoğunlaşmıştır. Geliştirilen sistemler robotik cihazlarda uygulanmakta ve kuvvet kontrolü için geri besleme olarak kullanılmaktadırlar. Daha iyi bir geri besleme dolayısıyla daha iyi bir kontrol için ölçüm çözünürlüğü önemlidir. Burada bahsedilen ölçülen değerin adım

aralığı olan çözünürlük değil, ölçüm yapılan noktalar, ya da hücreler arası mesafe olan geometrik çözünürlüktür. Ortalama bir insan parmak ucunda 1 mm olan geometrik çözünürlük kapasitif ve piezo malzemeler ile sağlanmasına rağmen optik temelli algılayıcılarda bu değerlere fiziksel olarak ulaşılammıştır. Matematiksel araçlar kullanılarak çeşitli algoritmalar ile kestirimler yapılarak geometrik çözünürlüğün artırılma yoluna gidilmiştir.

Temel olarak optik algılayıcılar ışığın gönderilmesi ve yansıyan ışığın ölçülmesi ile çalışan sistemler olarak tanımlanabilir. Günümüz teknolojisinde ışığı alan ve veren çiftler olan optik çiftler 1 - 5 mm çap ebatlarındadır. Buda geometrik çözünürlük açısından optik temelli dokunma hissi algılayıcılar için bir dezavantajdır.

Optik temelli algılayıcılarının önemli bir avantajı kararlılığıdır. Işık çevresel manyetik, elektriksel bozulmalara karşı duyarsızdır. Aktif bir sensör olmasına rağmen sadece aydınlatma için enerji tükettiğinden enerji verimliliği LED gibi ürünler kullanılarak yükseltilebilmektedir.

Algılayıcı tasarımıda önemli bir parametrede şartlandırıcı diye adlandırılan, algılayıcıdan gelen bilginin veri toplama kartına anlaşılabilir olarak aktarılmasını sağlayan elektriksel ara birimlerdir. Özellikle piezo malzemeler için bu şartlandırıcılar olmazsa olmaz pahalı ürünleridir. Dokunma algılayıcılarında her bir hücreden (reseptörden) gelen veri işlenmeli ve bilgisayara aktarılmalıdır. Bu da günümüzde teknolojiyi kısıtlayan ana faktörlerden biridir. Örneğin yine insan üzerinden düşünülecek olursak ortalama bir insanın parmak ucunda santimetre karede 241 adet algılayıcı hücre (reseptör), yani reseptör bulunmaktadır. 241 adet analog verinin eş zamanlı olarak işlenmesi ve aktarılması zor ve maliyetli bir iştir. Her bir algılama noktası için bir ön işleme yani şartlandırıcı ve veri toplama yani bir analog giriş portuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Tez kapsamında üretilen ve geliştirilen optik temelli dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği (prototipi), insan parmak ucu geometrik çözünürlüğünde, ucuz ve basit bir teknik ile veri işleyen bir sistemdir.

1.2 Tezin Amacı

Şu ana kadar yapılan insansı robotların çoğunda dokunma hissi, kinestetik algılama (temas noktasından uzakta) ile yani mekanik bağlantı noktalarından yapılan ölçümler ve hesaplamalar ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalarda mekanik yapının içine yerleştirilen kuvvet algılayıcıları ile kontak noktasındaki kuvvetin büyüklüğü ölçülmeye çalışılmaktadır.

Yapılan literatür taramasında yeni bir çalışma alanı olan kütanoz algılama (temas yüzeyinden) sistemleri, üzerinde çalışmalar yapılmasına değer olduğu sonucuna varılmıştır. Bundan sonra “dokunma hissi algılama” diye belirtilen terim, “kütanoz”, yani deriye ait algılama sistemidir.

Belirli bir temas alanındaki kontak parametrelerinin tanımlanması ve ölçülmesi ile bu bilginin işlenmesi dokunma hissi, bu bilgiyi ölçen ve işleyen sistem ise dokunma veya temas algılayıcısı olarak tanımlanmaktadır.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda insan parmak ucundaki ölçümler sadece nitelik olarak hedeflenmiştir. İnsanda deri içindeki farklı amaçlardaki reseptörler, çeşitli algılayıcılar ile taklit edilmekte fakat deri içindeki bu reseptörlerin âdetine ulaşamamaktadır. Dolayısıyla yapay deri veya yapay parmak ucu tasarımında geometrik ölçüm çözünürlüğü çözülmesi gereken önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Yapılan bu çalışmada dokunma hissi, yani basınç ve kuvvet ölçümü insan parmak ucu hassasiyetinde ölçülebilmektedir.

Bu çalışmada insan parmak ucu hassasiyetinde ve daha fazlasında ölçüm yapabilecek bir teknoloji (WO 2014011126 A1) kullanılarak tasarlanıp, üretilen bir prototip (dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği) dokunma hissi algılayıcısı üzerinde tasarım araştırmaları, analizler, geliştirmeler, imalat ve deneyler geliştirilmiş, bu teknoloji, bilimsel yöntemlerle irdelenerek analiz ve model seçimi çalışmaları ile tanımlanmıştır.

Bu doktora tezinin amacı çok noktalı algılama yapabilen, yeni ve ileri teknoloji bir dokunma hissi algılayıcısı için araştırma yapmak, bir geliştirme düzeneği tasarlamak ve

retmek, tasarımı geliştirmek, analiz ve matematiksel model seçimi ęalıřmaları yapmaktır.

Yapılan tez ęalıřması ile amaçlanan ve bu ęalıřmayı patent ęalıřmasından farklı kılan en önemli katkı; istenilen ęznrlkte ve istenilen geometrik boyutlarda bir dokunma hissi algılayıcısında kullanılacak silikon pedin, ışık kaynağının ve yansıtıcı yüzeyin özelliklerine, elek yapısına, fiber optik kablo ęapı ve âdetine bu tez yardımıyla karar verilebilmesidir.

Bu ęalıřmanın bir diğer önemli ęıktısı da teze konu olan optik tasarım ile farklı özelliklerde yeni bir algılayıcı üretildiğinde, üretimde kullanılan yeni malzemelerin özellikleri, bu tez ęalıřması ile elde edilen matematiksel ifadelerde yerine konularak kuvvet lęmnn yapılabilmesidir.

Bu ęalıřmanın literatüre en önemli katkısı şeffaf ve elastik olan silikon pedin mekanik özelliklerinin ve kaynak ışık şiddetinin, dokunma hissi algılayıcısına etkilerinin ortaya konulması ve bu etkilerin nasıl kontrol edileceğinin açıklanmasıdır [63 - 64].

1.3 Hipotez

Doktora tezi kapsamında, 10x10 mm’lik bir alana 1 milyon adetten fazla algılayıcı yerleştirilebilen, optik temelli tasarım ile ęznrlę 0.01 mm’nin altına 300 TL gibi bir maliyet ile indirebilmeyi mümkün kılan PT 2012/08054 başvuru numaralı ‘‘‘Cihaz Ve Robotlara ok Noktalı, Yüksek Hassasiyetli Dokunma Hissi Sağlayan Modül’ (WO 2014011126 A1) isimli patentin ana fikri temel olarak kullanılarak, üzerinde ęalıřmalar yapılmıştır [65 - 67]. Tez ęalıřmasının amacı ve bu ęalıřmayı patent ęalıřmasından ayıran yn kısaca; herhangi bir lęm niteliğindeki bir algılayıcının, hangi özelliklerdeki malzemelerin nasıl kullanılarak retilbileceğine ışık tutmasıdır, [63 - 64].

Bu ęalıřmada, yukarıda adı geçen patent tasarımı kullanılarak insan parmak ucu hassasiyetinde bir dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği (prototip) retilmiş ve bu üretilen yapının analizleri yapılarak sistem için en uygun matematiksel modelin seçimi üzerinde durulmuştur.

Tez kapsamında dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği ile birlikte birçok prototip te üretilmiştir. Algılayıcıda kullanılabilecek malzemeler üzerinde araştırmalar yapılmış ve bu araştırmaların sonucunda malzeme seçimleri yapılmıştır. Üretilen deney düzeneği modüler bir yapıda olduğundan kullanılacak malzeme için denemeler yapılmaya imkân tanımaktadır. Elde edilen yapının matematiksel modeli üzerinde çalışmalar yapılmış ve deneysel veriler ve matematiksel yöntemler yardımıyla gerekli matematik modeller ortaya çıkarılmış veya seçilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonrasında, tasarımın yapısı gereği ışığın ölçüm yüzeyine gönderilip yansıyan ışığın parlaklık miktarının ölçülerek, temas yüzeyinde oluşan yer değiştirme (batma miktarını) hesaplamaktadır.

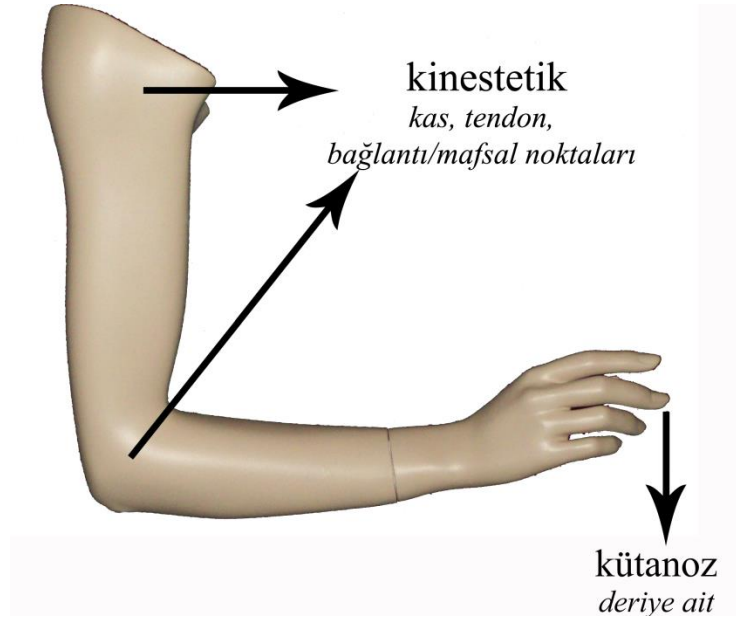
Kamera ile gözlenen ölçüm yüzeyinde dış tahrik ile oluşan deformasyon, yüzeyden yansıyan ışık şiddetinde nispi olarak bir değişmeye sebep olmaktadır. Ölçüm yüzeyinde, uygulanan tahrik ile oluşan yer değiştirme (batma miktarı) optik olarak bir kamera ve görüntü işleme programı ile ölçülüp değerlendirildikten sonra matematiksel modeller yardımıyla hesaplanmaktadır. Daha sonra hesaplanan yer değiştirme bilgisinden yer değiştirme - kuvvet matematiksel modeli yardımıyla kuvvet bilgisine ulaşılmaktadır.

İNSANDA DOKUNMA HİSSİ

İnsanlarda dokunma; kütanoz (deriye ait) ve kinestetik (devin duyumsal) olmak üzere 2 şekilde gerçekleşir. Kütanoz sistem deri içindeki algılayıcılardan (reseptörlerden) hissetme gerçekleştirir. Kinestetik sistem kas, tendon ve bağlantı noktalarındaki algılayıcılar ile hissetme gerçekleştirir, Şekil 2.1.

Sonuç olarak bir uyarının algılanması iki başlıkta kategorize edilebilir.

- Kütanoz: Dış kaynaklı Dokunma Hissi
- Kinestetik: İç Kaynaklı Dokunma Hissi



Şekil 2.1 İnsanda hissetme ve algılama

Algılayıcının konumu temel alındığında;

- Dış Kaynaklı Dokunma Algılayıcıları: Kontak noktasında ya da yakınlarında bulunmaktadır. (Kütanoz Sistem: Deri)
- İç Kaynaklı Dokunma Algılayıcıları: İnsansı robotlarda mekanik yapının içine yerleştirilen kuvvet sensörleri ile kontak noktasındaki kuvvetin büyüklüğü ölçülmeye çalışılmaktadır. (Kinestetik Sistem: Kas, Tendon ve Bağlantı Noktaları).

İnsansı robotlar kinestetik algılamada insanlardan daha gelişmiş olmalarına rağmen kütanoz algılama üzerinde çalışmalar henüz yenidir ve son zamanlarda gelişmeye başlamıştır. Hassas olarak bir objeyi tutma, bırakma gibi görevler için robotik sistemlerin kütanoz algılama/geri beslemeye ihtiyaçları vardır. Bu doktora çalışmasında kütanoz algılama/geri besleme yapan bir sensör gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Metnin devamında dokunma hissi algılama diye atıf yapılan kütanoz algılamadır.

2.1 Somatosensöri Sistem

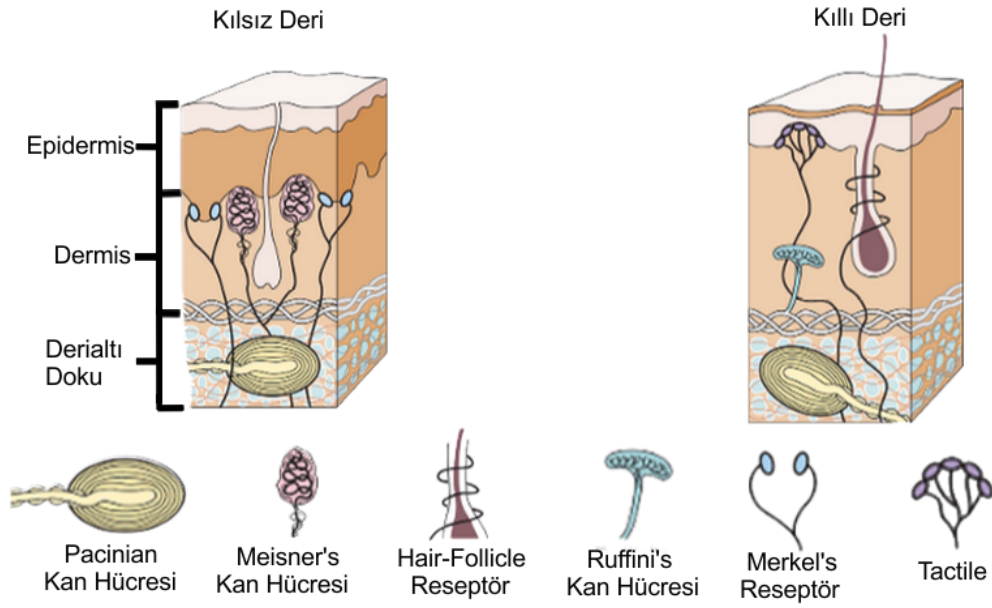
Somatosensöri sistem mekanoreseptörler, ağrı reseptörleri (nosiseptör) ve termoreseptörlerden oluşan, dokunma, konum, acı ve sıcaklık bilgisini ölçen ve değerlendiren sistemdir. Somatosensöri bilgi merkezi sinir sistemine 2 farklı yol ile iletilir. Anterolateral sistem acı, sıcaklık ve hafif dokunma bilgisini iletirken, dorsal kolon ise hassas dokunma, basınç, yer değiştirme (batma miktarı), titreşim ve konum (propriyosepsiyon) bilgisini taşır.

2.2 Mekanoreseptörler

İnsan parmak ucunda, baskı/titreşim, sıcaklık, acı, vb. algılayan farklı farklı reseptörler vardır. Yetişkin bir insan parmak ucunda 1 santimetre karede yaklaşık **2500** adet reseptör bulunmaktadır. Dokunmaya bağlı hissi sağlayan, bilgiyi üreten ve işleyen reseptörler mekanoreseptörlerdir, Şekil 2.2, [1 - 9].

Fiziksel bir dış uyarıyı (batma, baskı, titreşim) insan derisi içinde farklı derinliklerde ihtiva ettiği mekanoreseptörler vasıtası ile algırlar, Çizelge 2.1. Yetişkin bir insanda bu reseptörlerin sayısı parmak ucunda santimetrekareye 241, avuç içinde ise 58 olarak tahmin edilmektedir, [1 - 9].

Mekanoreseptörler



Şekil 2.2 Mekanoreseptörler

Bir obje ile temas halinde iken insan derisi bu objenin yüzeyi kılavuzluğunda şekillenir ve parmak ucundaki kılsız derideki bu deformasyon pacinian ve meissner kan hücresi ile merkel's reseptörlerini tetikler.

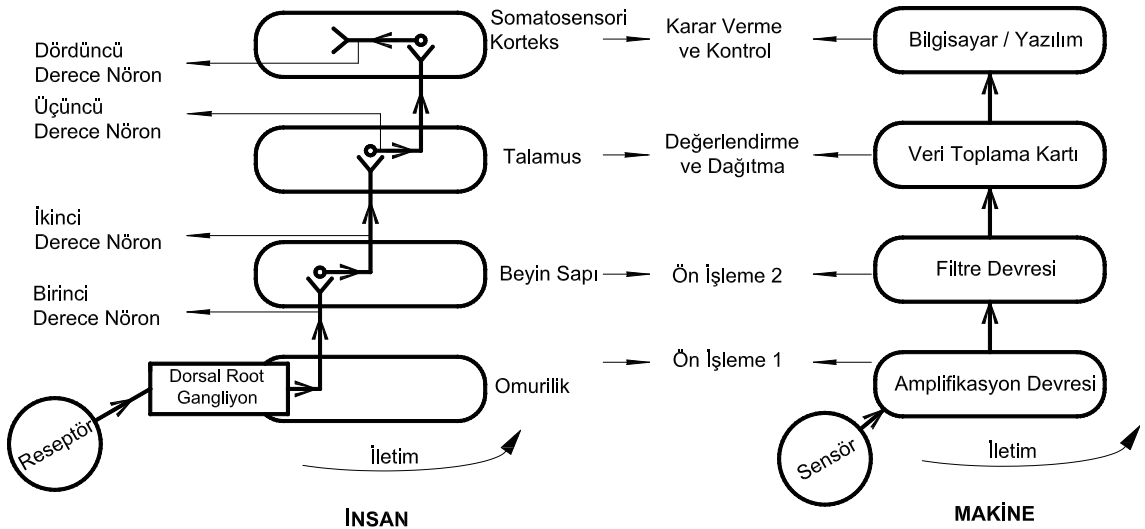
Meissner's Kan Hücresi noktasal olarak dokunmayı algılar. Giriş devam eder ise yani dokunmaya devam edilir ise oluşacak basınç veya titreşimi **Pacinian Kan Hücresi**, yer değiştirmeyi (batmayı) de **Merkel's Reseptör** algılar ve ölçer.

Çizelge 2.1 Mekanoreseptörlerin genel özellikleri

Mekanoreseptör Tipi	Konumu	Algılama Hızı	Algılama Türü
Pacinian Kan Hücresi	Derialtı	Çok Hızlı	Basınç, Titreşim
Meissner's Kan Hücresi	Kılsız Deri	Hızlı	Noktasal Dokunma
Hair Follicles	Kıllı Deri	Hızlı	Hız, Hareket Yönü

Mekanoreseptör Tipi	Konumu	Algılama Hızı	Algılama Türü
Ruffini's Kan Hücresi	Kıllı Deri	Yavaş	Gerilme, Dönme
Merkel's Reseptör	Kılsız Deri	Yavaş	Dikey Deplasman
Tactile Diskler	Kıllı Deri	Yavaş	Dikey Deplasman

Belli bir eşik noktasını geçince uyarılan reseptörler ise uyarılma ile orantılı olarak elektriksel gerilim (voltaj) üretirler. Bu bilgi (voltaj), sinir sisteminde işlenerek bir tepkiye dönüşür. Bazı reseptörlerde üretilen voltaj sinir sistemine ulaşmadan önce bazı ön işlemlerden de geçirilmektedir, Şekil 2.3. Bu süreç analogik olarak endüstriyel sistemlere benzetilmektedir.



Şekil 2.3 İnsan ve makinelerde algılama blok diyagramı

Sonuç olarak tasarlanan sistem, noktasal olarak dokunmayı ve konumu (*meissner's kan hücresi*), girişin devam etmesi halinde batmayı (*merkel's reseptör*), bu bilgiden de yapılacak hesaplamalar ile baskının basınç/kuvvet (*pacinian kan hücresi*) bilgisini ölçmektedir.

İnsanda 3 farklı reseptör ile yapılan algılama ve ölçme tasarlanan yapay deri benzeri sensör ile tek başına yapılmaktadır.

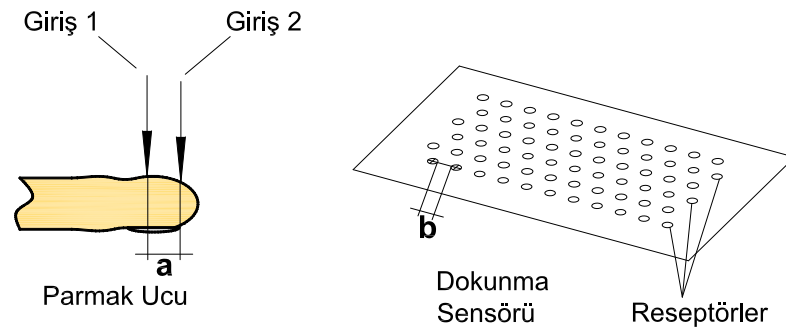
2.3 Teknik Tanımlamalar ve Özellikler

Metnin devamında sıkça kullanılacak terminolojinin bir kısmı ile ilgili açıklama yapılmasına, konunun kavranmasına adına ihtiyaç duyulmuştur.

2.3.1 Geometrik Çözünürlük

Geometrik çözünürlük parmak ucuna uygulanan 2 farklı girişin (tahrikin) insan tarafından 2 farklı giriş olarak algılanabilmesi için aralarında olması gereken minimum mesafedir. Eğer reseptörler arasındaki mesafe 2 ayrı giriş arasındaki mesafeden küçük ise $b < a$ bu durumda 2 ayrı giriş tek bir giriş olarak algılanacaktır, Şekil 2.4.

Bir insan farklı iki noktadan uyarıldığını anlaması için bu iki nokta arasındaki mesafe vücudun bölgesine göre değişiklik gösterir. Mesela parmak ucu avuç içine göre 7 kat daha hassastır. İnsan parmak ucunda geometrik çözünürlük 1 mm olarak tahmin edilmektedir, [1 - 9]. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada üretilen dokunma sensörü içinde geometrik çözünürlük 1 mm olarak hedeflenmiştir.



Şekil 2.4 Geometrik çözünürlük

2.3.2 Baskı Kuvvet/Basınç Çözünürlüğü

Sisteme etkiyen kuvvet ve basıncın algılanma eşik değerine baskı kuvvet/basınç çözünürlüğüdür. Burada sistemi hep bası yönünde zorlayacak girişler olacağı kabul edilmiştir. Ortalama yaşta bir erkek için ortalama baskı eşik değeri 0.005 N (0.55 grf) kuvvet ve 10 kPa basınçtır. Bu bilgi pacinian kan hücresi ile ölçülmektedir, [1 - 9].

2.3.3 Çalışma / Örnekleme Hızı

Birbirini takip eden 2 girişi, 2 ayrı giriş olarak algılama için arada geçmesi gereken zaman çalışma / örnekleme hızıdır. İnsan parmak ucunda müteakip 2 farklı girişi ayırt etmek için arada geçmesi gereken zaman 30 – 50 ms'dir. Yani parmak ucunda hassas dokunma algılama için çalışma hızı 20-30 Hz'dir.

Sonuç olarak insanda dokunmayı algılayan ve yapılan tasarımda taklit edilecek 3 mekanoreseptörün teknik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Mekanoreseptörlerin teknik özellikleri

Mekanoreseptör Tipi	Algılama Türü	Algılama Hızı	Çözünürlük
Meissner's Kan Hücresi	Noktasal Dokunma	50 Hz	1 mm
Merkel's Reseptör	Dikey Deplasman	5 – 15 Hz	1 mikron
Pacinian Kan Hücresi	Basınç, Titreşim	250 Hz	~ 10 kPa

DOKUNMA HİSSİ ALGILAYICILARI

Belirli bir temas alanındaki kontak parametrelerinin tanımlanması ve ölçülmesi ile bu bilginin işlenmesine dokunma veya temas algılama (“tactile sensing”) denir.

Dokunma veya temas algılayıcısı ise, dokunma ile bir objenin belirlenen bir özelliğini ölçebilen sistem veya cihazlara denir.

Bu çalışmada, temas yüzeyindeki dış uyarıya bağlı olarak oluşan yer değiştirme (batma miktarı) ölçümü yapılmakta ve yüzeydeki kuvvet haritası matematiksel araçlar yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu yüzden dokunma hissi algılayıcısı olarak kastedilen yer değiştirme ve kuvvet ölçümü yapan algılayıcılar olarak düşünülmelidir.

3.1 Dokunma Hissi Algılayıcıları Tipleri

Dokunma hissi algılayıcısı başlığı altında

- Dirençli
- Tünel Efektli
- Kapasitif
- Ultrasonik
- Manyetik
- Piezoelektrik
- Optik

olmak üzere 7 farklı teknik temelinde araştırma ve geliştirmeler yapılmaktadır.

Dokunmayı algılayan sistemler temel olarak bu 7 farklı teknik altında toplanabilirler. Bunlar yukarıda madde madde olarak verilen; uyarıya bağı olarak direnç değıştiren sistemler, uyarıya bağı olarak kapasite değıştiren sistemler, uyarı ile birlikte potansiyel fark yani elektrik üreten piezoelektrik sistemler, metal parçacıkları yerleştirilmiş elastomer yapının tünel efekti sayesinde baskıyla birlikte direnç değıştiren sistemler, manyetik ve ultrasonik tekniğı temelinde çalışan sistemler ve son olarak da optik sistemlerdir. Optik olmayan sistemler için literatürde bir araştırma yapılmış ve bu tip algılayıcıların genel özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Bu tip algılayıcılar ile optik temelli algılayıcılar arasında genel bir kıyaslama yapılmış ve optik temelli algılayıcıların üstünlükleri ve eksiklikleri tanımlanmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen tasarımda literatürde tanımlı olan optik tabanlı algılayıcıların problemlerinin giderilmesi üzerine geliştirmeler ve iyileştirilmeler üzerinde çalışılmıştır.

Genel olarak dokunma hissi algılayıcıları, birlikte ve beraber çalışan alt birimlerden ("taxel") oluşmaktadır. Bu alt birimlerin her biri ayrı ayrı ölçüm yapan birer algılayıcı olmasına rağmen dokunma hissi algılayıcıları bu alt birimlerin birlikte oluşturduğu toplam siteme verilen addır. Bu alt birimlere, hücre, eleman, reseptör vb. olarak tanımlanabilir. Örneğin medikal terminolojide bu alt birimlerin hepsine reseptör hücresi sistemin kendisine de somatosensori sistem denilmektedir.

Bu alt birimler sistemin tipine bağı olarak dışarıdan uygulanan uyarıya karşı elektriksel yük, direnç veya potansiyel değıştirmektedir. Bu tezde üzerinde çalışılan tasarım yukarıda bahsedilenlerin dışında optik temelli bir sistemdir.

Temel olarak optik tabanlı algılayıcılar; ışığın gönderilmesi ve yansıyan ışığı ölçen veya ölçüm yüzeyini kamera ile gözletip görüntüdeki geometri/işaretçi üzerinden algılama yapan sistemler olarak 2 farklı şekilde tanımlanabilir. Bu çalışmadaki tasarım ilk tip, yani ışık gönderip yansıyan ışık şiddeti üzerinden algılama yapan bir sistemdir. Günümüz teknolojisinde ışığı alan ve veren çiftler olan optik çiftler 5 mm çap ebatlarındadır. Bu da geometrik çözünürlük açısından optik temelli dokunma hissi algılayıcılar için bir dezavantajdır.

Optik temelli algılayıcılarının önemli bir avantajı kararlılığıdır. Işık çevresel manyetik, elektriksel bozuculara karşı duyarsızdır. Aktif bir sensör olmasına rağmen sadece

aydınlatma için enerji tükettiğinden enerji verimliliği LED gibi ürünler kullanılarak yükseltilebilir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen sistemin önemli ve öne çıkan özellikleri, yüksek geometrik çözünürlükte olması, çok noktalı ölçme yapabilmesi, çevresel bozucu etkilere karşı duyarsız olması, ucuz olması ve esnek yapıda olmasıdır.

Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada; insan parmak ucu hassasiyetinde (ve daha iyisi) ölçüm yapabilecek bir teknoloji kullanılarak bir dokunma hissi algılayıcı geliştirme düzeneği üretilmiştir. Şu ana kadar yapılan çalışmalarda üretilen optik temelli dokunma hissi ("optoelectronics tactile sensing") algılayıcılarının, manyetik alana karşı dirençli, esnek, kararlı ve hızlı olduğu fakat geometrik boyutlarının büyük olduğu tespit edilmiştir. Bahsi geçen tüm avantajların yanında bu boyutsal dezavantaj ölçümlerdeki geometrik çözünürlüğü olumsuz olarak etkilemektedir.

3.2 En Güncel Dokunma Hissi Algılayıcıları

Gerçekleştirilen yeni bir çalışmada [68] insansı robotlar için geliştirdikleri yapay deriyi kapasite değişimi teknolojisini kullandıkları algılayıcılar ile donatmışlardır. Tasarladıkları sistemi esnek bir elektrik devre üzerine kurmuşlardır. 12 adet kapasite tabanlı alt hücreden oluşan sistemdeki 12 adet veri seri haberleşme ile geri besleme imkânı tanınmaktadır. 351 mm²'lik bir alanda 12 noktadan ölçüm yapılmaktadır. İnsansı robot ile çevrenin etkileşimi kontak noktalarındaki basınç bilgisinin ölçülmesi ile sağlanması düşünülmüştür.

Pressure Profile Systems, Inc. (PPS) isimli firma "RoboTouch" adı ile geliştirdiği dokunma algılayıcı sistemini "PR2" ve "Twenty-One" robotlarında kullanmaktadır. "Twenty-One" isimli ticari olarak ta satılan robotlarının elinde 241 noktadan, kol ve üst gövdesinde ise 134 noktadan basınç ölçümü yapan kapasite temelli dokunma hissi algılayıcısı sistemini kullanmaktadır [69 - 70]. Bu algılayıcı kapasite değişimi tekniğini kullanarak yüksek hassasiyette basınç ölçmektedir. Bu robot birçok vaka çalışmasında kullanılmaktadır. Örneğin bu robotun parmağında 22 adet ölçme noktası bulunmaktadır.

2014 yılında yapılan çalışmalarda; işaretçi kullanan bir çalışmada elastik malzemenin üzerine yerleştirilen nokta ve çizgi şeklindeki farklı işaretçiler ile çeşitli kestirim metotları kullanılarak ölçüm yüzeyindeki kuvvet bilgisine 1 mm geometrik çözünürlük ile ulaşılmaya çalışılmıştır [71]. Bu çalışmada işaretçiler arası mesafe üzerinden ölçümler yapılmıştır.

[72] ise çalışmasında bir basınç algılayıcısı ile optik bir algılayıcıyı birleştirerek hassas bir şekilde robot el kontrolü gerçekleştirmiştir. Optik algılayıcı sadece kayma bilgisi sağlamaktadır. Kuvvet ölçümü ise basınç sensörleri ile gerçekleştirilmektedir.

Birbirine 90 derece açı ile birleştirilmiş iki parça aynaya gönderilen ışık ve yansıyan ışığın ölçüldüğü yeni bir sistemde aynaların üst kısmı ölçüm yüzeyidir. Yüzeye uygulanan tahrik sonrası aynalar konum değiştirmekte ve yansıyan ışığın açısı değişmektedir [73].

3.2.1 Dirim Benzeşimsel/ Biyobenzer Sistemler

Elektronik akıllı deri ya da biyonik deri, günümüzde yapay zekânın bir uygulaması olarak insanlarla direk ilişkisi olan yeni bir konu ve kavram olarak ortaya çıkmaktadır. Genel olarak dirim benzeşimsel/biyobenzer ("biomimetic") sistemler adı altında toplanan bu teknolojide biyouyumlu sistemlerin canlı ile etkileşimi söz konusudur. Bu teknolojinin uygulaması insandaki gibi dokunmayı algılayabilen alt sistemlere sahip esnek yapıda yapay deri ile geniş alanlarda ölçme yapabilmektir. Kısacası insan derisini birebir taklit eden bir yapı üzerinde yapılan çalışmalar bu konunun alanına girmektedir. Bu tip bir sistemin protezlerde uygulanması düşünülmektedir.

Sağlık hizmetleri ve hastanın izlenmesi amacıyla geliştiren sistemde 1 µm inceliğinde polimer yapıda levhalar üretmişlerdir. Levhaya yerleştirdikleri esnek ve kırılmaz elektronik devreler ile organik bir dokunma hissi algılayıcısı geliştirmişlerdir [74].

[75] Piezotronik transistörleri birleştirerek yaptığı devre ile 3 boyutlu büyük alanları kaplayabilecek ve kuvvet ve basınç ölçebilecek aktif bir doku geliştirmişlerdir. Elektrotların arasının membran bir kauçuk malzeme ile doldurarak sandviç yapıda basınca duyarlı bir algılayıcı geliştirilmiştir [76]. İnce kauçuk katmanlı bu yeni tasarım ile ölçüm yüzeyine konan bir sineğin bile ağırlığı ölçülebilmektedir.

Akademik çalışmaların yanında ticari ürünlere dönüşmüş dokunma hissi algılayıcıları da piyasada mevcuttur. Devam eden bölümde özellikle piyasada satılan ticari ürünler araştırılmıştır.

3.3 Endüstriyel Ürünler

Parmak ucu formundaki BioTAC™ isimli ürün kontak yüzeyindeki kuvvetleri, mikro titreşimleri ve sıcaklık dağılımını ölçebilmektedir [77 - 80]. Bu algılayıcı, kuvvet, titreşim ve sıcaklık ölçüm olmak üzere 3 farklı niceliği ölçebilecek komple bir sistemdir. Bu yapı insandaki mekanoreseptör yapısına benzer olarak kütanoz bilginin tamamını ölçebilecek özelliktedir. Ticari ürün olarak satılan parmak ucu şeklindeki algılayıcının içinde termistör, basınç algılayıcısı ve empedans ölçen elektrotlar mevcuttur. Üretici, tasarladıkları sistemin özellikle titreşim ölçümünde insan kapasitesinin üstünde olduğunu iddia etmektedir. İlgili alanda en iyi bilinen ürünlerden biri olan bu algılayıcıda her bir parmak içerisinde 19 adet elektrot ile ölçüm yapıldığından 3 mm geometrik çözünürlüğe ulaşılabilmektedir. Bu sistem tez kapsamında gerçekleştirilen sistem ile kıyaslandığında geometrik çözünürlük açısından zayıf kalmaktadır.

Optik ve direnç temelli dokunma hissi algılayıcıları konusunda yapılan 2 önemli ticari ürüne dönüşmüş/patent bekleyen çalışmadan birinde silikon temelli optoelektronik teknoloji kullanılarak 18x18 mm'lik bir alana yerleştirilmiş 25 adet hücre ile 4.8 mm çözünürlük sağlanmıştır [81 - 84].

Direnç değişimi tekniğini kullanan diğer çalışmada 80x80 mm'lik bir alana 256 adet hücre ile 5 mm geometrik çözünürlük ile yüksek hızda basınç ölçümü yapılmaktadır [85].

Tez tasarımı benzer bir diğer çalışmada KINOTEX™ isimli bir ticari üründür. Bu ürün ışığı fiber optik kablolar ile ölçüm yüzeyinde taşımakta ve yansıyan ışığı kameraya taşımaktadır. Uygulanan kuvvete bağlı elastik yapıdaki sıkışma ile yansıyan ışık dinamiği değişmektedir. Işık parlaklığındaki değişimi ile uygulanan kuvvet ölçülmektedir [86 - 88]. Bu çalışmalarda ışık parlaklık değeri elektriksel bir sinyale dönüştürülmektedir. Bu da her bir ölçüm noktasın için 1 adet analog sinyal okuyucusu ihtiyacı demektir.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda insan parmak ucundaki ölçümler sadece nitelik olarak hedeflenmiştir. İnsanda deri içindeki farklı amaçlardaki reseptörler, çeşitli algılayıcılar ile taklit edilmekte fakat deri içindeki bu reseptörlerin âdetine ulaşamamaktadır. Dolayısıyla yapay deri veya yapay parmak ucu tasarımında geometrik ölçüm çözünürlüğü çözülmesi gereken önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmanın tasarımında kontak konumu, yani dokunmanın gerçekleştiği nokta, yer değiştirme (batma miktarı), ve uygulanan kuvvetin ölçümü insan parmak ucu hassasiyetinde ölçülebilmektedir.

3.4 Konunun Önemi

Robotik ve endüstri için yapılan tüm çalışmaların dışında konuyla ilgili doktorlar ve mühendisler duyu kaybı yaşayanlar için bir çözüm geliştirmek üzere birlikte çalışmaktadırlar [89 - 90].

Bu konu üzerinde gerçekleştirilen araştırma ve geliştirmeler, ihtimal ki, gelecekte, duyu hissi kaybolmuş dokulara yapay olarak kaybolan hissi geri getirecek bir çözüm sunacak bir ürün ortaya çıkaracaktır.

Bu açıdan yaklaşırsa biyomimetik sistemlerin geliştirilmesi üzerine yapılacak çalışmalar insanlık için önem arz etmektedir.

3.5 Güncel Teknolojinin Sınırları

Eski robotik sistem ve cihazların çoğunda kütanoz algılama yerine kinestetik algılama yapılmaktadır. Bu da kuvvet/tork algılayıcıları ile sağlanmaktadır. Güncel sistemlerin çoğu ise çevre ile etkileşimi dokunma hissi algılayıcıları ile ölçmektedir.

Dokunma hissi algılayıcıları incelendiğinde hem akademik hem de ticari ürünler için aşağıdaki genel problemler ortaya çıkmaktadır. Problem olarak görülen maddeler insandaki dokunma ile kıyaslanmanın sonucudur.

- Birim alandaki algılayıcı eleman, nokta veya hücre azlığı
- Düşük geometrik çözünürlük
- Analog girişlerin değerlendirilmesinde ki yüksek maliyet

- Hantal yapı
- Esnek ve eğilebilir olmama
- Analog ölçümdeki gürültü etkisi

Tez kapsamında gerçekleştirilen sistem yukarıda bahsi geçen problemleri çözebilecek bir tasarıma sahiptir. İlerleyen bölümlerde bunun nasıl olacağı tasarım üzerinden anlatılacaktır.

3.6 Dokunma Hissi Algılayıcıları Hakkında Sonuç ve Bu Çalışmanın Motivasyonu

Konuyla ilgili yapılan literatür ve piyasa araştırmasında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Dokunma Hissi Algılayıcıları ("Tactile Sensors"), üzerinde çalışılmaya değer güncel ve gelişmekte olan bir konudur.
- Şu anki kullanım alanları yüksek teknolojiye robotik uygulamaları, medikal, uzay otomasyon ve otomotiv uygulamalarıdır.
- Optik Tabanlı dokunma algılayıcısı teknolojisinin en büyük problemi geometrik ebatı yani hantallığıdır.
- Ticari olarak geliştirilen ürünlerin birçoğu patent beklemektedirler. Yani bu konu, endüstriyel olarak doymamış bir çalışma sahasıdır.

Temel olarak optik algılayıcılar ışığın gönderilmesi ve yansıyan ışığın ölçülmesi ile çalışan sistemler olarak tanımlanabilir. Günümüz teknolojisinde ışığı alan ve veren çiftler olan optik çiftler 1 - 5 mm çapında olduğundan geometrik çözünürlük açısından bu bir dezavantajdır.

Optik temelli algılayıcılarının önemli bir avantajı kararlılığıdır. Işık çevresel manyetik, elektriksel bozulmalara karşı duyarsızdır. Dokunma algılayıcılarında her bir hücreden (reseptörden) gelen veri işlenmeli ve bilgisayara aktarılmalıdır. Her bir algılama noktası (reseptör) için bir ön işleme yani şartlandırıcı ve veri toplama yani bir analog giriş portuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Tez kapsamında üretilen ve geliştirilen optik temelli dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği (prototipi), insan parmak ucu geometrik çözünürlüğünde olup her bir analog veri basit ve düşük maliyetli bir teknik ile işlenmektedir.

Bu doktora tezinin amacı çok noktalı algılama yapabilen, yeni ve ileri teknoloji bir dokunma hissi algılayıcısı için araştırma yapmak, bir geliştirme düzeneği tasarlamak ve üretmek, tasarımı geliştirmek, analiz ve matematiksel model seçimi çalışmaları yapmaktır.

Gerçekleştirilen ve geliştirilen sistemin mekaniği ve çalışma mantığı devam eden bölümde açıklanmıştır.

DOKUNMA HİSSİ ALGILAYICI SİSTEMİNİN ÇALIŞMA MANTIĞI

Belirli bir temas alanındaki kontak parametrelerinin tanımlanması ve ölçülmesi ile bu bilginin işlenmesine dokunma veya temas algılama (“tactile sensing”) denir. Dokunma veya temas algılayıcısı ise, dokunma ile bir objenin belirlenen bir özelliğini ölçebilen sistem veya cihazlara denir.

Tez çalışmasına konu olan sistemin tasarımında, dokunma hissinin ölçülmesi için (insandaki sinirler yerine) fiber optik kablolar kullanılması düşünülmüştür. Günümüz teknolojisinde çapı 9 mikronluk fiber optik kablolar mevcuttur. 1 santimetre karelik bir alana daireler arasındaki boşluklar hesaba katılmaz ise 1.572.327 adet fiber optik kablo yani reseptör sığmaktadır.

Bu reseptörler ışık ileten ve ışık okuyan çiftlerdir. Bu çiftler, temas yüzeyindeki batma miktarı (Δh) ve bu batmanın yüzey üzerindeki geometrik yerini (x,y), temas yüzeyine ışık gönderip, yansıyan ışığın parlaklığını ölçerek tespit etmektedirler. Bu tasarımda, reseptörleri okuyan ve değerlendiren algılayıcılar, temas yüzeyine, yani ölçümün yapılacağı yere konulmadan, ışık iletimini fiber optik kablolar ile sağlanmaktadır. Böylelikle, ölçüm yüzeyindeki reseptör sayısı benzer çalışmalara göre on binlerce kat arttırılabilmektedir.

Günümüz teknolojisinde çapı 9 mikronluk fiber optik kablolar bulunabilmekte iken bir çift ışık alıcı/vericinin çapı 5 mm’ler düzeyindedir. Tez çalışmasında üretilen sistemde bu alıcı/verici çiftler yerine bir adet ışık kaynağı ile bir adet kamera ve ışığı taşımak amaçlı aydınlatma fiber optik kabloları kullanılmıştır.

Birim alana yerleştirilebilecek reseptör sayısı tez kapsamında üretilen sitemin en birinci özgülüğü olarak ortaya çıkmaktadır. Tasarımın ikinci özgülüğü ise; hedeflenen sayıda (teorik olarak 1 milyon üzeri) veriyi toplamak ve bilgisayara aktarmak için kamera algılayıcısının (CMOS, CCD, vs.) kullanılmış olmasıdır. Böylelikle 1920x1080 piksel çözünürlükte (Full HD) bir kamera ile 2.073.600 adet (piksel) analog veri, kullanılacak kamera hızına (standart 30 Hz – 100 Hz) bağılı olarak ölçülebilmektedir. Standart veri toplama kartları ile milyonlar adedinde analog verinin toplanması pratik olarak imkânsıza yakındır. Tasarımın üçüncü özgülüğü de her bir reseptörden gelen bilginin ayrı ayrı işlenmesidir, yani çok noktalı ölçüm özelliğı vardır.

Bu tez kapasında gerçekleştirilen çalışmada, temas/ölçüm yüzeyindeki dış uyarıya bağılı olarak oluşan deformasyon, yansıyan ışık şiddetini değıştirmektedir. Yer değıştirme (batma miktarı) ışık şiddetindeki değışim ile hesaplanmakta ve yüzeydeki kuvvet haritası matematiksel araçlar yardımıyla elde edilmiştir. Bu yüzden dokunma hissi algılayıcısı olarak kast edilen yer değıştirme (batma miktarı) ve kuvvet ölçümü yapan bir sistemdir.

4.1 Bazı Ön Tanımlamalar

Metnin kalanında tasarımın anlatımında kullanılacak terimler ve unsurlar kısaca şekil 4.1'teki gibidir. Tasarım bu tanımlanan terminoloji üzerinden açıklanmıştır.

Tanımlamalarda ve isimlendirmede şekil 2.3'teki analogiden yola çıkılmıştır. Işık kaynağından gelen ve temas yüzeyine giden fiber optik kablolar (set 1) **lambda**, temas yüzeyinden yansıyan ışığı kameraya ileten fiber optik kablolar (set 2) ise **reseptör** diye adlandırılmıştır. Yansıyıp gelen ışığın parlaklığını ölçen kamera, ışık kaynağı, fiber optik kablolar set 1 ve set 2 ile kablo demeti, elek yapısı, elastik ve şeffaf silikon ile opak kaplamanın oluşturduğu yapının tamamı ise **algılayıcı** olarak tanımlanmıştır.

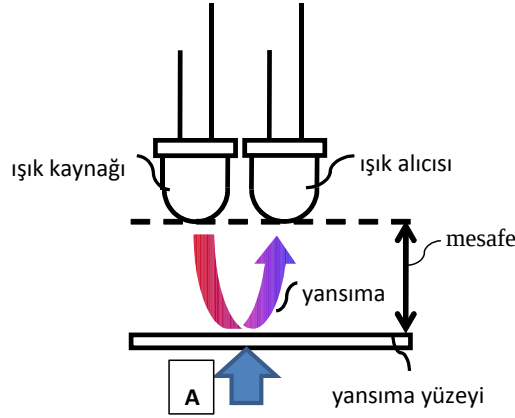
Sırasıyla ışık kaynağı, ışığı ileten fiber optik kablolar, elek, elastik ve şeffaf silikon, yansıma yüzeyi, yansıyan ışığı taşıyan fiber optik kablolar yani reseptörler, kamera yani algılayıcının bilgisayara bağlanması ile **sistem** ortaya çıkmaktadır.

4.2 Sistemin Çalışma Mantığı

Amacı insan parmak ucu hassasiyetinde, konumsal dokunma, yer değiştirme (batma miktarı) ve kuvvet ölçmek olan bu sistem, ışık gönderip yansıyan ışığın parlaklığını bir kamera üzerinden görüntü işleme yazılımları yardımıyla ölçen, yani optik teknolojisi temelinde çalışan bir dokunma hissi algılayıcısıdır.

Daha öncede belirtildiği üzere optik teknolojisi temelinde çalışan dokunma algılayıcılarındaki en önemli sorun, optik çiftlerin ebatlarının büyük olmasıdır. Tasarımın en önemli özgünlüğü, bu boyutsal dezavantaj probleminin çözülmüş olmasıdır.

Yan yana duran bir çift ışık kaynağı ve ışık alıcısı yani optik çift, belli bir mesafe ile bir yüzeye doğrultulduklarında ışık kaynağından çıkan ışık, yüzeyden yansıyarak ışık alıcısına ulaşacaktır, Şekil 4.2. Yansıma yüzeyine uygulanacak bir “A” tahriki durumunda yüzey ile alıcı arasında mesafe azalacağından yansıma ile ışık alıcısına geri dönen ışığın parlaklığı artmaktadır.

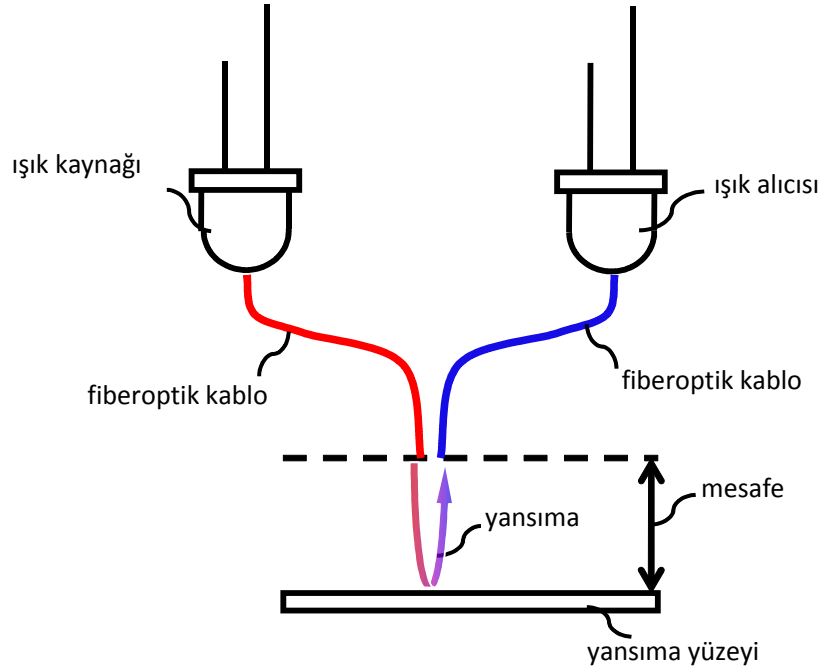


Şekil 4.2 Optik çiftlerde yansıma

Herhangi bir “A” tahriki (fiziksel girişi) sonrası bu girişin oluşturacağı yer değiştirme (deplasman) ile ışık kaynağı ile yansıma yüzeyi arasındaki mesafe azalacak ve buna orantılı olarak parlaklık artacaktır.

Bu çiftlerin yan yana dizildikleri düşünülürse belli bir alana yerleştirilebilecek optik çift âdeti bir çiftin boyutuna bağlıdır. Bu çiftlerin çapları ortalama 5 mm civarındadır. Bu tip bir yapı kullanılarak parmak ucundaki geometrik çözünürlük olan 1 mm’ye ulaşmak imkânsızdır.

Optik çiftlerin geometrik ebatlarından oluşan dezavantaj, ışık iletiminin fiber optik kablolar ile yapılması ile çözüme kavuşmaktadır, Şekil 4.3.

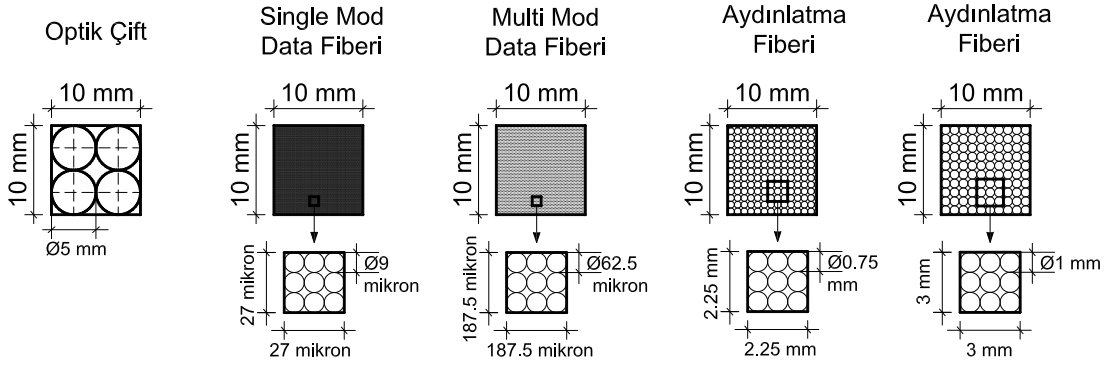


Şekil 4.3 Fiber kablolar ile ışık iletimi

Fiber optik kabloların çapı günümüz teknolojisinde 9 mikrona kadar indirilmiştir. Işığı fiber optik kablo ile taşınması hem geometrik çözünürlüğü arttırmakta hem de tasarıma esneklik kazandırmaktadır, Çizelge 4.1, Şekil 4.4.

Çizelge 4.1 Fiber optik kablo ve optik çift kıyası

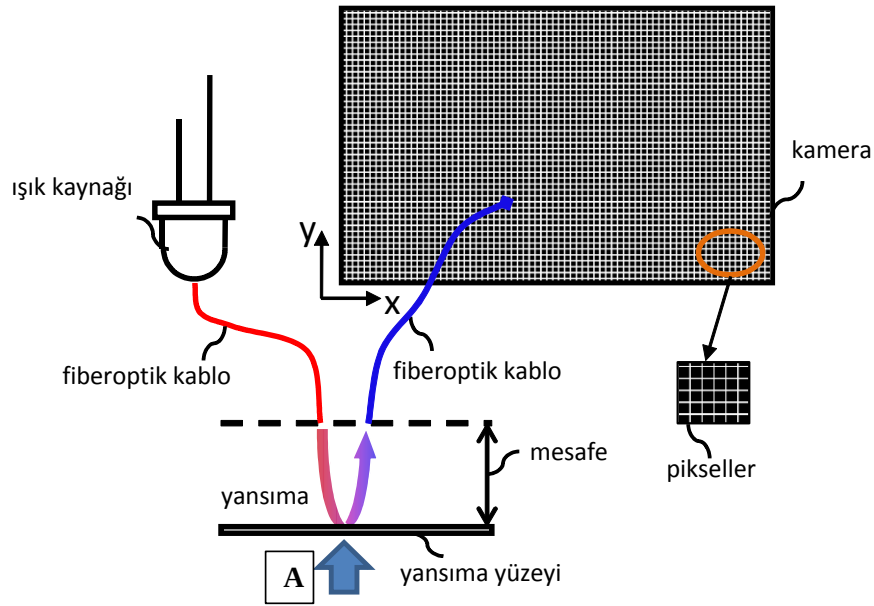
Işığı Taşıma Mekanığı	Özellik	Çap	Adet / cm ²	Geometrik Çözünürlük
Optik Çift	Optik Alıcı - Verici	5 mm	4	5 mm
Single Mod Data Fiberi	Kızılötesi + Normal Işık	9 mikron	1.234.444	12.63 mikron
Multi Mod Data Fiberi	Kızılötesi + Normal Işık	62.5 mikron	25.600	87.75 mikron
Aydınlatma Fiberi	Normal Işık	0.75 mm	182	1 mm
Aydınlatma Fiberi	Normal Işık	1 mm	100	1.4 mm



Şekil 4.4 Fiber optik kablo ve optik çiftlerin yerleşimi

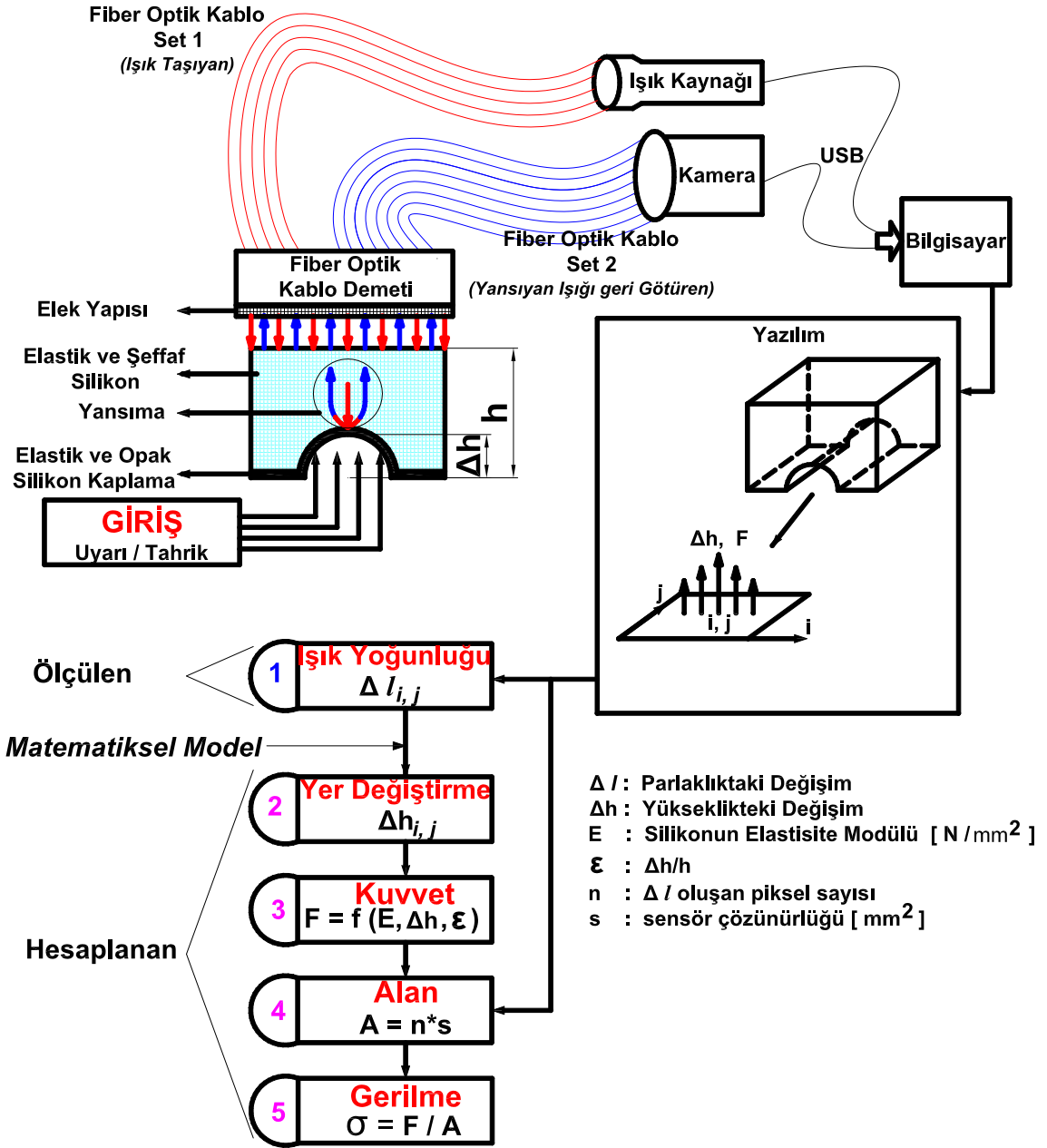
9 mikron çapta single mod data fiber optik kablosu kullanıldığında teorik olarak 1 santimetre kareye 1 milyonun üzerinde reseptör yerleştirilebilmektedir. Bunun sonucu olarak santimetre karede 1 milyon âdetin üzerinde analog veri elde edilmektedir. 1 milyon adet analog veriyi işlemek pratik olarak imkânsızdır.

Reseptörler herhangi bir Full HD bilgisayar kamerası (CMOS, CCD vb.) alıcısı ile eşleştirilmesi (her bir reseptör kablo ile bir piksel olacak şekilde) durumunda $1920 \times 1080 = 2.073.000$ adet analog veri yani reseptör görüntü işleme yapılarak ölçülebilmektedir, Şekil 4.5.



Şekil 4.5 Kamera ile analog veri ölçme

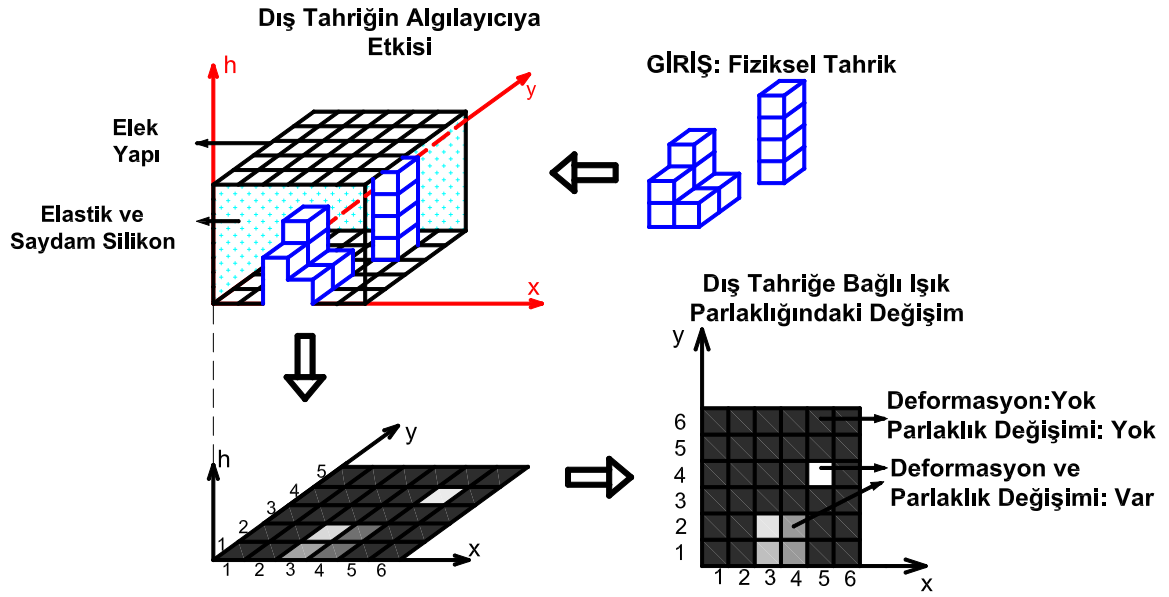
Tasarlanan dokunma hissi algılayıcısına bir tahrik uygulandığında bu tahrik, giriş ekranda şekil 4.6'daki gibi görülmektedir.



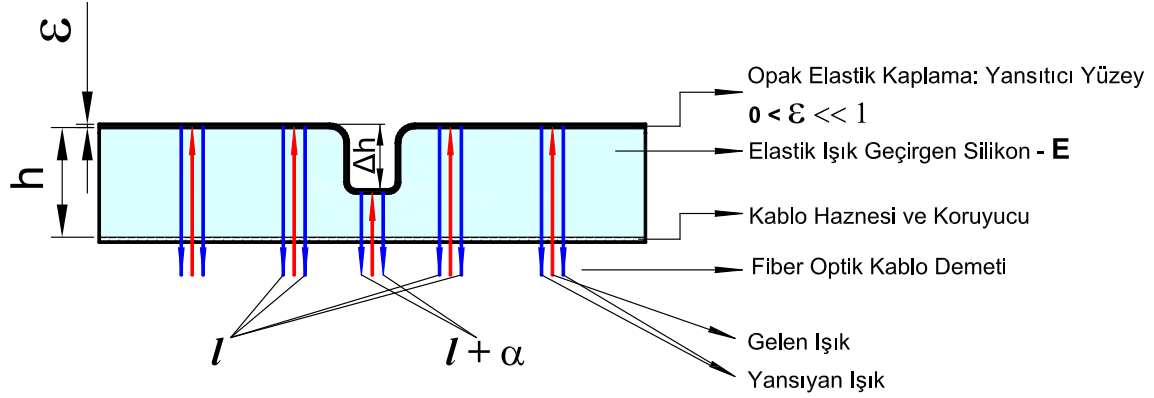
Şekil 4.7 Dokunma hissi sistemi genel çalışma mantığı

4.3 Sistemin Teknik Özellikleri ve Özgünlüğü

Sistemin teknik özelliklerini etkileyen ve belirleyen 3 ana unsur bulunmaktadır, Şekil 4.9. Bunların ilki kullanılacak elastik ve şeffaf silikon malzemenin elastisite modülü (E)'dür. Seçilecek malzemenin elastisite modülüne göre sistemin kuvvet ve basınç çözünürlüğü ve çalışma aralığı değişmektedir.



Şekil 4.8 Parlaklık ile deplasmanın ölçülmesi



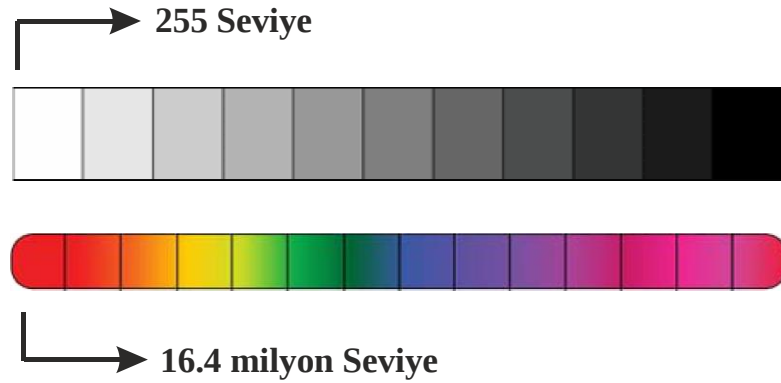
Şekil 4.9 Sensörün bileşenleri

İkinci olarak fiber kabloların çapı ve dizimi sistemin geometrik çözünürlüğüne direkt olarak etkimektedir. Zaten bu tasarımın **birinci özgünlüğü olan geometrik çözünürlüğü** optik çiftler yerine çapları çok daha küçük olan fiber optik kabloların kullanılması ile sağlanmıştır.

Üçüncü olarak ise algılayıcıda kullanılacak kamera ile sistemde kullanılacak yazılım dokunma algılamanın hem çözünürlüğü hem de çalışma hızını belirlemektedir. Standart bir 30 fps ("*frame per second*" = saniyede resim karesi) kamera ile ölçme yapıldığında çalışma hızı 30 Hz olmaktadır ama 1000 fps'lik bir hızlı kamera kullanıldığında çalışma hızı 1000 Hz'e çıkmaktadır.

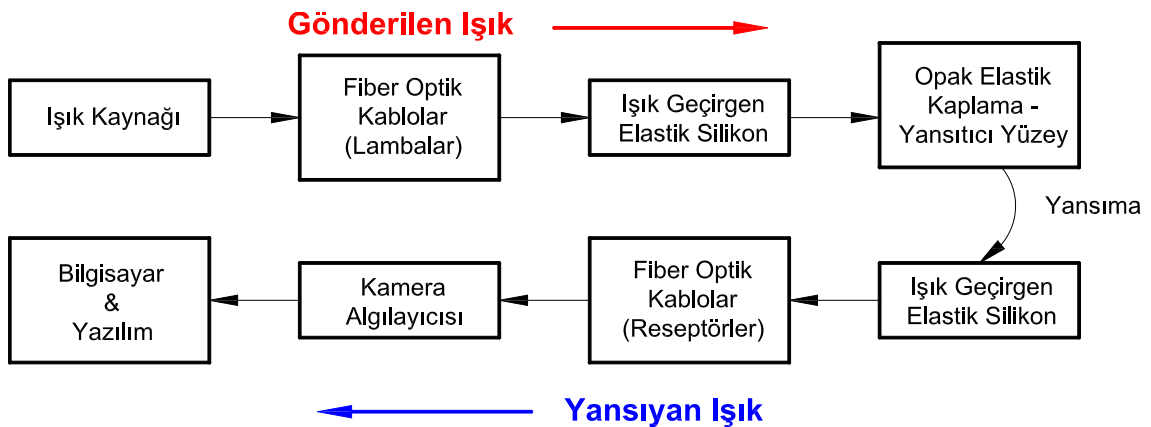
Görüntü işleme programında, en karanlık ile en aydınlık arası, siyah beyaz veya termal okuma yapıldığında 255 seviyeye bölünmektedir. Eğer siyah beyaz yerine 16 milyon

renk ile seviyelendirme yapılır ise (farklı bir yansıtıcı yüzey ile birlikte) ölçüm çözünürlüğü de katlarca artacaktır, Şekil 4.10.



Şekil 4.10 Renk skalası ve seviyeler

Sonuç olarak ışık kaynağından çıkan ışık şekil 4.11'deki süreci tamamladıktan sonra temas yüzeyindeki yer değiştirme (batma miktarı), kuvvet (ve basınç) bilgileri, yazılım çıktısı olarak elde edilecektir.



Şekil 4.11 Sistemin çalışma şeması

Sistematik olarak belirtilmek istenirse sistemin **3 özgünlüğü** vardır.

- Geometrik çözünürlüğü; Birim alana yerleştirilebilecek reseptör sayısı.
- Çok sayıdaki bu reseptörlerden gelen bilginin düşük maliyet ile (basit bir kamera algılayıcısı ile) işlenebilmesi.
- Çok noktalı okuma, her bir pikselin (reseptörün) ayrı ayrı bir analog veri olarak ölçülebilmesi.

DENEY DÜZENEGİ ÜRETİM ÇALIŞMALARI VE MALZEME DENEYLERİ

Bu bölümde dokunma hissi algılayıcı sistemini üretmek için yapılan prototip çalışmaları ve deney düzeneği üretim çalışmaları ile malzeme seçimi için yapılan deneylerden bahsedilmiştir. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi seçilen malzemeler sistemin özelliklerini etkilemektedir ve belirlemektir. Sistem üretimi öncesi bazı kısıtlar ve hedefler (örneğin geometrik çözünürlük 1mm olmalı vb.) belirlenmiştir.

Üretim ve malzeme seçimi için yapılan çalışmalar ve deneyler hakkında, takip eden alt bölümlerde detaylı açıklamalar yapılmıştır.

5.1 Fiber Optik Kablo Seçimi ve Deneyler

Fiber optik kablo ışığı taşıması için seçilmiş ve algılayıcı sistemi üretilmiştir. Tasarımda 9 mikron çaptaki single mod data fiberi kullanılması ön görülmüştür. Yapılan deneylerde single mod ve multi mod data fiberi ile 0.75 mm çapındaki aydınlatma fiber kabloları kullanılmıştır.

Data fiberi hem kızılötesi hem de normal ışığı iletebilecek bir yapıdadır. Data fiberleri ortam aydınlığından direk olarak etkilenmezler, çünkü sadece kablonun boyuna karşıdan dik gelen ışığı iletmektedirler. Açılı gelen ışık kablodan içeri giremediğinden yan yana duran iki data fiberi birbirinin ışığından etkilenmemektedir. Data fiberleri single ve multi mod olmak üzere 2 tiptir, Çizelge 5.1.

Single mod fiber kabloda tek ışın kablo çekirdeğinde ("core") ilerlerken multi modda birden fazla ışın çekirdeğin çevresindeki kılıfa çarparak ve yansıyarak ilerlemektedir.

Single mod fiberini iletim hızı ve verimli iletim mesafesi ile bant genişliği multi moddan fazladır. Single mod kablo sadece kablo olarak multi moda göre daha ucuz olsa da, single mod için kullanılması zaruri olan ekipmanlar multi moda göre daha pahalıdır. [91]

Data fiberleri ile yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuç şu şekildedir:

- Data fiberlerin ortam ışığından etkilenmemesi büyük bir avantajdır.
- Data fiberlerinin çaplarının küçük olması tasarlanan dokunma sensörünün geometrik çözünürlüğünü olumlu etkimekle birlikte imalat açısından sorun teşkil etmektedir. Single mod data fiberleri günümüz teknolojisi ile 8 - 10 mikron çaplarında üretilmektedirler.
- Data fiberlerin çekirdekleri mikron düzeyinde çaplarda oluşu için kablo kesimi için özel makas ihtiyacı vardır ve kesim sonrası özel sonlandırıcılar ile kapatılmaları gerekmektedir. Aksi halde ortamdaki tozdan kirlenmekte ve ışık iletimi yapılamamaktadır.

Sonuç olarak hem imalat noktasındaki zorluk hem de kirlenmeden dolayı ışık iletimindeki zafiyet, tasarımda aydınlatma fiberi kullanımına sebep olmuştur. Aydınlatma fiberleri 0.5, 0.75, 1 mm gibi çaplarda basit yapıda kılıfsız akrilik bazlı fiber kablolardır, Çizelge 5.1. Aydınlatma fiberleri ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuç şu şekildedir:

- Aydınlatma fiberlerin ortam ışığından etkilenmemesi bir dezavantajdır, opak bir malzeme ile kaplanmaları ve korunmaları gerekmektedir.
- Aydınlatma fiberlerinin çapları, data fiberlerine kıyasla çok büyük olmasa da hedeflenen dokunma algılayıcısının geometrik çözünürlüğünü için yeterlidir.
- Hem çapları hem de yapıları gereği imalata elverişlidirler.

Aydınlatma fiber optik kabloları ışık kaynağında üretilen ışığı temas/ölçüm yüzeyine taşımaya yarar. Fiber optik kablolar fiziksel bir kuvvet uygulanmadıkça ömür boyu garantilidir, taşıdığı ışıktaki solma veya azalma olmaz. Fiber optik kablolar +110°C ile -40°C ye, yeraltı, su altı, beton içi, nemli mekânlar gibi zor şartlara dayanıklıdır. Işık taşıyıcıları olmaları nedeni ile hiçbir elektrik riski yoktur. Cam ve Akrilik (PMMA) olmak üzere iki ana yapıda olan fiber optik kabloları çıplak olarak üretir.

Çizelge 5.1 Fiber optik kablo tipleri ve özellikleri

Fiber Optik Kablo Tipi	İletilen Işık	1: Çekirdek (Core)	2: İç Kılıf	3: Tampon	4: Renkli Dış Kılıf
Single Mod Data Fiberi	Kızılötesi + Normal Işık	9 mikron	125 mikron	250 mikron	400 mikron
Multi Mod Data Fiberi	Kızılötesi + Normal Işık	62.5 mikron	125 mikron	250 mikron	900 mikron
Fiber Optik Kablo Tipi	İletilen Işık	Çap			
Aydınlatma Fiberi	Normal Işık	0.75 mm			
Aydınlatma Fiberi	Normal Işık	1 mm			

Akrilik fiber optik kablolar yapılarında temel madde olarak polimetilmetakrilat (PMMA) vardır. 0,25 mm ile 3 mm arasındaki çaplarda üretilirler. -40 ile +70 °C arasında uzun süreli ve +110°C'ye kadar kısa süreli olarak çalışabilmektedirler. Işık kaynaklarının çıkışlarına takılarak, üretilen ışığın taşınmasını sağlarlar.

Sonuç olarak, yapılan deneyler ve araştırmalar sonrasında Mitsubishi™ marka 0.75 çapında akrilik bazlı aydınlatma fiberi kullanılmasına karar verilmiştir.

5.2 Kablo Haznesi ve Koyucusu - Elek Tasarımı ve Üretimi

Fiber optik kabloların dizildiği ve nizamını belirleyen yapı olan **kablo haznesi ve koyucusuna** delikli olması hasebiyle **elek** adı verilmiştir. Elek tasarımı karar verilmesi gereken 2 konu mevcuttur. Bunlar elek malzemesi ve kablo dizim şeklidir.

İlk olarak elek malzemesi için farklı malzemeler ile çeşitli deneyler yapılmıştır. Pertinaks kartı ince ve hazır bir yapıda olması, alüminyumun da imalata yani 0.75 mm çapta delik delmeye uygun olmaması sebebiyle, Pleksiglas malzeme tercih edilmiştir.

Görüntü işleme kolaylığı açısından siyah renk seçilmiştir. 3 mm et kalınlığında pleksiglas plakalar kullanılmıştır. Et kalınlığının fazla olması hem içinden geçen fiber kablonun daha dik, mukavim ve kararlı durmasına hem de elek yapısının rijitliğine katkı sağlasa da,

0.75 mm çapta delik açma zorluğundan dolayı, en uygun çözüm olarak 3 mm et kalınlığı tercih edilmiştir.

Sonuç olarak yapılan deney ve analizler ışığında elek yapısında pleksiglas malzeme kullanılmıştır. Malzeme için önce CAD ve CAM tasarımı yapılmış sonra CNC router cihazında ön işleme yapılmıştır. Ön işlemiden çıkan yarı ürün laboratuvar şartlarında sütun matkap ile **1500'ten fazla 0.8 mm çap** delik delinmiştir, Şekil 5.1. Daha sonra her bir deliğe 0.75 çapta fiber kablo yerleştirilmiştir, Şekil 5.2 – 5.3.

Sensör tasarımında hedeflenen 1 mm geometrik çözünürlüğü seçilen 0.75 mm çaptaki aydınlatma fiberleri ile sağlayabilecek fiberlerin dizim geometrisi için bilgisayar ortamında çizimler üzerinden çalışılmış ve şekil 5.4'deki yapıda karar kılınmıştır. Elek diziliş geometrisinin tasarımında, sadece 1 mm geometrik çözünürlük sağlamasına değil, ışık kaynakları ile reseptörlerin simetrik dizilmesine de önem verilmiştir.

Sonuç olarak, fiber kabloların dizimdeki aşağıdaki 4 özelliği dikkat edilmiştir.

- Çözünürlük
- Ölçüm Yapılacak Alan
- Simetri
- Kablo Âdeti

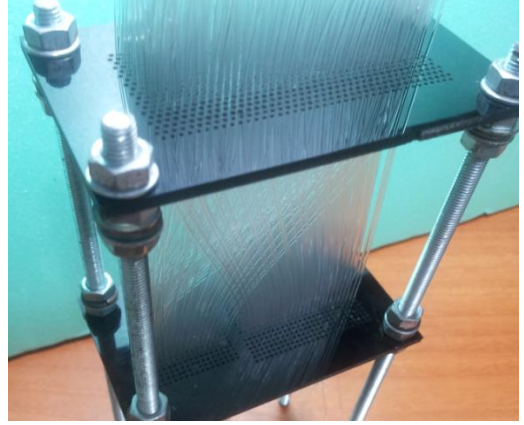
Yapılan tasarım ile geometrik çözünürlük 1 mm olacak şekilde santimetre kareye 22 den fazla reseptör yerleştirilmiştir. 23. 11 cm² ölçüm alanında 257 adet ışık kaynağı ve 522 adet reseptör olmak üzere toplam 779 adet 0.75 mm çapta aydınlatma fiber optik kablo dizilmiştir, Şekil 5.5.

Kablo haznesi ve koyucusu - elek yapısı fiziksel uyarıyı düşey ekseninde sınırlamakta ve sistemi fiziksel darbelere karşı korumaktadır. Elek formunda tasarlanan bu bölümde fiber optik kablolar ile taşınan ışık ışınları elastik ve şeffaf malzemeye geçiş yapmaktadır.

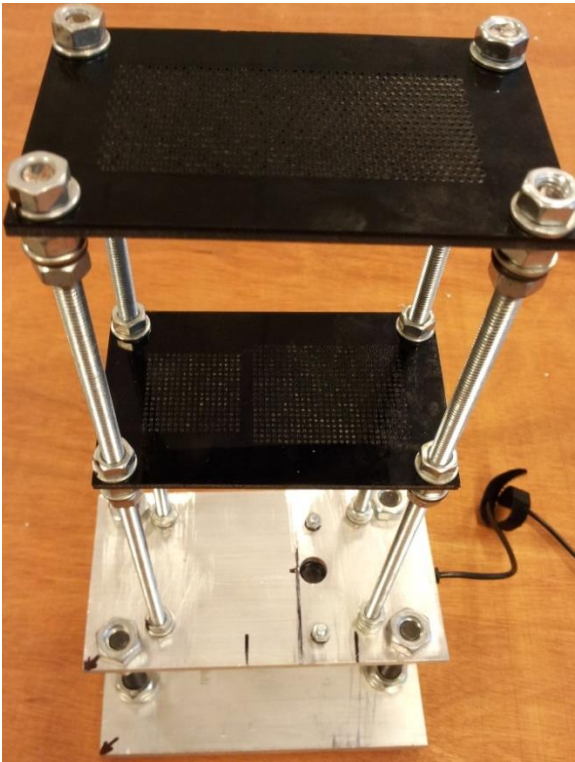
Elek yapı malzemesi olarak seçilen pleksiglas malzeme ile sensörün etrafı da kaplanarak sağlam bir mekanik yapı elde edilmiştir.



Şekil 5.1 Plexiglas üretim



Şekil 5.2 Plexiglas dizim

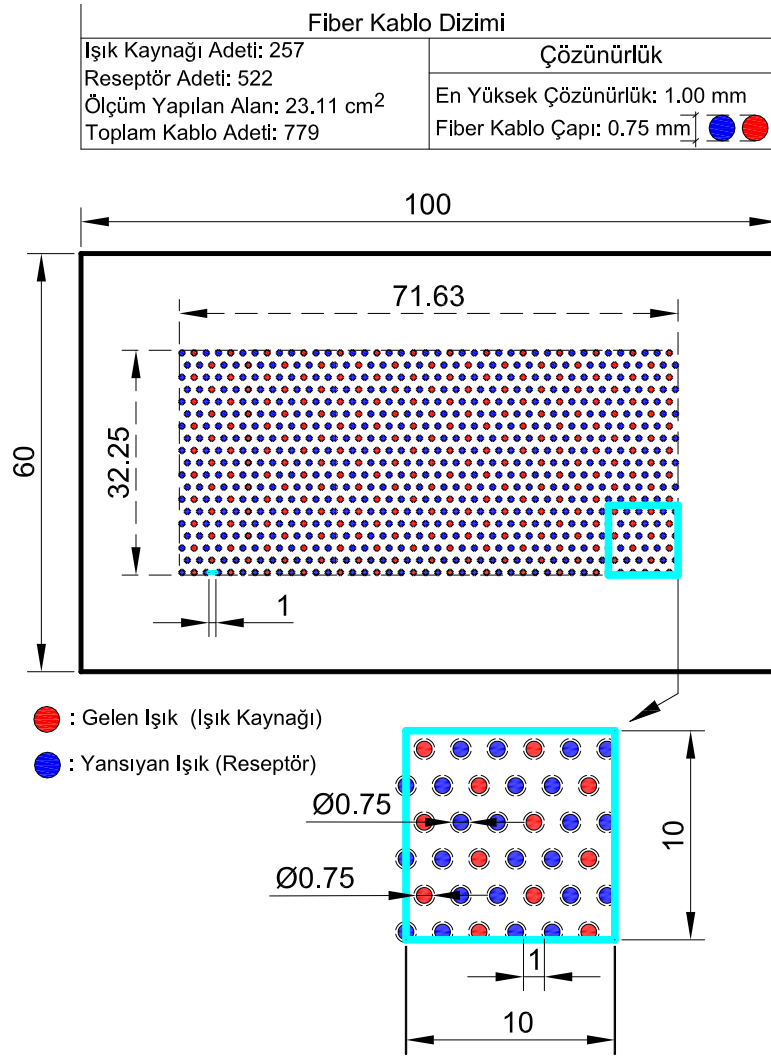


Şekil 5.3 Plexiglas elek yapısı



Şekil 5.4 Fiber kabloların dizimi

Elek yapısında her bir reseptör etrafında 3 adet lamba, her bir lambanın etrafında ise 6 adet reseptör bulunmaktadır, Şekil 5.5. Bu yapı ile hem ölçüm yüzeyinde homojen bir aydınlık elde edilmiş hem de reseptör sayısının toplam kablo adetine oranı en yüksek olmuştur.



Şekil 5.5 Elek dizim tasarımı

5.3 Silikon Ped

Sensör malzemeleri içerisinde seçimi en önemli olanlardan biri de elastik ve şeffaf olması gereken bu malzemedir. Yapılan ön araştırma ile bu amaç için en uygun materyalin silikon olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu malzemesini seçimi, doktora tez çalışması için önem arz etmektedir. Bu malzeme hem elastik hem de şeffaf olmalıdır. Buna en uygun malzemenin silikon bazlı malzemeler olduğu tespit edilmiştir. Piyasada yapılan araştırmada şeffaf ve elastik özelliği olan silikon malzemeler tespit edilip üzerinde çeşitli denemeler yapılmıştır.

Silikon hem yapışkan hem de zor kurduğu için istenilen ölçülerde bir ped elde etmek için çok sayıda deney yapılmıştır, Şekil 5.6 – 5.8.



Şekil 5.6 Kalıba silikon dökümü

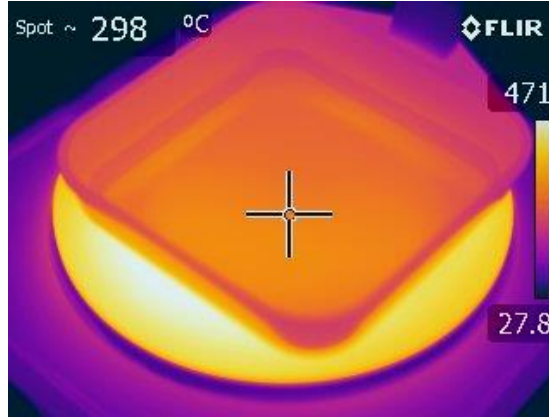


Şekil 5.7 Silikon malzeme kabının içerisinde



Şekil 5.8 Silikon ped

Ayrıca farklı sıcaklıklarda da döküm deneyleri yapılmıştır, Şekil 5.9. Fakat sıcaklığın silikon malzemeye etkisinin çok az olduğu ve döküme olumlu bir katkı yapmadığı gözlemlenmiştir. Döküm için en ideali dökümün yavaş ve içeriye hava hapsetmeden yapılması olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.9 Farklı sıcaklıklarda döküm deneyleri

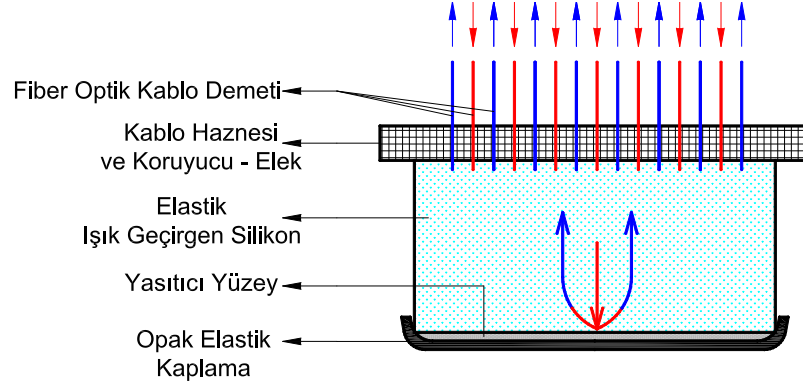
Döküm aşamasında ortaya çıkan en büyük 3 problemten biri hava kabarcığı ikincisi malzemenin yapışkan olması üçüncüsü de kuruma/donma süresinin uzunluğudur.

Yapılan deneyler ve araştırmalar sonrasında silikon pedin dökümünde alüminyum kalıp ve kalıbın içine yerleştirilmiş cam bir tabakanın kullanılması durumunda hem daha pürüzsüz bir yüzey hem daha az yapışma hem de homojen bir kuruma sağladığı sonucuna varılmıştır. Silikon pedin dökümü ile ilgili silikon ped bölümü altında daha detaylı bilgi verilmiştir.

Kullanılacak silikon ped ve ilgili yapılan araştırmalar, deneyler ve modelleme çalışmaları bir sonraki bölümde müstakil bir konu olarak açıklanmıştır.

5.4 Yansıtıcı Yüzey

Yansıtıcı yüzey elastik ışık geçirgen silikon pedin dışını kapatan opak elastik kaplamanın iç yüzeyidir, Şekil 5.10.

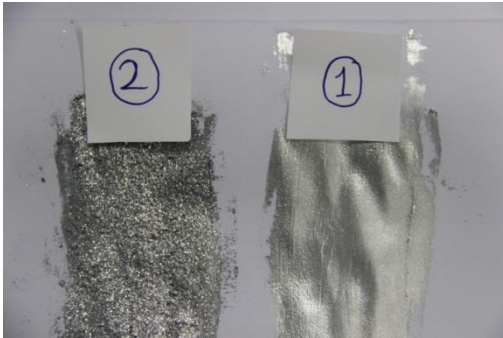


Şekil 5.10 Yansıtıcı yüzey

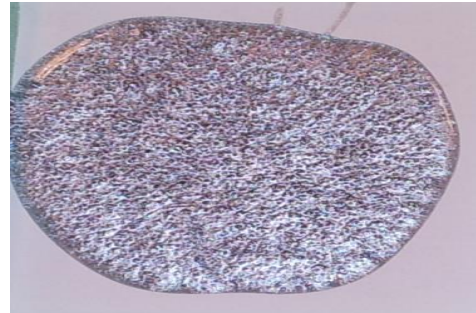
Bu yüzey ince, elastik, opak, ışığı iyi yansıtan ve mukavim bir yapıda olmalıdır. Sim tozu, gümüş sim boya, silikon bazlı beyaz boya, çeşitli bantlar, su kesici malzemeleri ile deneyler yapılmıştır, Şekil 5.11.

Sim tozu ile kaplanan yüzeylerin yansıtıcı olarak istenilen sonucu verdiği gözlenmiştir. Özel su kesici materyalinin ışığı geçirmeme notasında en ideal sonucu verdiği yapılan deneyler ile gözlenmiştir. Fakat silikon pedin üzerine yerleştirilecek farklı bir kaplama malzemesi sistem dinamiği etkileyecektir.

Bunun yerine gümüş sim tozu ile karıştırılarak çok ince bir tabaka silikon ped üretilmiştir. Sonuç olarak sistemde kullanılacak silikon ped, kendi ham maddesi ile sim tozu karıştırılarak üretilen çok ince bir silikon ped tabaka (yansıtıcı yüzey) ile kaplanmıştır, Şekil 5.12.



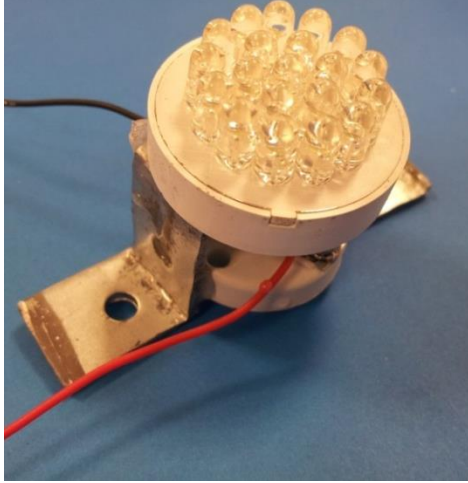
Şekil 5.11 Sim tozu ile boyama deneyleri



Şekil 5.12 Silikon yansıtıcı yüzey

5.5 Kamera ve Işık Kaynağı

Kamera olarak A4 Tech markasının Full HD 30 fps standart bir bilgisayar kamerası (“webcam”) seçilmiştir. Işık kaynağı için ise LED kullanılmıştır, Şekil 5.13. Fakat homojen bir ışığa ihtiyaç olduğundan LED ışık kaynağı aynı bir fener gibi bir kanal yapısının için konulmuştur, Şekil 5.14. Bu kanalın ucuna buzlu bir pleksiglas yerleştirilerek noktasal ışık kaynaklarından homojen bir ışık kaynağı elde edilmiştir.



Şekil 5.13 LED ışık kaynağı

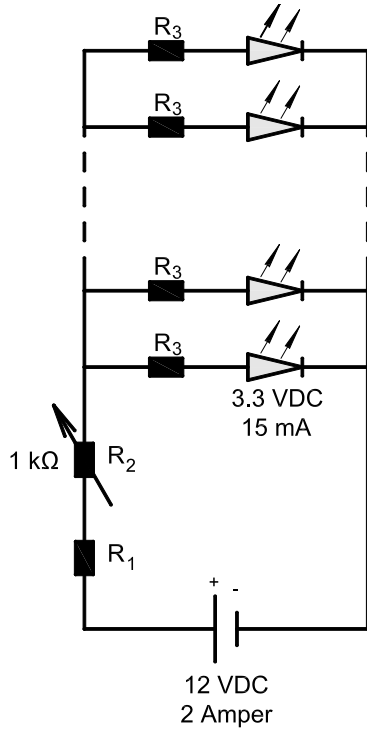


Şekil 5.14 Homojen ışık kaynağı

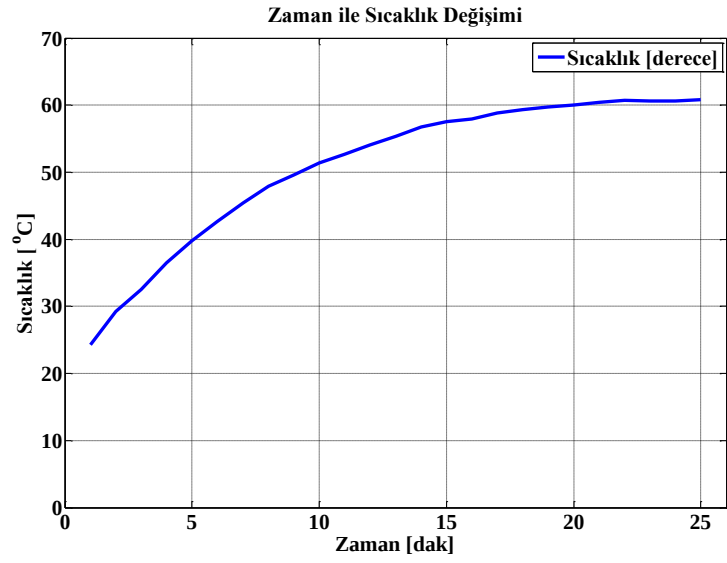
Işığın gücü yani oluşturacağı parlaklık miktarının kontrol edilebilmesi için ışık kaynağını kontrol eden bir devre hazırlanmış ve sisteme monte edilmiştir, Şekil 5.15. Beyaz renkli 20 adet LED ile oluşturulmuş ışık kaynağı 1 k Ω 'luk bir potansiyometre (R_2) ile kontrol edilmektedir. Diğer dirençler tüm LED'lerin aynı parlaklıkta yanmasını sağlamak ve aşırı yüklenmelerde güvenlik amaçlıdır. Işık kaynağı toplam 1.76 Watt gücünde ve 24 lüks aydınlatma düzeyindedir.

Işık kaynağı kapalı bir sistemin içine yerleştirildiğinden zamanla sıcaklığın değişimi de gözlemlenmiştir, Şekil 5.16.

25 dakikanın üzerinde bir sürede çalıştırılan sistemde her dakika sistem içerisindeki ışık kaynağının sıcaklığı tespit edilmiştir. Sıcaklığın 60 $^{\circ}\text{C}$ civarında sabitlendiği ölçülmüştür. Çok uzun süreli çalışma durumlarında bu sıcaklığın algılayıcı içerisindeki ortama sıcaklığını arttırabileceği için algılayıcıya bir fan eklenmesin faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.15 LED devresi

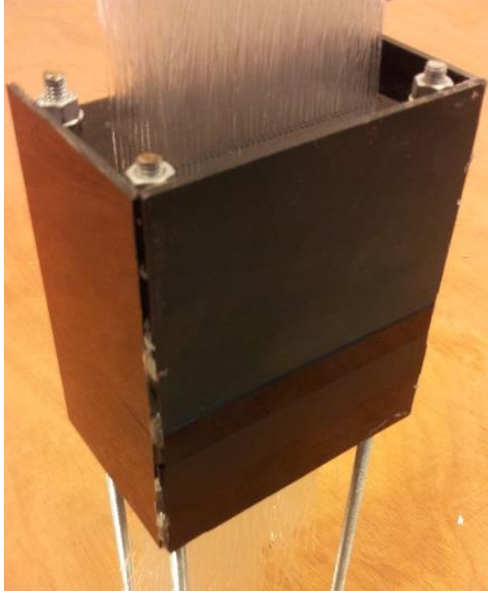


Şekil 5.16 Işık kaynağında zamanla sıcaklığın artışı

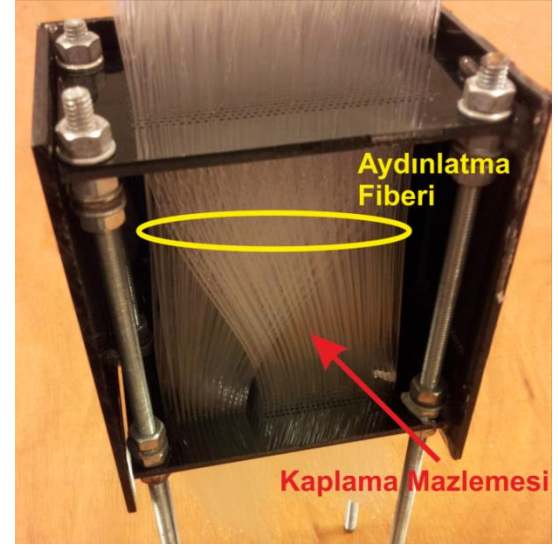
5.6 Kaplama Malzemeleri

Kaplama malzemelerinin 2 önemli görevi bulunmaktadır. Bunların birincisi ve en önemlisi aydınlatma fiberlerin ortam ışığından etkilenmesinin önüne geçmektir. Buna iç kaplama malzemesi denilmiştir. İkincisi ise sisteme mukavemet ile kararlılık kazandırmak ve estetik açısından göze hoş görünmeyi sağlamaktır ve bu da dış kaplama malzemesi diye adlandırılmıştır. Elek yapısında da kullanılan 3 mm et kalınlığındaki siyah pleksiglas plakalar algılayıcının dış kaplamasında da kullanılmıştır, Şekil 5.17.

Şekil 5.18’de görülen algılayıcının iç boşluğuna doldurulacak ve aydınlatma fiberlerinin etrafını kaplayacak iç kaplama malzemesi için birçok farklı materyal ile deney yapılmıştır. İç kaplama malzemesi olarak poliüretan köpük, saten alçı, döküm tipi polyester ve epoxy malzeme ile deneyler yapılmıştır. Prototiplerin imalatında iç kaplama malzemesi olarak kullanılan poliüretan köpük genleşme problemi ve katılaşma süresi sebebiyle elenmiştir. Poliüretan köpüğün elenmesi sonrasında deneyler saten alçı, polyester ve epoxy malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1’de görünen malzeme bileşenlerinin farklı oranlarda karıştırılması ile şekil 5.19’deki gibi karışım sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 5.17 Algılayıcının dış kaplaması

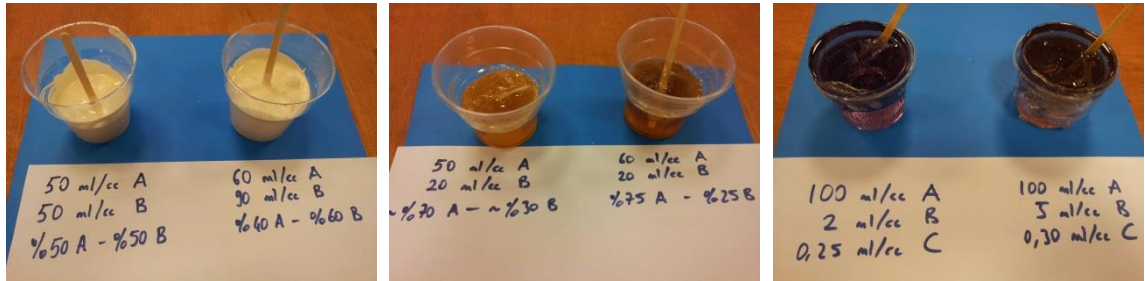


Şekil 5.18 Algılayıcının iç kaplaması: Aydınlatma fiber kabloları kaplama malzemesinin doldurulacağı hacim

Çizelge 5.1 Malzeme bileşenleri

Malzeme	Bileşen 1	Bileşen 2	Bileşen 3
Saten Alçı	Alçı	Su	
Epoxy	Reçine	Sertleştirici	
Polyester	Polyester	Kobalt	Mek

Yapılan deneyler elde edilmek istenen sonuç hem opak hem de mukavim bir yapıdır. Çünkü bu iç kaplama malzemesinin amacı aydınlatma fiber optik kabloların etrafını sarmak ve onları bulundukları konuma sabitlemektir.



(a)

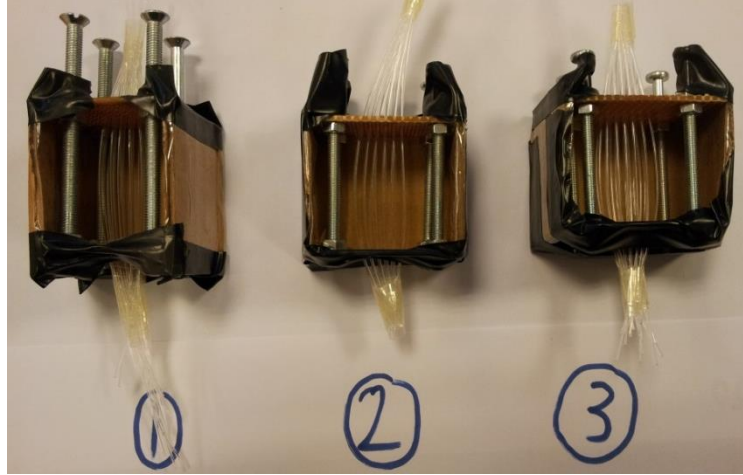
(b)

(c)

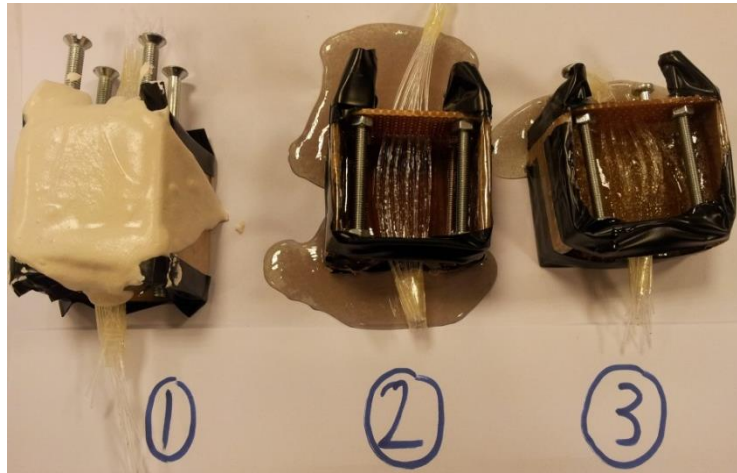
Şekil 5.19 Farklı Bileşen Oranlarında Malzeme Karışım Deneyleri

a- Saten Alçı, b- Epoxy, c- Polyester

Her malzeme kendi içerisinde en ideal karışım oranı elde edilinceye kadar farklı oranlarda karışım deneylerine devam edilmiştir. Her malzeme için ayrı ayrı en ideal karışım onaylarına karar verildikten sonra, bu karışım oranları küçük algılayıcı prototiplerinde denemiştir, Şekil 5.20.



(a)



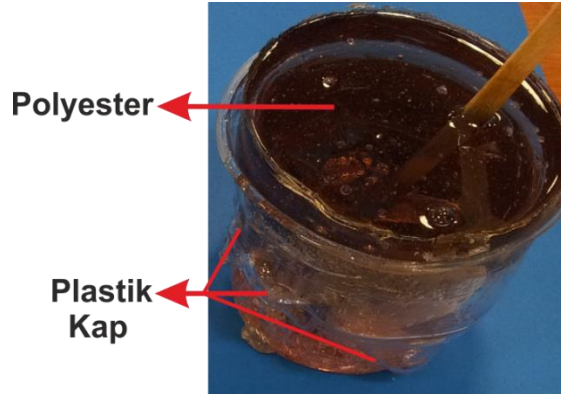
(b)

Şekil 5.20 Malzeme deneyleri

a – içi boş küçük deney düzenekleri, b – içi dolu küçük deney düzenekleri

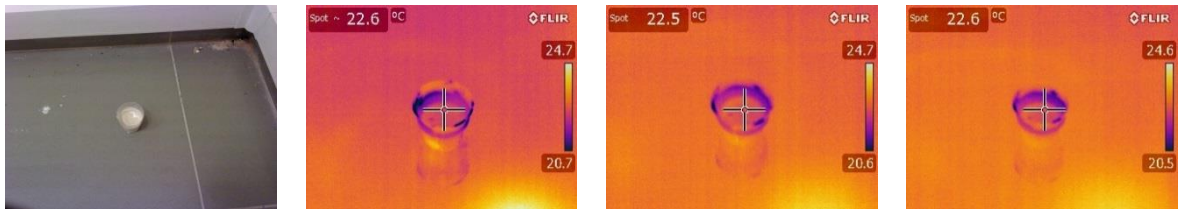
Bu deneyde 1 numaralı malzeme % 60 alçı - % 40 su karışım oranında saten alçı, 2 numaralı malzeme 100 ml polyester reçinesi, 2 ml mek ve 0.2 ml kobalt karışımında polyester, 3 numaralı malzeme ise 50 ml epoxy reçine ve 25 ml sertleştirici karışımında epoxy malzemesidir.

Yapılan deneylerde epoxy ve polyester malzemesinin katılaşma sürecinde sıcaklığının arttığı ve içine konduğu plastik kabı erittiği görülmüştür, Şekil 5.21.

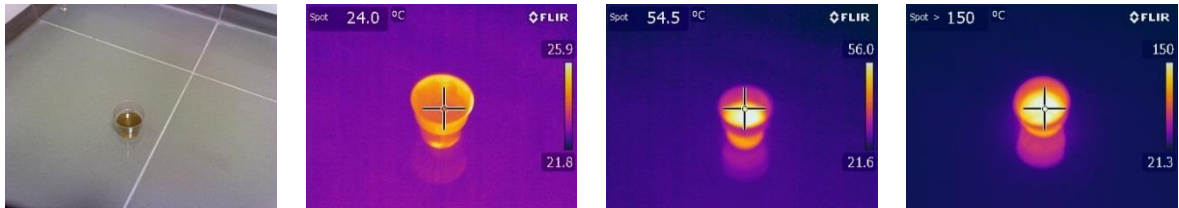


Şekil 5.21 Polyester - erime

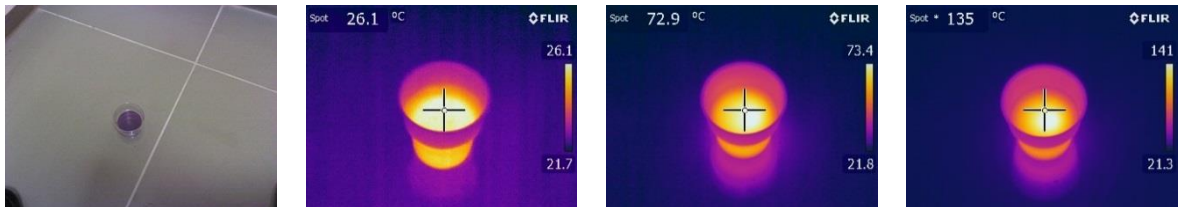
Işık iletiminde kullanılan akrilik bazlı aydınlatma fiber optik kabloların 80°C derece sıcaklık üzerinde zarar gördüğünden malzemelerin katılaşma süreci termal kamera ile gözlenmiş ve katılaşma sıcaklık grafikleri elde edilmiştir, Şekli 5.22 – 5.24.



Şekil 5.22 Saten alçı katılaşma süreci termal deneyi

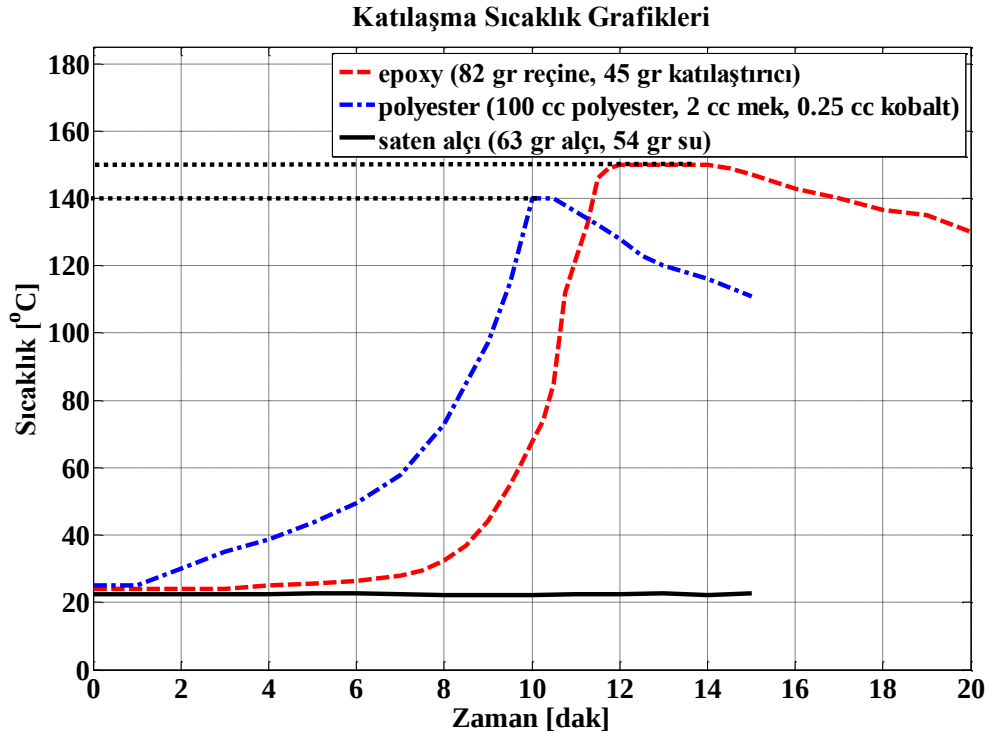


Şekil 5.23 Epoxy katılaşma süreci termal deneyi



Şekil 5.24 Polyester katılaşma süreci termal deneyi

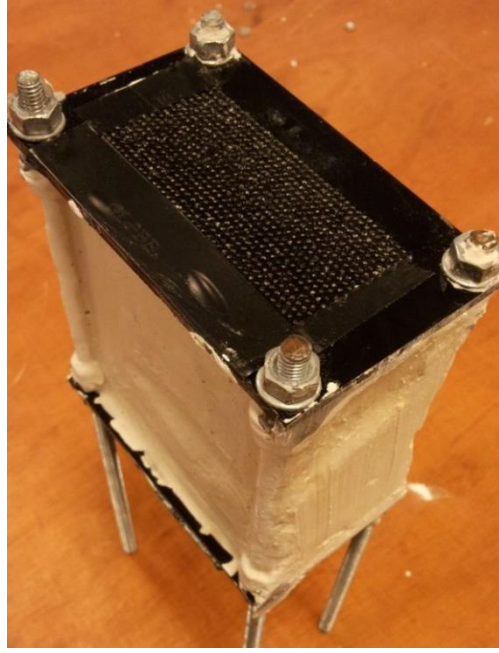
Termal deneyler ile elde edilen istatistiksel veri bilgisayar ortamında grafiğe dökülmüştür, Şekil 5.25. Bu grafikte her bir malzemenin katılaşma sürecinde sıcaklık değişimi gözlenmiş ve kaydedilmiştir. Bu çalışmanın amacı katılaşma süresince ulaşılan en yüksek sıcaklık değerini her bir malzeme için elde etmektir. Karışım oranları grafik üzerinde verildiği gibidir. Yapılan deneylerde karışım oranlarının sıcaklık grafiğine ciddi bir etkisi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.25 Termal deneylerin grafiği

Sıcaklık, opaklık, kaplama ve mukavemet açısından yapılan tüm deneyler sonrasında kaplama malzemesi olarak satin alçıya karar verilmiştir, Şekil 5.26.

Sonuç olarak yapılan tüm deney, gözlem, ölçüm, araştırma ve çalışmalar sonucunda algılayıcı yapısındaki tüm alt birimler için kullanılacak malzemelere karar verilmiştir.

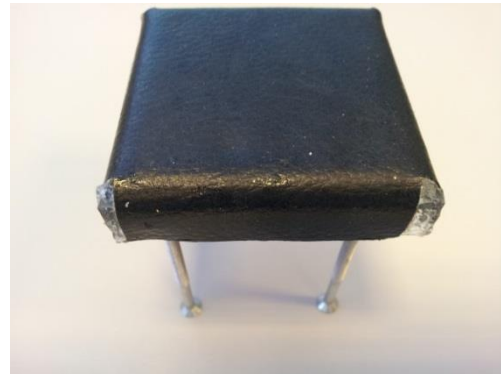
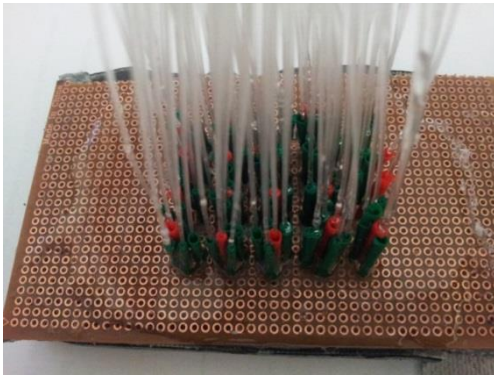


Şekil 5.26 İç kaplama malzemesi: saten alçı

5.7 Prototipler

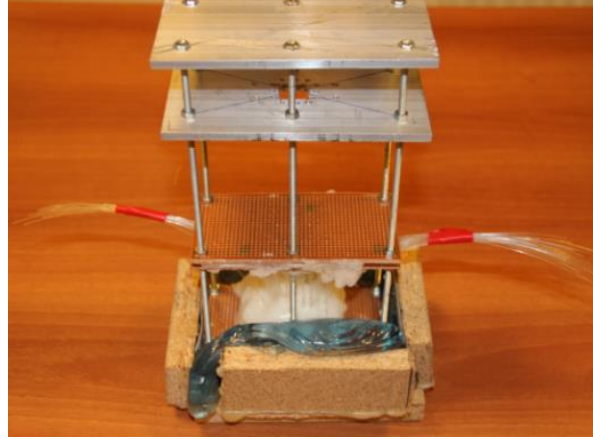
Nihai olarak tezde kullanılacak deney düzeneğinin yapısına, mekaniğine ve tasarıma karar vermek için önce çeşitli prototipler üretilmiştir, Şekil 5.27.

Prototipler üretilirken ihtiyaç duyulan malzemeler tespit edilmeye çalışılmıştır. Yukarıdaki başlıklardaki çalışmalar, prototip çalışması ile entegre ve eş zamanlı olarak ilerlemiştir. İstenilen işleri yerine getirebilmek için gerekli olan alt birimler ve tasarımın genel çerçevesi, prototip çalışmaları ile ortaya çıkar ıken, sürekli güncellenen tasarım ile ortaya çıkan ihtiyaçları gidermek için hangi malzemenin kullanılacağı yada nasıl bir mekanik yapı oluşturulacağı da yan bir çalışma olarak ilerlemiştir.



Şekil 5.27 İlk prototipler

Yapılan son prototip üretiminde 30.48 mm x 33.02 mm'lik bir alana 56 adet reseptör 40 adet ışık kaynağı yerleştirilerek 3.58 mm çözünürlükle ölçüm yapabilen 10.06 cm²'lik bir yüzey elde edilmiştir, Şekil 5.28.



Şekil 5.28 Dokunma hissi algılayıcısı deney düzeneği üretimi öncesi üretilen son prototip

Yapılan prototip çalışmaları sonrasında tez çalışması için üretilecek olan nihai sisteme yani dokunma hissi algılayıcısı deney düzeneğinin tasarıma son şekli verilmiştir.

SİLİKON PED VE MODELLEMESİ

Algılayıcıda silikon ped önemli bir rol oynadığından kullanılacak silikon pedin üretilmesi ve modellenmesi üzerinde ciddi çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde hem silikon malzeme hem de yapılan deneyler ile modelleme konusuna değinilmiştir.

6.1 Silikon Ped Malzemesi ve Hazırlanışı

Kullanılan silikon; protez kol, kol bacaklarda, bebek malzemelerinde (örneğin emzik, suluk), özel kıyafet ve ayakkabılarda (örneğin ayak taban desteği) gıda sektöründe (kek kalıbı gibi) kullanılmaktadır. Bu silikon TSE tarafından gıda ve sağlık ürünlerinde kullanılmasına izin verilen zaman içerisinde yapısı değişime uğramayan biyouyumlu (vücuda temasında herhangi bir zarar vermeyen) bir malzemedir.

Silikon ped için kullanılan malzeme dimethylvinylpolydimethylsiloxane bazlı A ve B bileşeni ile silikon yağı (inceltici)'dir, Şekil 6.1. A ve B bileşeninin aynı oranda karıştırılması ile jelimsi bir yapı oluşmaktadır. Bu yapıya hapsolan hava kabarcıkları vakumlama ile dışarı atıldıktan sonra (Şekil 6.2), karışım kalıplara dökülür, Şekil 6.3. Döküldüğü kabın şeklini alan karışım fırınlanarak katı hale getirilir, Şekil 6.4.

Döküm öncesi silikon karışımı bir vakum pompası ile karışımdaki hapsolan havayı dışarı tahliye edilerek ön hazırlık yapılmaktadır, Şekil 6.1 – 6.2. Hazırlana karışım kalıplara dökülerek fırınlanmakta ve sıcaklığı kontrol edilerek katılaşması sağlanmaktadır, Şekil 6.3 – 6.4.



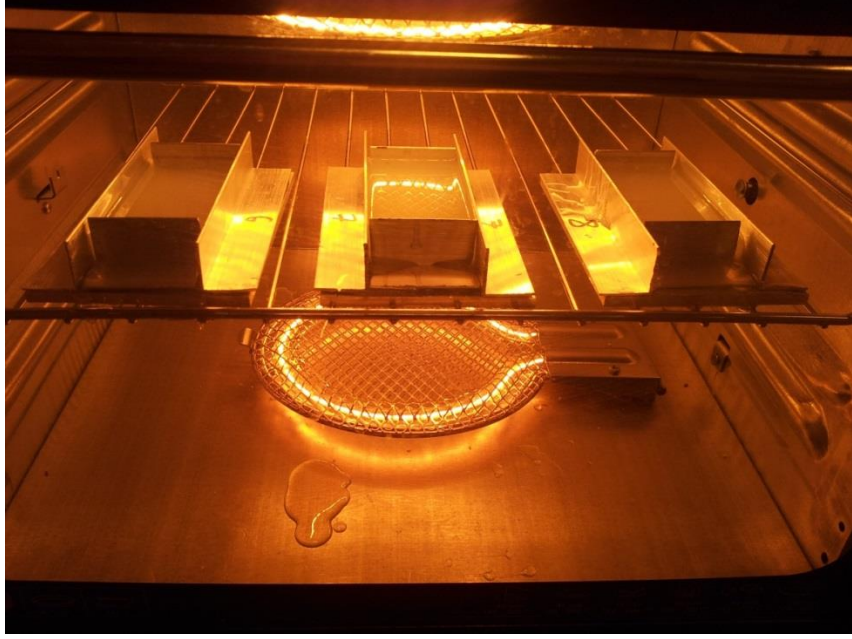
Şekil 6.1 Silikon ped karışımın hazırlanma gereçleri: Hassas tartı, karışım haznesi ve karıştırıcılar



Şekil 6.2 Döküm öncesi silikon karışımın hazırlanışı: Vakumlama sistemi bir vakum pompası ile karışımdaki hapsolan havayı dışarı tahliye edilmesi



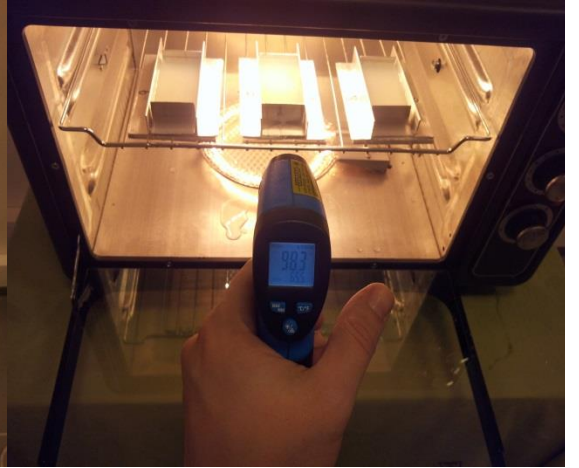
Şekil 6.3 Silikon ped döküm kalıpları



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.4 a. b. c. Kalıplara dökülmüş silikon karışımı sıcaklığı kontrol edilerek fırınlanması

6.2 Deney Düzeneğinde Kullanılacak Silikon Ped

Ortaya çıkan silikon pedin yumuşaklığı yani elastik modülü karışımın içine katılan inceltici yani silikon yağı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Silikon pedin şeffaflığının ise fırınlama süresi ve sıcaklığı ile kalıp malzemesine göre değiştiği gözlemlenmiştir.

Farklı döküm kalıpları ile yapılan deneylerde pedin temas yüzeyinde cam olduğunda daha şeffaf bir ped ortaya çıktığı görülmüştür Şekil 6.5 – 6.6.

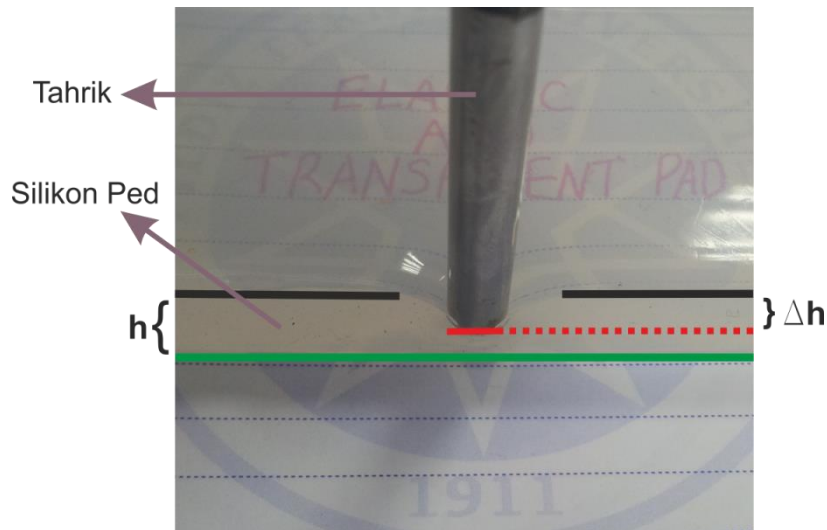
Şekil 6.7’de görüldüğü üzere silikon pede dışarıdan uygulanan bir tahrik ile ped yüzeyinde bir yer değiştirme (deplasman) oluşmaktadır.



Şekil 6.5 Pedin şeffaflığı



Şekil 6.6 Pedin ışık geçirgenliği



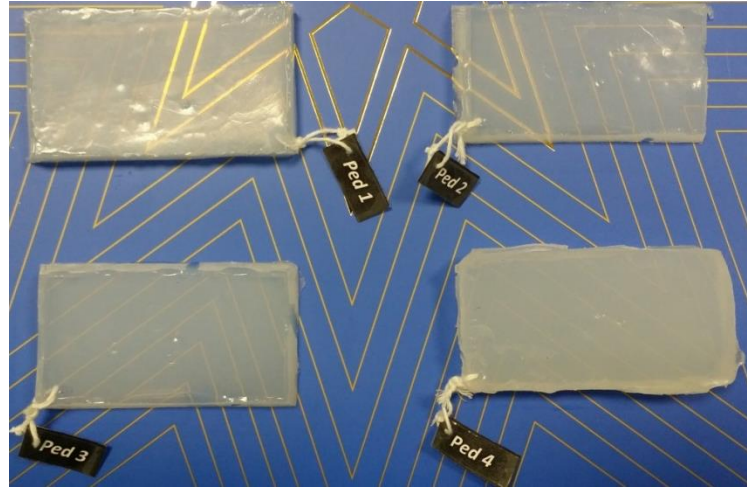
Şekil 6.7 Tahrik ile yer değiştirme (deplasman) oluşumu

6.3 Deney Düzeneğinde Kullanılacak Silikon Pedin Analizi

Farklı karışım oran ve süreçlerinde üretilen silikon pedler Ek B Çizelge B.3'te verilmiştir. Her bir silikon ped; farklı elastik modüle, yay sabitine, sönüm katsayısına ve şeffaflığa sahiptir ve homojendir.

6.4 Üretilen Silikon Pedler

Yapılan silikon dökümleri ile onlarca farklı karışım oranlarında silikon ped elde edilmiştir. İnsan dokusuna en yakın sonuç veren kombinasyonun 1 birim A, 1 birim B bileşeni ile 2 birim silikon yağının karışımı olduğu tespit edilmiştir. Malzemenin katılaşmasının ortam sıcaklığında ve kalıp malzemesinin cam olması durumunda ortaya çıkan pedin, hem daha şeffaf hem de daha homojen olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu karışım oranına yakın oranlarda ve cam kalıplara dökülerek ortam sıcaklığında katılaşması beklenerek 4 farklı silikon ped üretilmiştir, Şekil 6.8, Çizelge 6.1.



Şekil 6.8 Üretilen ve seçilen silikon pedler

Çizelge 6.1 Silikon pedler ve kalınlıkları

Ped No	Kalınlık
Ped 1	$h_1=10.32$ mm
Ped 2	$h_2=7.10$ mm
Ped 3	$h_3=10.55$ mm
Ped 4	$h_4=14.12$ mm

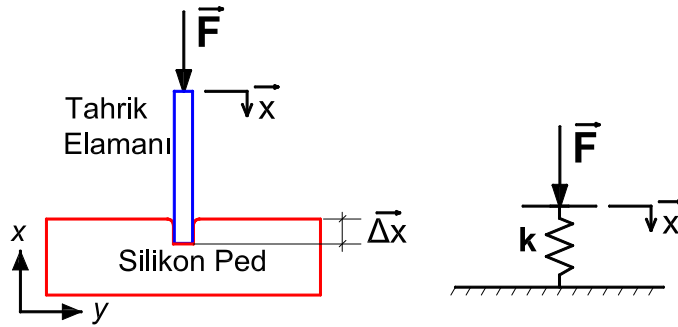
6.5 Elastik Silikon Pedin Mekanik Özellikleri

Normal şartlar altında, yani ortam sıcaklığında, 1 atm basınç altında ve plastik deformasyona geçmeyecek tahrik kuvveti aralığında çalışıldığı kabulü ile silikon pedin mekaniğinin bir yay sabitine 'k' sahip olduğu düşünülmüştür, Şekil 6.9. Elastik pedin sergilediği yay davranışının doğrusal olduğu kabul edilmiştir.

Doğrusal bir yaya tek eksende uygulanan bir kuvvetin denklemi aşağıdaki gibidir, 6.1. Bu durumda yay sabiti 6.2'deki gibi hesaplanabilir.

$$F = -k \Delta x \quad (6.1)$$

$$k = -\frac{F}{\Delta x} \quad (6.2)$$



Şekil 6.9 Silikon pedin yay sabiti

Üretilen algılayıcıda uygulanacak tahrik noktasal olmayacağından, yer değiştirmeyi tek bir noktaya indirgeyip, tek bir yay üzerinden kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki kurulması doğru sonuç vermeyecektir.

Uygulanan tahrikin geometrisine bağlı olarak yay ile kuvvet arasındaki ilişki r yarıçaplı silindirik bir tahrik elemanı için efektif elastisite modülü (E^*) üzerinden kurulabilir.

(Efektif elastisite modülü; kuvveti uygulayan cismin elastisitesi, poisson oranı ile kuvvet uygulanan cismin elastisitesi ve poisson oranına bağlıdır.)

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \varepsilon \quad (6.9)$$

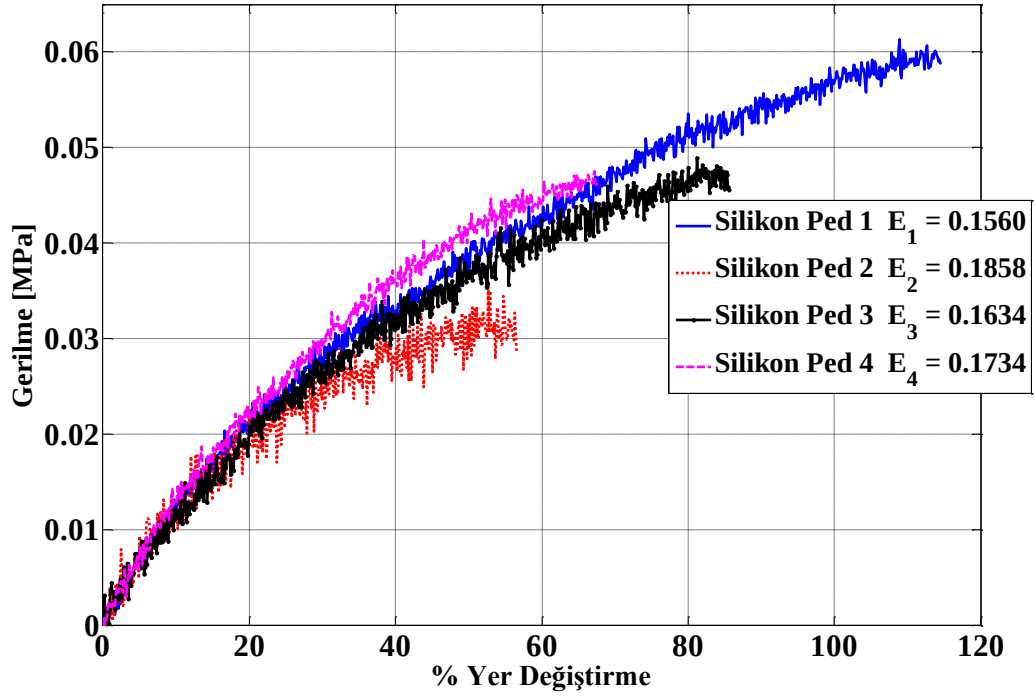
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (6.10)$$

$$k = 2r E^* \quad (6.11)$$

6.6 Elastik Modül Deneyleri

Farklı içerikteki ve farklı süreçler ile elde edilen silikon pedlerin elastik modül değerini bulmak için ortam sıcaklığında (25 °C) çekme deneyleri yapılmıştır, Şekil 6.10.

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere yay sabiti değeri elastik modülü verisi üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 6.10 Silikon pedlerin çekme deneyleri ve elastik modül değerleri

6.7 Silikon Pedin Poisson Oranı – γ

Malzemenin tek boyutlu yük etkisi altında deformasyonu sonucunda, yüke dik yönde de deformasyona sebep olmaktadır. Malzemenin enine kılmanın boyuna uzamaya olan oranına poisson oranı – γ denir. Poisson oranı kesinlikle 0.5 değerini geçemez. Bununla birlikte lastik benzeri malzemelerin poisson oranı 0.5'e yakındır.

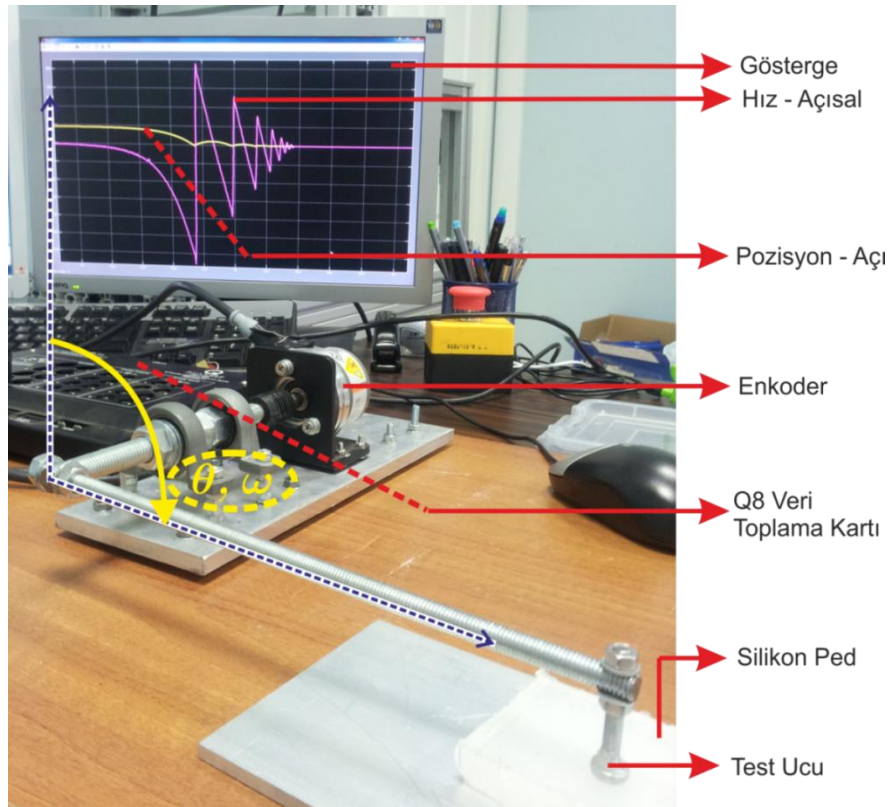
Silikon lastik için poisson oranı 0.48 ile 0.5 arasında bir değerdir [92]. A, B bileşenleri ve silikon incelticisinin 1:1:2 oranında kullanıldığı silikon lastiği için yapılan deneysel ve teorik bir çalışmada poisson oranının 0.499 olduğu ortaya çıkarılmıştır [93]. Tez kapsamında üretilen silikon pedler de aynı oranda olduğu için silikon pedin poisson oranı $\gamma=0.499$ olarak kabul edilmiştir.

6.8 Sönüm Katsayısı Deney Düzeneği

Silikon pedlerin sönüm katsayısının bulunması için ayrıca bir deney düzeneği tasarlanmış ve kullanılmıştır, Şekil 6.11. Bu deney düzeneğinde farklı çaplara sahip küresel test ucu bir kol vasıtasıyla çeşitli açılardan serbest düşme yaparak pede çarpmakta ve sekmektedir. Bu kol, açı ölçümü yapan bir enkodere, rulmanlı yataklar üzerinden bağlanmıştır. Ölçülen açının ' θ ' türevi alınarak açısal hız ' ω ' elde edilmiştir.

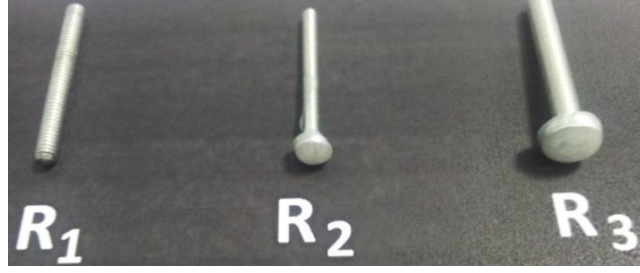
Kolun ucunda darbeyi gerçekleştiren uç bulunmaktadır. Bu uç takılıp çıkarılabilir olduğunda farklı uçlar ile deney yapabilme imkânına sahiptir. Açığı 0.036 derece hassasiyette ve 100 Hz hızında ölçen optik kodlayıcı Q8 USB üzerinden Matlab&Simulink programına bağlıdır.

Açını türevi alınarak açısal hızda hesaplanmaktadır. Yapılan deneyler, açı ve açısal hız bilgisi ölçülerek ve kaydedilerek farklı uçlar için silikon pedlere uygulanmıştır.



Şekil 6.11 Sönüm katsayısı hesaplama deney düzeneği

Deneylerde farklı çaplardaki küresel yapıdaki test uçları kullanılmıştır Şekil 6.12.



Şekil 6.12. Sönüm katsayısı deneyleri test uçları: farklı çaplardaki küresel başlar

Yapılan deneyler göstermiştir ki R_1 olarak resmedilen küçük yarıçaplı test ucu silikon pede zarar vermekte yani plastik deformasyona sebep olmaktadır. Silikon ped için yapılan hesaplarda R küçük (R_1) ile yapılan deney sonuçları değerlendirmeye alınmamıştır. Kullanılan test uçlarının yarıçapları $R_1 = 2 \text{ mm}$, $R_2 = 4 \text{ mm}$, $R_3 = 5 \text{ mm}$ uzunluğundadır.

6.8.1 Sönüm Katsayısının Hesaplanması

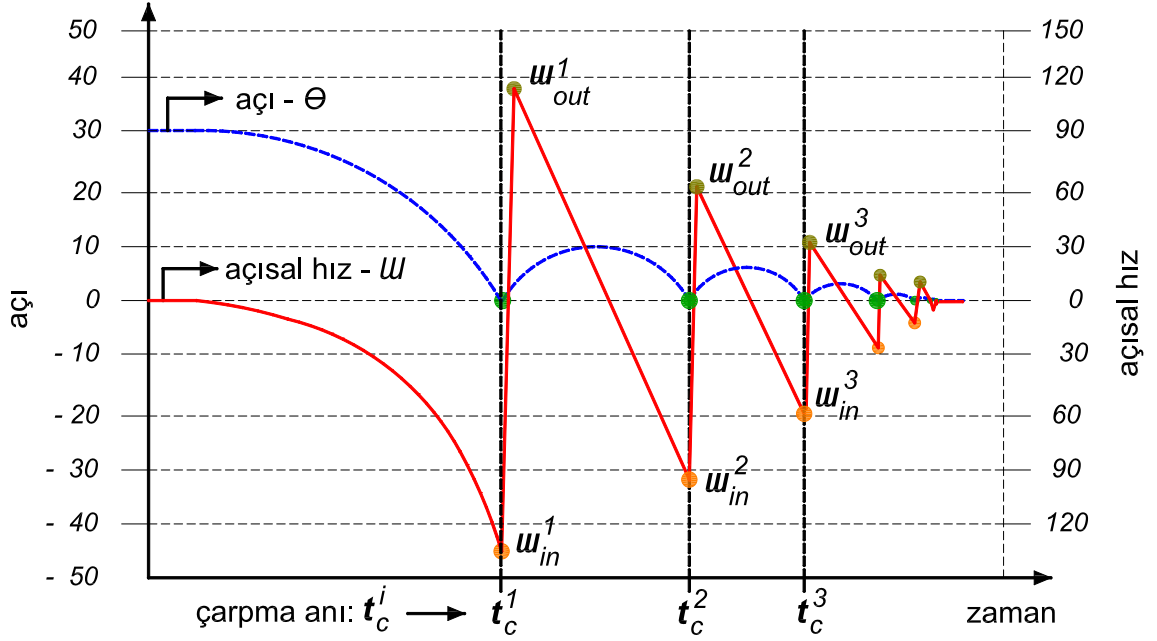
Elastik silikon pedin sönüm katsayısını hesaplamak için Şekil 6.11’de görülen deney düzeneğinde gerçekleştirilen deneylerde Şekil 6.13’deki gibi grafikler elde edilmektedir. Bu deneylerde yaklaşık 30 dereceden serbest bırakılan test ucu 0 derecede silikon ped ile temas etmekte ve çarpma gerçekleşmektedir. Çarpışma sonrası test ucu sekerek geri zıplamakta ve bu işlem zıplamalar bitene kadar devam etmektedir. Deneylerde zaman, açı ve açısal hız ölçümü yapılmaktadır.

Sönüm katsayısı, silikon pede çarpan ucun çarpmanın hemen öncesindeki hızının çarpmanın hemen sonrasındaki hızına oranı olarak kabul edilmiştir. Bir deneyde n tane zıplama olduğu düşünülürse o silikon pedin sönüm katsayısı zıplamalardaki hız değişim oranının aritmetik ortalamasıdır.

Başka bir ifade ile silikon pedin sönüm katsayısı çarpma anı sonrası açısal hızın çarpma anı öncesi açısal hıza oranıdır. Çarpmanın t_c anında gerçekleştiği ve $n=3$ adet efektif zıplamanın gerçekleştiği kabulüyle sönüm katsayısı ilk 3 zıplamadaki hızın azalma oranının aritmetik ortalamasıdır, (6.12-6.15).

Deneylerin gerçekleştirildiği düzeneğinde yataklamaya, sürtünmeye hava direncine vb. bağlı olarak bir sönümü olduğu düşünülmüştür. Bunu hesabı için sönümü 0 kabul

edilen ve silikon pedler ile aynı geometriye sahip bir mermer blok ile sönüm oranı deneyleri tekrarlanmıştır.



Şekil 6.13 Sönüm katsayısı deneylerindeki nicelikler ve anlamları

$$\varepsilon \ll 1 \quad (6.12)$$

$$\omega_{out}^i = \omega(t_c^i + \varepsilon) \quad (6.13)$$

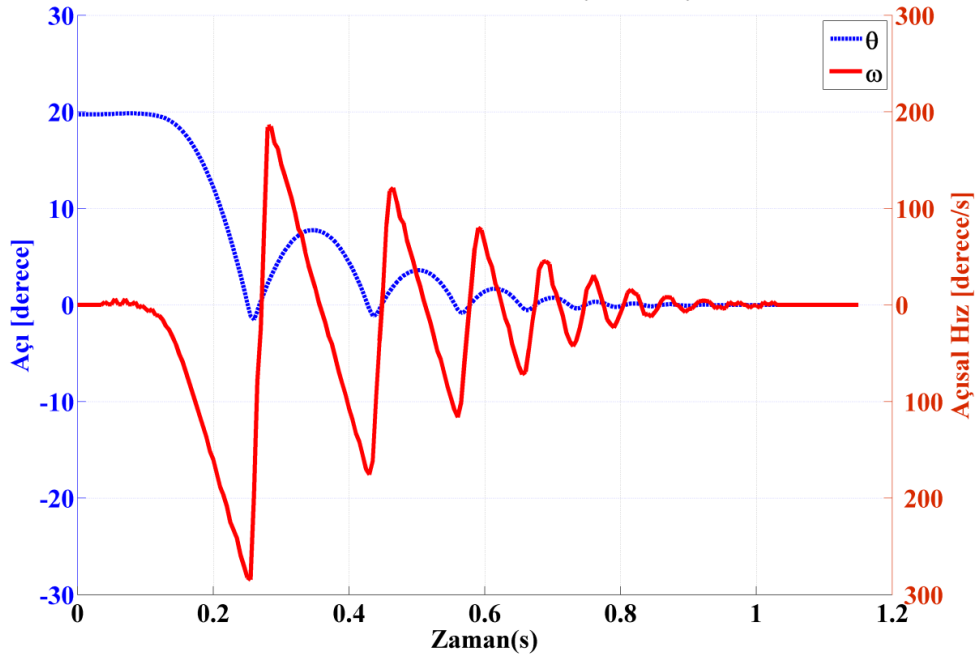
$$\omega_{in}^i = \omega(t_c^i - \varepsilon)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} \left| \frac{\omega_{out}^i}{\omega_{in}^i} \right|}{n} \quad (6.14)$$

Bu deneylerin amacı sönüm katsayısı deney düzeneğinin, sönüm katsayısını hesaplamaktır. Burada elde edilen sönüm katsayısı değeri silikon ped için hesaplanan sönüm katsayısı değerinden çıkılarak sadece silikon pedin sönüm katsayısı elde edileceği düşünülmüştür.

Sonuç olarak deney düzeneğinin sönüm katsayısı 0.3533 olarak bulunmuştur. Ped 1 için yapılan deneylerden birine aşağıda yer verilmiştir, Şekil 6.14. Her bir ped için üçer adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde elde edilen ilk üç çarpma için sönüm katsayısı hesaplanmış ve hepsinin ortalaması alınarak silikon pedin sönüm katsayısı hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerden deney düzeneği sisteminin sönüm katsayısı çıkarılmış ve sonuç olarak silikon pedlerin sönüm oranları elde edilmiştir.



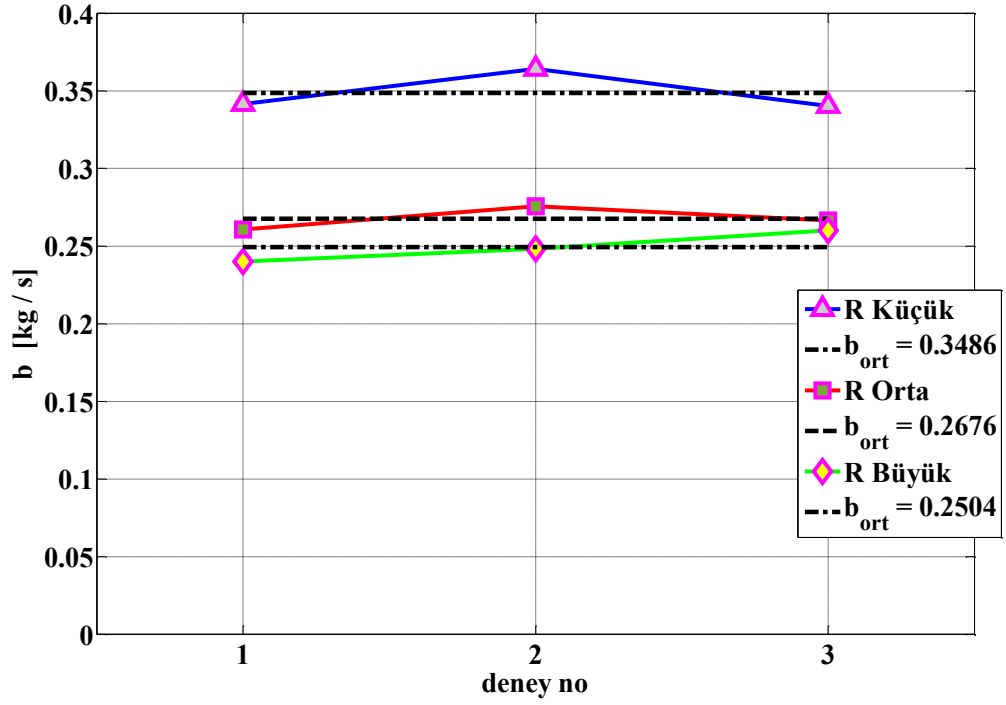
Şekil 6.14 Ped 1 için sönüm katsayısı deneyi grafiği

Yapılan çalışmalarda küçük yarıçaplı test ucu ile elde edilen sonuçlarda silikon ped üzerinde kalıcı şekil değiştirme olduğu yani plastik deformasyon olduğu gözlenmiştir. Elde edilen veri ile yapılan analiz sonuçlarda orta ve büyük yarıçaplı test ucu için yakın bir değere ulaşılırken küçük yarıçaplı test ucu için farklı bir sonuca ulaşılmaktadır. Her bir 4 ped için bu sonuç böyledir. Ped 1 için farklı test uçları ($R_1 = 2$ mm, $R_2 = 4$ mm, $R_3 = 5$ mm) için elde edilen sönüm katsayısı değerleri aşağıda gösterilmiştir, Şekil 6.15.

Sonuç olarak her bir ped için orta ve büyük yarıçaplı test ucu ile yapılan deney sonuçlarının ortalaması alınarak bu değerden sistemin sönüm katsayısı da çıkarılarak nihai sönüm katsayısına ulaşılmaktadır, Çizelge 6.2.

Buradan elde edilen önemli bir sonuçta elastik deformasyon sınırları içerisinde ve çalışmanın devamında kullanılacak tahrik elemanlarının çapları için, sönüm katsayısının tahrik yarıçapına bağlı olmadığı kabul edilebileceğidir.

Sonuç olarak yapılan matematiksel modellemede sönüm katsayısı tahrik geometrisinden bağımsız olarak sabit bir değer olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6.15 Farklı test uçları ile ped 1 için sönüm katsayısı değerleri

4 silikon ped için yapılan tüm deney ve hesaplamalar sonrasında elde edilen mekanik özellik bilgileri Çizelge 6.2’de ki gibidir.

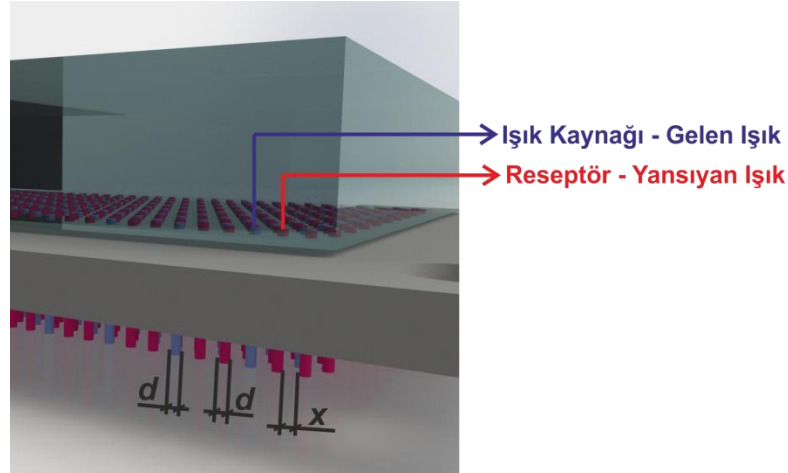
Çizelge 6.2 Silikon pedlerin mekanik özellikleri

	Elastisite (Young Modülü) [MPa]	Sönüm Katsayısı [kg/s]
Ped 1	$E_1 = 0.1560$	$b_1 = 0.2591$
Ped 2	$E_2 = 0.1858$	$b_2 = 0.3068$
Ped 3	$E_3 = 0.1634$	$b_3 = 0.3702$
Ped 4	$E_4 = 0.1734$	$b_4 = 0.3689$

Dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneğinde kullanılmak üzere **Ped 1** seçilmiştir. Tezin devamındaki analizlerde Ped 1 kullanılmıştır.

6.9 Dokunma Hissi Algılayıcısının Silikon Pede Bağlı Özellikleri

Dokunma hissi algılayıcısında reseptör olarak kullanılacak fiber kabloların çapı $d = 0.75$ mm'dir. Reseptörler arası mesafe $x = 1$ mm'dir, Şekil 6.16.



Şekil 6.16 Dokunma sensörünün geometrik ve ölçüm çözünürlüğünün hesaplanması

Her bir reseptörün yüzey alanı yani ölçme yaptığı alan aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 0.441 \text{ mm}^2 \quad (6.15)$$

Seçilen silikon malzemenin elastisite modülü $E = 0.1560 \text{ N/mm}^2$ (Mpa) olarak hesaplanmıştır. Bu durumda birim uzama için her bir reseptör üzerine düşen basınç aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$0.156 * 0.441 = 0.0688 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (6.16)$$

Birim uzama için 0.441 mm^2 alana 0.0688 N kuvvet gelmektedir. Birim uzama teorik olarak 255 seviyede ölçüleceğinden, üretilen sistemin baskı kuvvet ölçüm çözünürlüğü bir fiber optik kablo için $f_s = 0.0002698 \text{ N}$ 'dur.

$$f_s = \frac{0.0688}{255} = 2.698 \times 10^{-4} \text{ N} \quad (6.17)$$

1 cm^2 alan için ölçüm yapıldığı durumda, 1 cm^2 yüzey alanında birim uzama için gerekli olan kuvvet 15.60 N olmaktadır.

$$0.1560 \cdot 100 = 15.60 N \quad (6.18)$$

Toplam 255 seviye ile ölçüm yapılacağından algılayıcının 1 cm^2 alan için kuvvet ölçüm aralığı 0.0612 N , ölçüm aralığı ise $0.0612 \text{ N} - 15.6060 \text{ N}$ olmaktadır.

$$\frac{15.60}{255} = 0.0612 N \quad (6.19)$$

Sonuç olarak 1 cm^2 alanda teorik olarak; 0.0612 N ile 15.6060 N arasında 0.0612 N kuvvet çözünürlüğünde ölçüm yapılabilmektedir.

Tasarlanan dokunma sensörünün baskı basınç çözünürlüğü ise $p_s = 0.61 \text{ kPa}$ olarak hesaplanmıştır.

$$0.441 \text{ mm}^2 = 4.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \quad (6.20)$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{0.0002688 N}{4.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 609.52 Pa \cong 0.61 \text{ kPa} \quad (6.21)$$

Burada yapılan analizler silikon pedin elastik modül değerine ve kullanılan fiber kabloların çapına ve adetine bağlıdır. Bu özellikler sistemin kuvvet ölçüm çözünürlüğüne direk etkimektedir. Kuvvet bilgisi yer değiştirme bilgisinden, yer değiştirme bilgisi de parlaklık değişimi ölçümünden hesaplanmaktadır. Teorik olarak birim uzama 255 seviyede ölçülecektir. Fakat uygulamada daha sonra açıklanan çeşitli sebeplerde dolayı parlaklık değişimi 255 seviyede ölçülememiştir. Bu da kuvvet ölçüm çözünürlüğü düşürmektedir.

Geometrik çözünürlük ise silikon pede bağlı bir özellik değil tamamen kullanılan fiber optik kabloların çapına ve dizimine bağlıdır.

Sonuç olarak tasarlanan dokunma hissi algılayıcısında geometrik çözünürlük fiber optik kablo çapına ve elek yapısına bağlı iken kuvvet ölçüm çözünürlüğü görüntü işleme hassasiyetine yani birim uzamanın kaç seviyede algılandığına bağlıdır. Ölçüm aralığı ise silikon pedin elastik modülüne bağlıdır. Daha yüksek kuvvet değerleri aralığında ölçüm yapılmak istenirse daha yüksek elastikiyette bir silikon ped kullanımı kâfi gelecektir.

DOKUNMA HİSSİ ALGILAYICISI GELİŞTİRME DÜZENEGİ

Doktora tezi kapsamında belirlenen hedefler (insan parmak ucu hassasiyetinde geometrik çözünürlük) doğrultusunda aşağıdaki özelliklere sahip bir dokunma hissi algılayıcı geliştirme düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir.

- 32.5 mm x 71.68 mm = 23.11 cm² ölçüm alanı
- 257 Işık kaynağı
- 522 reseptör
- Toplam 779 fiber optik kablo
- 1.0 mm geometrik çözünürlük

7.1 Tasarım

Daha önceki çalışmalarda kazanılan tecrübi bilgiler ve hedefler doğrultusunda 2 ve 3 boyutlu tasarımlar ve teknik resimler bilgisayar yazılımları yardımıyla çizilmiştir.

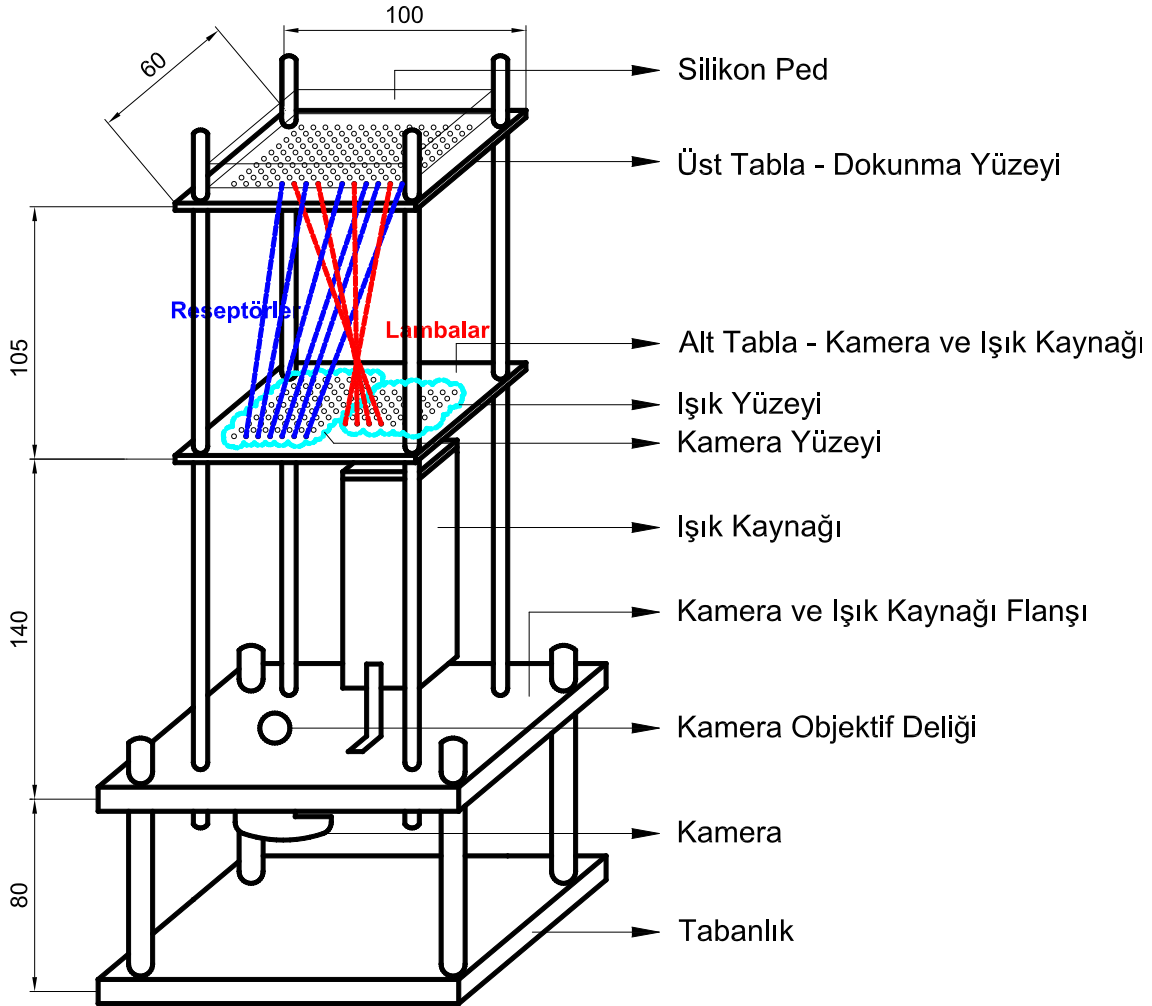
Tasarımın daha anlaşılır olması adına önce 3 boyutlu tasarım grafikleri sonrada 2 boyutlu tasarım grafikleri verilmiştir. Açıklayıcı bilgiler ve tanımlamalar 3 boyutlu grafiklere yerleştirilmiştir, Şekil 7.1.

7.2 Dokunma Hissi Algılayıcısı Geliştirme Düzeneği İmalatı

İmalatların çoğu Yıldız Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümü imalat atölyesinde ve tez yazarı ile danışmanı tarafından gerçekleştirilmiştir.

Algılayıcı üzerinde ışık kaynağını açan ve kapayan bir anahtar, ışık kaynağının parlaklığını kontrol eden bir potansiyometre bulunmaktadır. Algılayıcıya 1 giriş ve

sensörden de bir çıkış mevcuttur. Giriş 2 Amper, 12 VDC'lik bir doğru akım kaynağıdır. Çıkış ise kameranın USB'sidir. Tez kapsamında gerçekleştirilen dokunma hissi algılayıcısı bu sistemin bir bilgisayara bağlanması ile tamamlanmaktadır.



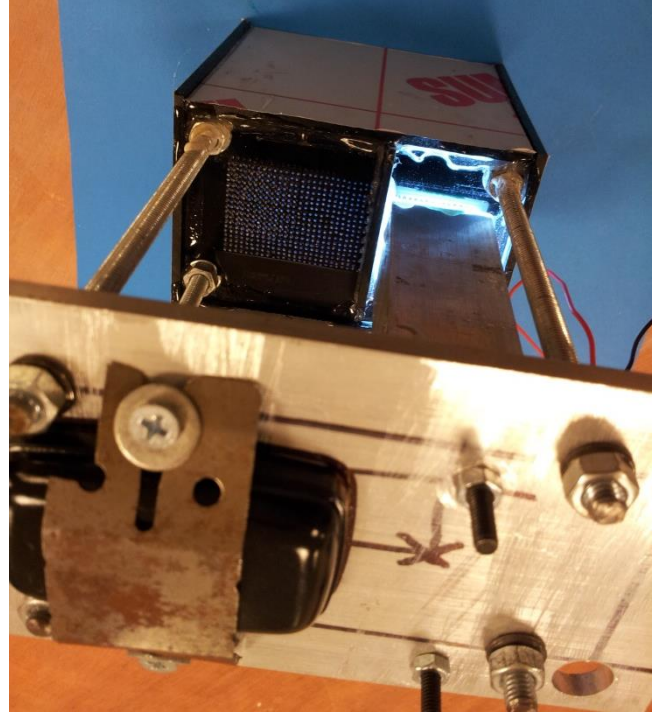
Şekil 7.1 Dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği iç yapısı

Tasarlanan yapı ve üretilen yapıya, tasarımda bahsi geçen unsurların yapı içerisinde nasıl yerleştiğine aşağıdaki şekillerde yer verilmiştir.

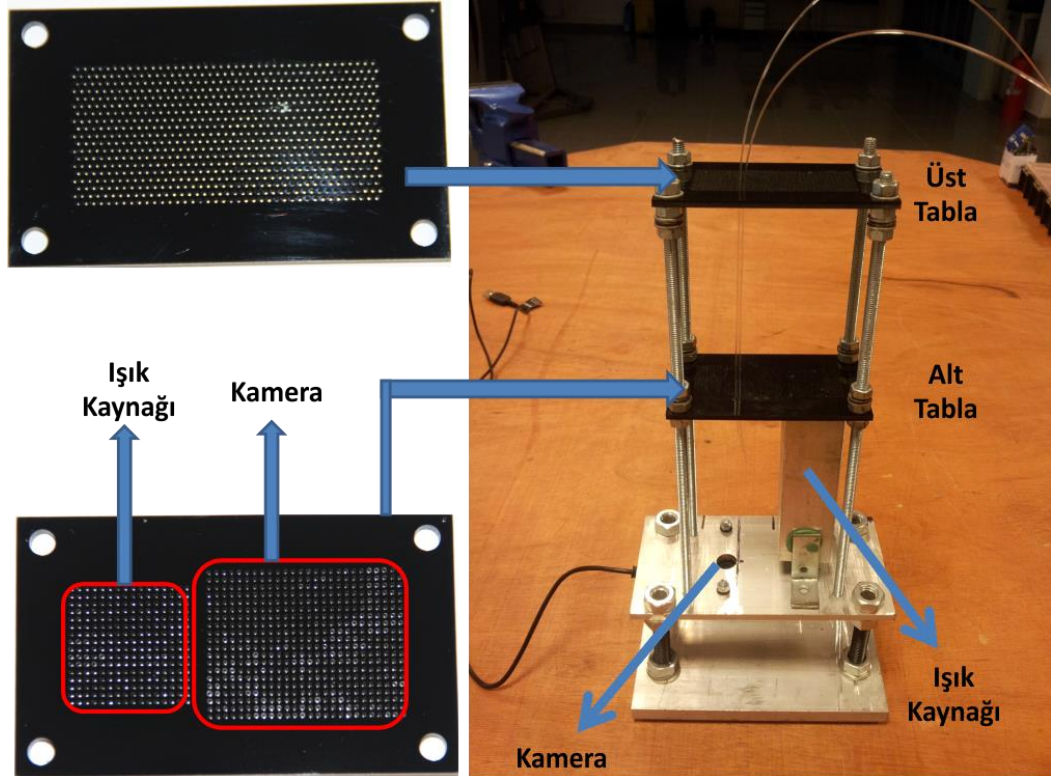
Kamera, ışık kaynağı, fiber optik kablolar, 3 boyutlu tasarım ve gerçekleştirilen sistem aşağıdaki resimlerde açıkça görülmektedir, Şekil 7.2 – 7.8.



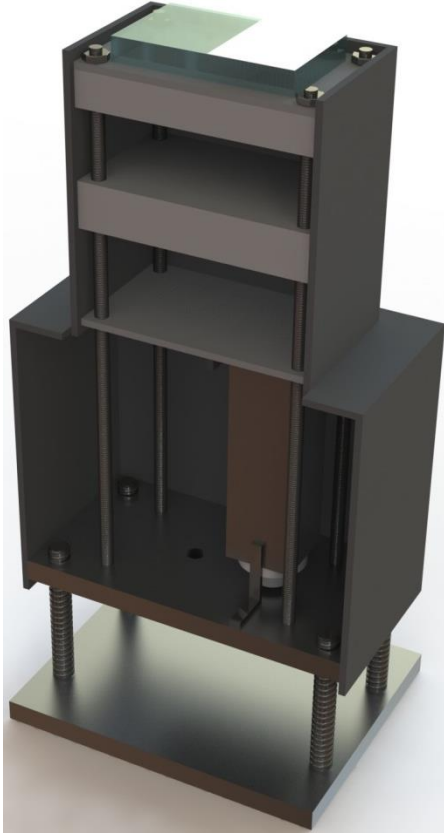
Şekil 7.2 Algılayıcı fiber optik kablo dizimi



Şekil 7.3 Algılayıcı alttan görünüş



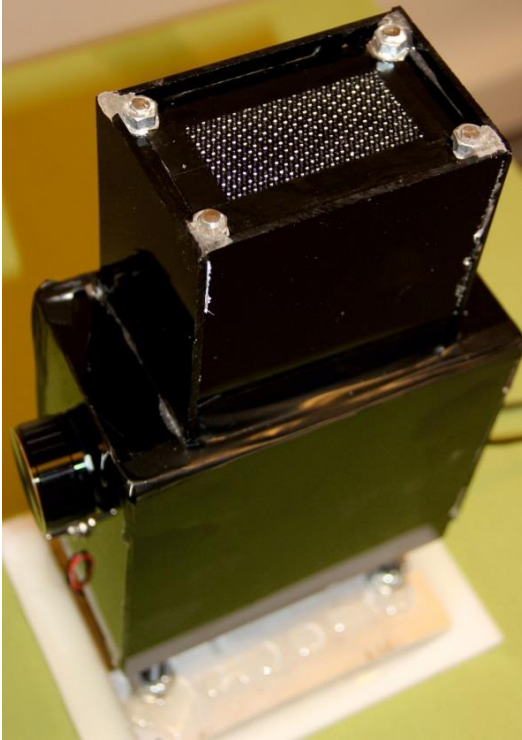
Şekil 7.4 Algılayıcı elek yapısı, kamera ve ışık kaynağı



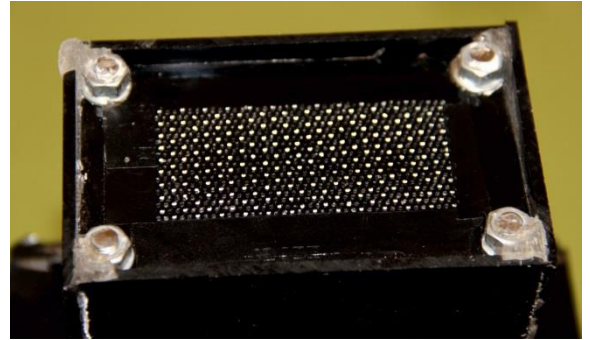
Şekil 7.5 Algılayıcının 3 boyutlu tasarımı



Şekil 7.6 Algılayıcı önden görünüş



Şekil 7.7 Algılayıcı üstten görünüş



Şekil 7.8 Algılayıcı ölçüm yüzeyi

7.3 Sistemin Teknik Özellikleri

Yapılan deney ve hesaplamalar sonrasında tasarlanan sensörün özellikleri Çizelge 7.1'deki gibi elde edilmiştir. Bu özelliklerin değerleri sensör yapımında kullanılan malzemelere göre değişebilir. Örneğin elastisitesi farklı olan bir silikon malzeme kullanıldığında baskı kuvvet ve basınç çözünürlükleri değişecektir. Aynı şekilde standart bit bilgisayar kamerası yerine hızlı kamere kullanılırsa örnekleme frekansı değişecektir. Bu Çizelgedeki değerler; silikon pedin elastik modülün 0.156 MPa olduğu, reseptör çapının 0.75 mm olduğu ve reseptörler arası mesafenin 1 mm olduğu durumlarda ve birim uzamanın 255 seviyede algılandığı durum için hesaplanmıştır.

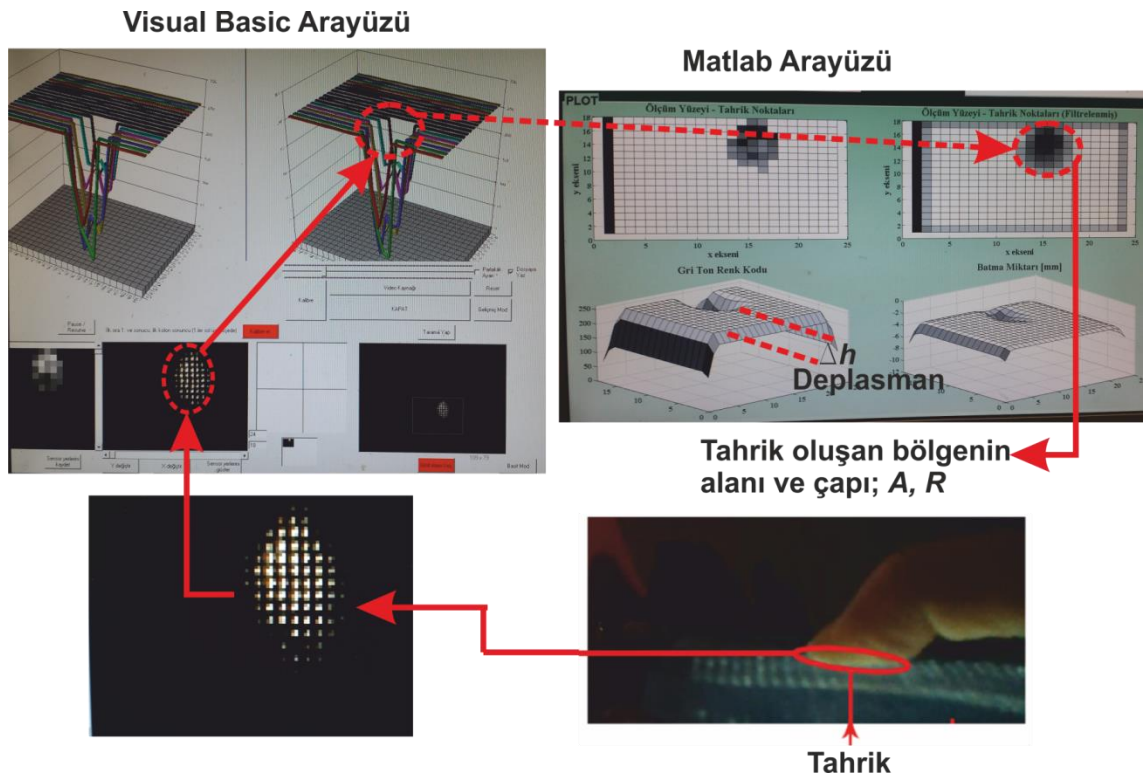
Çizelge 7.1 Sistemin teknik özellikleri

Özellik	Açıklama	Değeri
Ölçüm Yüzeyi	Algılama Yapılacak Yüzey Alanı	71.63 mm x 32.25 mm
Fiber Kablo Âdeti	Işık Kaynağı: Işığı İleten Reseptör: Yansıyan Işığı Taşıyan	Işık Kaynağı: 257 adet Reseptör: 522 adet
Reseptör Yoğunluğu	1 cm ² deki Reseptör Sayısı	~ 22 adet/cm ²
Birim Ölçüm Alanı	Reseptör Alanı	0.441 mm ²
Geometrik Çözünürlük	Reseptörler Arası Mesafe	1 mm
Örnekleme Frekansı	Web Cam Hızı	30 Hz
Gecikme	Yazılımın Bir Resmi İşleme Süresi	16 ms
Ölçüm Aralığı (Kuvvet)	1 cm ² için	0 N ile 15.6060 N
Kuvvet Çözünürlüğü	1 cm ² için	$f_s = 0.0612$ N
Basınç Çözünürlüğü	Bir Reseptör için	$p_s = 0.61$ kPa

7.4 Yazılım

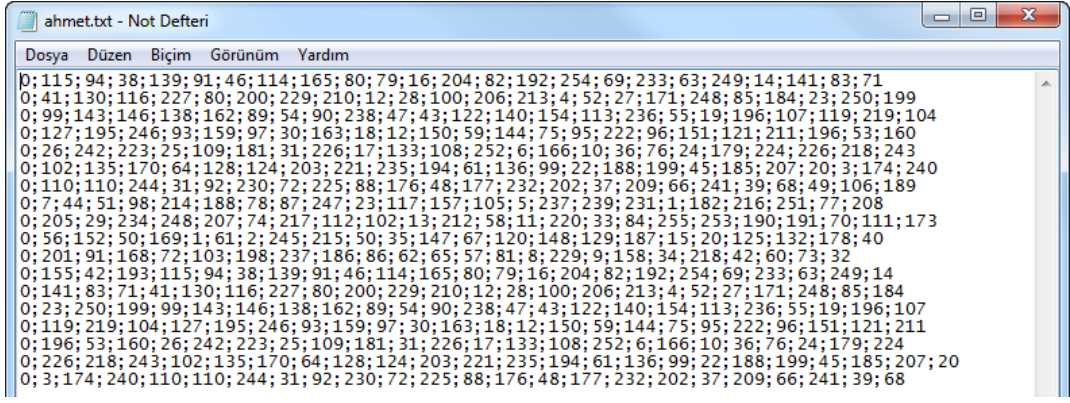
Tez kapsamında üretilen deney düzeneğinde silikon pede uygulanan tahrike bağlı olarak oluşan yer değiştirme (deplasman, batma miktarı – Δh) ölçülmektedir. Oluşan yer değiştirme (Δh) ölçümünde parlaklık değişiminden yararlanılmaktadır, Şekil 68.

Parlaklık değişimi ile yer değiştirme arasında bir model tanımlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen bu model yardımıyla tahrik bölgesindeki yer değiştirmeler elde edilmektedir. Deformasyon oluşan bölgenin alanı da ölçüldüğünden buradan kontak bölgesinin yarıçapı da hesaplanabilir, Şekil 68.



Şekil 7.9 Yazılım ve deney düzeneğinin birlikte çalışması ile dokumayı algılama ve ölçme

Visual Basic 6.0 programı ile geliştirilen yazılım, saniyede 30 kez kamera görüntüsünü işleyip her bir reseptöre karşılık gelen pikselin parlaklığını bir metin dosyasına matris formatında yazmaktadır, Şekil 7.10. Metin dosyasında son (18.) satır ve ilk (1.) sütundaki veri kartezyen koordinat sisteminde 0,0 noktası olarak kabul edilmektedir. Matriste satır 18, sütun 24 adettir. Yani toplamda 432 noktadan ölçüm yapılmaktadır. Sistem mekaniğinde 522 adet reseptör olmasına rağmen bazı ölü pikseller ve kalibrasyonlar sonucu 432 reseptörden sağlıklı olarak ölçüm yapılmaktadır.

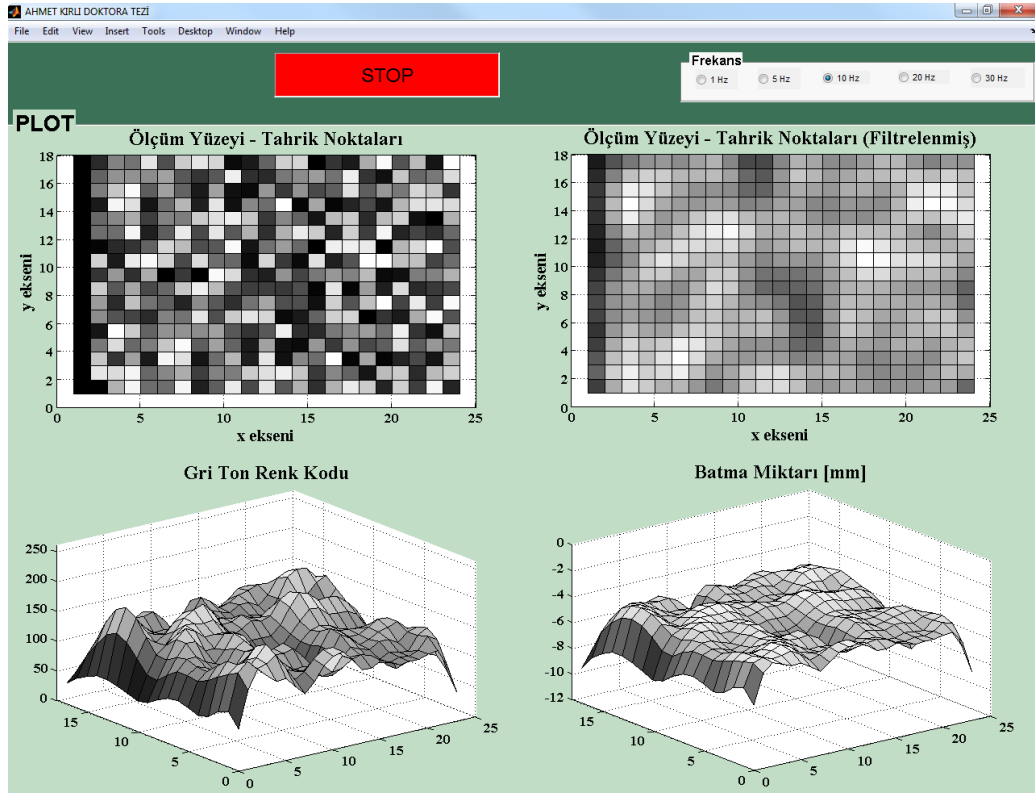


Şekil 7.10 Görüntü işleme yazılımından gelen metin dosyası

7.4.1 Matlab GUI (Grafik Ara Yüzü)

Saniyede 30 kez yeni verilerin yazıldığı metin dosyasını içe aktaran bir Matlab GUI (grafik ara yüz) hazırlanmıştır, Şekil 7.11.

Hazırlanan matlab programı, metindeki verileri içe aktararak gerekli traspoze işlemlerini yaparak algılayıcı yüzeyinin sol alt köşesini kartezyen koordinat sistemindeki 0,0 noktası olarak ayarlamaktadır. Bu dönüşüm işlemleri akabinde metinden Matlab programına aktarılan ışık şiddeti verileri bir Gaussian filtresinden geçirilmektedir.



Şekil 7.11 Matlab Programı ara yüzü

7.4.2 Matlab ile Görüntü Filtreleme

Filtreleme resmin üzerinde bir filtre varmış gibi düşünüp her piksel değerinin yeniden hesaplanmasıdır. Filtreleme sayesinde görüntü üzerinde netleştirme, belirli ayrıntıları ortaya çıkarma, görüntüyü yumuşatma, kenar keskinleştirme veya kenar bulma gibi işlemler gerçekleştirilebilir.

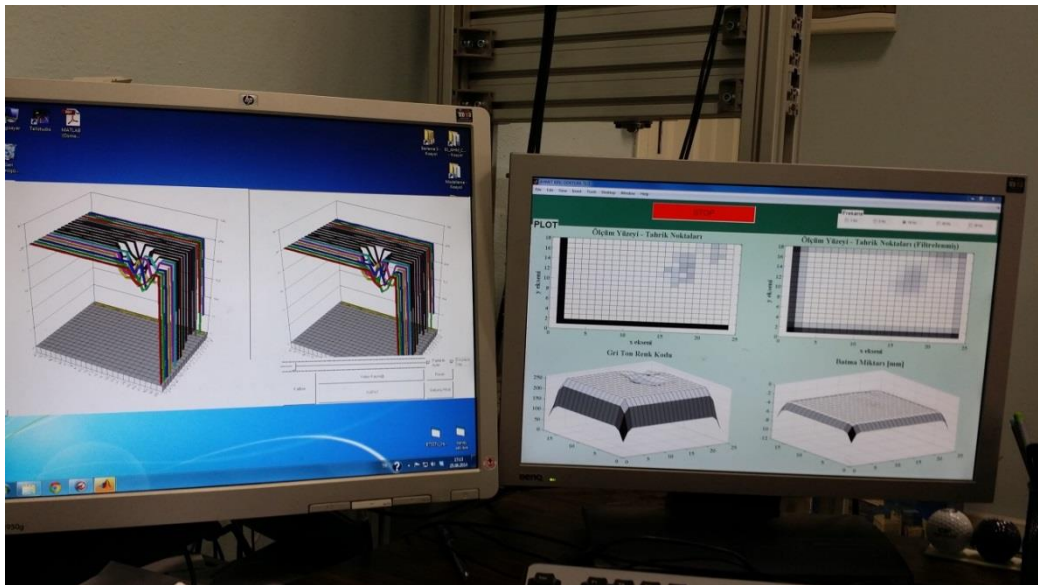
Görüntü yumuşatma operatörü olarak 2 boyutlu Gaussian filtreleme kullanılmıştır. Bu filtre aslında bir alçak geçiren filtre gibi çalışmaktadır. Hem gürültüyü engellemekte hemde görüntü üzerinde kullanıldığında görüntüyü yumuşatmaktadır. Gaussian filtre aynı zamanda bir fourier dönüşümüdür.

Filtreden geçen veriler 3 boyutlu olarak çizdirilmektedir. Bu çizimin adı gri tonlamalı kod olarak verilmiştir. Herbir gri kod bir parlaklık miktarına eşittir, Şekil 7.12.

Parlaklık miktarı ile yer değiştirme arasında bir matematiksel model tanımlanmıştır. Bu model uygulandığında gri tonlamalı kod üzerinden temas yüzeyindeki yer değiştirme (batma miktarı) dağılımı elde edilmektedir.

Önceki bölümlerde elde edilen silikon pedin mekanik özellikleri ile burada elde edilen anlık yer değiştirme ve yer değiştirme hızı bilgisi kullanılarak temas yüzeyindeki kuvvet ve basınç dağılımı hesaplayacak bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Matematiksel modelleme çalışmalarına sonraki bölümlerde değinilmiştir.



Şekil 7.12 Matlab GUI üzerinden sistemin eş zamanlı olarak çalışması

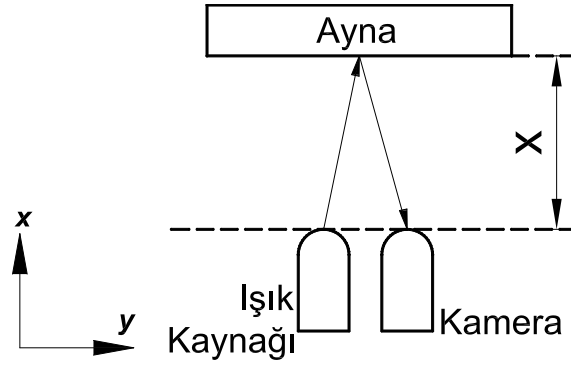
IŞIK ve YANSIMA

Tasarlanan ve üretilen dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneğinde ölçülen nicelik ışık parlaklığı bir diğer ifade ile ışık şiddeti seviyesidir. Işık parlaklığı değişimi ile uygulanan tahrikin sebep olduğu batma miktarı yani yer değiştirme (deplasman) arasında bir ilişki mevcuttur. Bu ilişki ile elde edilen yer değiştirme, deplasman veya batma miktarı bilgisi üzerinden uygulanan tahrikin kuvveti yani kontak/ölçme yüzeyindeki kuvvet haritası ortaya çıkarılmaktadır. Bu bölümde hem parlaklık değişimi hem de parlaklık değişimi ile yer değiştirme arasındaki ilişki üzerinde durulmuştur.

8.1 Parlaklık Değişimi Ölçümünün Çözünürlüğünün Arttırılması

Parlaklık değişimi ölçümünün yapılacağı ideal çalışma alanı (aralığı) ışık kaynağından çıkan ışık şiddeti ile orantılıdır. Şekil 8.1’de görüldüğü üzere farklı kaynak ışık şiddetleri altında aynalar yardımıyla deneyler yapılarak verimli ölçümün yapılacağı mesafe ve aralık bulunmaktadır. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere görünür ışık ile yapılan ölçümlerde çevresel ışıklar bozucu etki yapmaktadır. Kızılötesi ışık kullanılarak bu problemin çözüleceği öngörülmektedir.

Bu yapılan deney ile 2 sonuç hedeflenmektedir. İlk olarak parlaklık değişimine bağlı olarak mesafenin bir diğer ifade ile yer değiştirmenin arasındaki modelin ortaya çıkarılmasıdır.

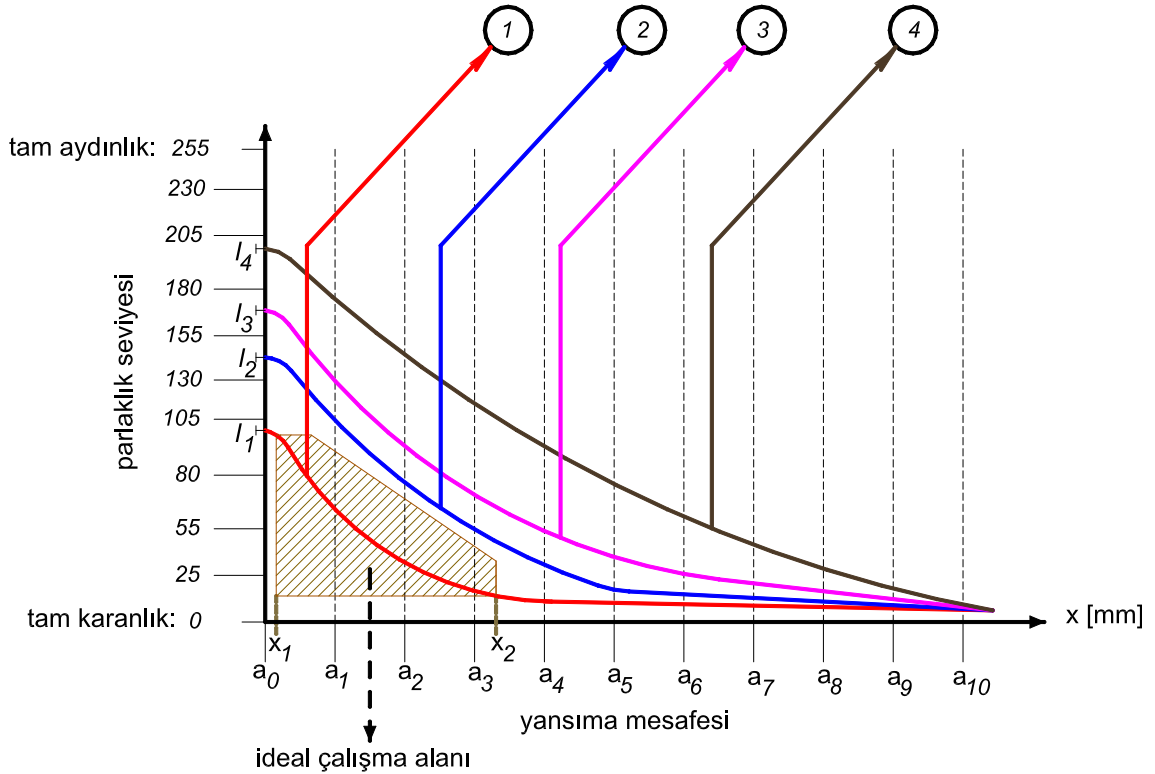


Şekil 8.1 Yer değiştirmeye bağlı parlaklık değişiminin tespiti deneyi

$$\vec{x}(t) = \text{fonk}(\Delta l(t)) \quad (8.1)$$

Bu konuya ileride değinilecektir.

İkinci olarak hangi mesafe aralığında parlaklık değişiminin daha iyi ölçülebildiği gözlemlenmiştir. Bu gözlemin sonucunda hangi mesafe aralığında ve hangi ışık şiddeti altında daha iyi ölçüm yapılacağı ve parlaklık değişimi algılamanın çözünürlüğünün artacağı ortaya çıkmaktadır, Şekil 8.2.

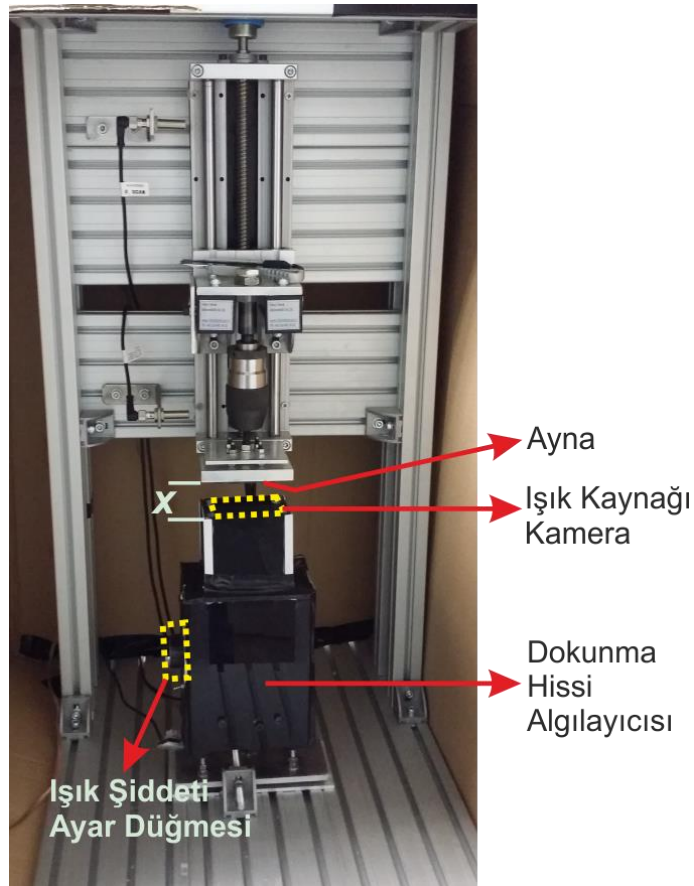


Şekil 8.2 Işık deneyleri grafiği

8.1.1 Işık Deneyleri ve Deney Algoritması

Deneyler Şekil 8.3'te görülen deney düzeneğinde, deney düzeneğinin etrafı ışık geçirgenliği çok düşük malzeme ile izole edilmiş şekilde kapalı ve gece karanlığında gerçekleştirilmiştir.

Her bir deney 2 saniye sürmektedir. Örnekleme frekansı 10 Hz'dir. Her bir örnekleme zamanında ölçülen en parlak 20 noktanın değerinin ortalaması kaydedilmiştir. 2 saniyede toplam 20 kere bu işlem gerçekleştirilmiştir ve bu veri kaydedilmiştir. Deney sonunda 20 adet ortalama en parlak noktanın da ortalaması alınmıştır. Her bir deneyde elde edilen bu ortalama değer, o deneydeki aynanın konumu ve kaynak ışık şiddeti seviyesi için yansıyan ışığın parlaklık şiddeti değeridir.



Şekil 8.3 Işık deneyleri deney düzeneği

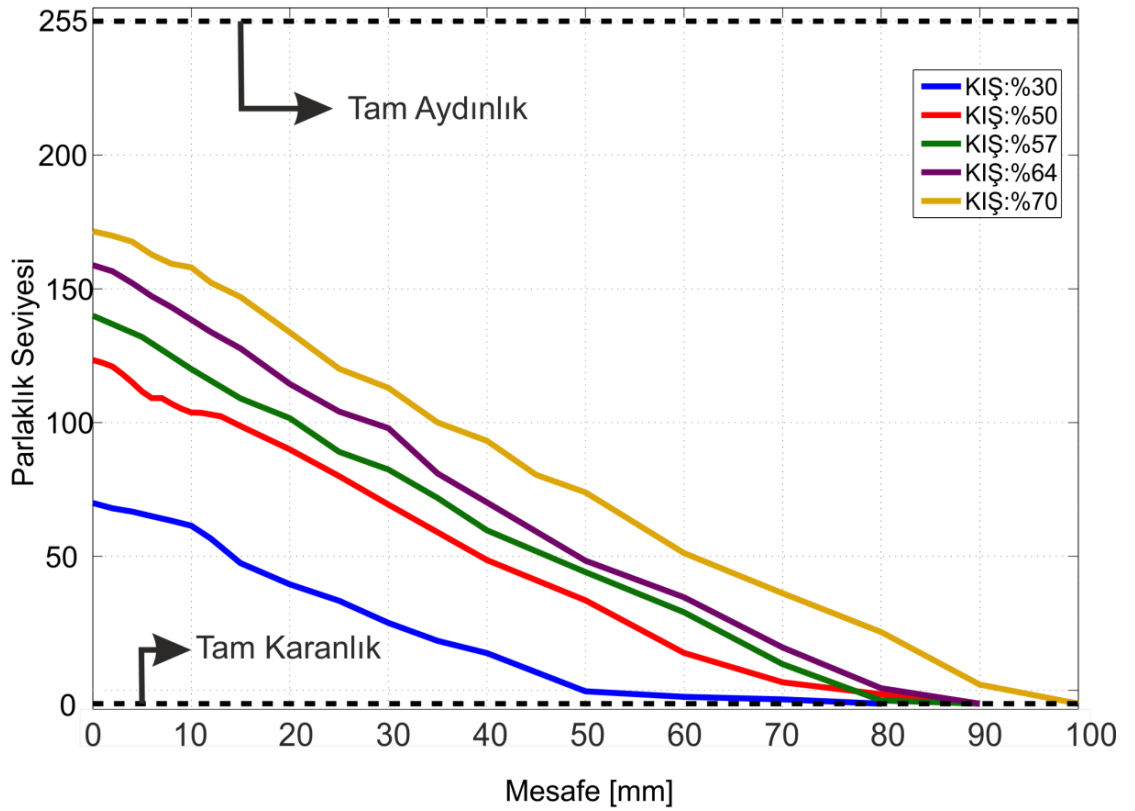
5 farklı ışık şiddeti için yukarıda anlatılan algoritma ile deneyler yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki Çizelge ve grafikte verilmiştir. Bu deneyler ile elde edilecek sonuçlar ile en ince silikon ped için en verimli parlaklık değişiminin algılanması ışık şiddetinin ayarlanması ile sağlanmıştır.

Şekil 8.4'deki grafikte 5 farklı ışık şiddeti için deneyler gerçekleştirilmiştir. Burada kaynak ışık şiddeti (KİŞ) diye bahsedilen; ışık kaynağında bir potansiyometre ile ayarlanan ışık şiddetidir. Kaynak ışık şiddeti diye yüzdelik oranı verilen değer 0 mm mesafe durumunda yani aynanın ölçüm yüzeyine temas etmesi durumunda ışık kaynağında üretilen ışığın şiddetinin tam karanlık 0, tam aydınlık 255 olacak şekilde oranını belirtmektedir.

Mesela 4. deney için ışık şiddeti I_4 iken 3. deney için I_3 vb. Işık şiddetini maksimum 255 olabileceğine göre, 255 değerini %100 kabul eder isek, her bir deney için yüzde ışık şiddeti aşağıdaki gibi olacaktır, (8.2).

$$\%I\dot{S}_i = \frac{I_i \times 100}{255} \quad (8.2)$$

5 numaralı deneyde ışık şiddeti en fazla iken 1 numaralı deneyde ışık şiddeti en düşüktür. Her bir deney için mesafenin 0 olduğu noktada parlaklık maksimumdur. Bu değer aslında ışık şiddeti seviyesini bir diğer ifade ile oranını vermektedir.



Şekil 8.4 Kaynak ışık şiddetine bağlı yansıma mesafesi ile parlaklık miktarı değişiminin grafiği

Işık parlaklık seviyesinin 0 iken en karanlık 255 iken en aydınlık olduğuna göre her deney için ışık şiddeti yani aydınlatma şiddeti lüks cinsinden bulunabilir. Öncelikle olarak ışık ile ilgili bazı kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

- **Işık Şiddeti Hakkında**

Işık şiddeti, birim zamanda belli bir doğrultuda yayılan ışığın yoğunluğu ile ilgilidir. Belli bir doğrultuda birim uzay açısı içinden yayılan ışık akısı olarak da tanımlanabilir. Işık şiddeti bir ışık kaynağından birim katı açı (steradyan) içerisinde yayılan ışık akısının bir ölçüsüdür. Işık akısı dendiği zaman, kaynaktan yayılan toplam akı, ışık şiddeti dendiği zaman ise bir steradyanlık katı açı içerisindeki akı kastedilir. SI birim sistemi içerisinde ışık akısının birimi lümen, ışık şiddetinin birimi ise kandela ve birim alana düşen ılık şiddetinin birimi ise lükstür.

- **Kandela (cd)**

Standart Uluslararası aydınlatma şiddeti ölçüsüdür. Bir kandela, bir lümen/steradyan'dır.

Bir ışık kaynağının belli bir doğrultudaki aydınlatma şiddeti kandela (cd) cinsinden ifade edilir. İlgili doğrultuya bağlı olarak herhangi bir ışık kaynağı pek çok farklı aydınlatma şiddetlerine sahip olacaktır. Aydınlatma şiddeti bizzat ışık kaynağının bir özelliği olduğundan belli bir doğrultudaki kandela değeri, kaynağa uzaklıktan bağımsız olarak aynı kalır.

- **Işık akısı (lümen)**

Lümen 1 kandelalık bir izotopik kaynak tarafından bir steradyana yayılan ışık akısı olarak tanımlanabilir. 1 metrekarelik bir mesafede 1 kandelalık (1 lm/sr) bir ışık kaynağı 1 lümen ışık üretecektir. Lümen ışık enerjisinin ölçüsüdür. Diğer bir deyişle bir ışık kaynağından toplam çıkış lümenle ifade edilir. Lümen değeri ne kadar yüksek ise ışık o kadar parlak gözükür. $1 \text{ lümen} = 0.00146 \text{ W}$

- **Aydınlık Düzeyi (Birim alana düşen ışık şiddeti - lüks)**

Aydınlık düzeyi yani lüks, bir yüzeyin birim alanına birim zamanda düşen ışık akısı miktarıdır. Tanım olarak, aydınlık düzeyi yüzeyin ışık akısının o yüzeyin alanına bölümüne eşittir. $1 \text{ lüks} = 1 \text{ lümen} / 1 \text{ m}^2$

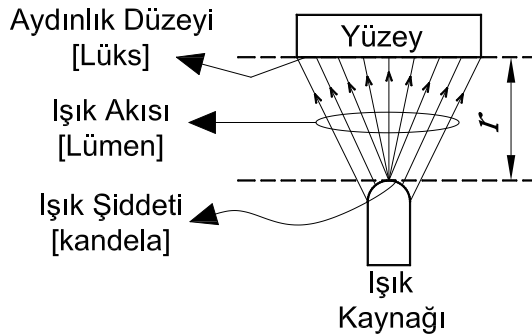
Işık kaynağının açısı, ışığın kaynağı ile aydınlatılacak alan arasındaki uzaklık bu değer üzerinde etkilidir. Işık kaynağı ile aydınlatılacak alan arasındaki mesafe ne kadar uzarsa lüks değeri de o kadar azalacaktır.

- **Matematiksel Bağlılıklar**

Işık akısının noktasal bir kaynaktan yayıldığı ve her yöne eşit dağıldığı varsayılırsa; toplam ışık akısının birim yüzeye düşen miktarını bulmak için akı, yüzey alanına bölünmelidir.

$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \quad (8.3)$$

Burada “**E**” ile aydınlık düzeyi (lüks), “**Φ**” ile ışık akı (lümen) ve “**r**” ile yarıçap (mesafe), yani kaynak ile aydınlatılan yüzey arasındaki uzaklık gösterilmiştir, Şekil 8.5.



Şekil 8.5 Lüks, lümen, kandela

Işık akısının bir steradyanlık katı açi içine düşen miktarına ışık şiddeti [kandela] denilir.

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (8.4)$$

Aydınlık düzeyi **E** [lüks], ile ışık şiddeti **I** [kandela], arasındaki ilişki aradaki mesafeye “**r**” bağlı olarak aşağıdaki gibidir.

$$I = E r^2 \quad (8.5)$$

8.1.2 Parlaklık Seviyesi- Aydınlik Düzeyi (Lüks) Dönüşümü

Eldeki sistemde parlaklık seviyesi (ışık şiddeti) 0 ile 255 aralığında birimsiz bir oran/seviye olarak ölçülmektedir. Daha genel bir sistem elde etmek için birimsiz parlaklık seviye niceliği lüks birimine çevrilmiştir. Lüksmetre ile yapılan deneylerle kamera ile 0 - 255 arasında okunan birimsiz parlaklık seviyesi ile lüks - aydınlık düzeyi arasında bir ilişki kurulmuştur. Sonuç olarak elde edilen katsayı yardımıyla birimsiz bir seviye olan parlaklık seviyesi uluslararası standardında aydınlık düzeyi olan lüks birime çevrilmiştir. Böylelikle bundan sonra elde edilecek bağıntılar umumi bir hal alacaktır.

Yapılan deneylerde 4 farklı ışık şiddeti seviyesi için çeşitli mesafelerden lüksmetre ile ölçümler alınmıştır. İ indisi 1 ile 4 arasında olup bu ışık şiddetini belirtmektedir. J indisi ise farklı mesafelerde yapılan deney âdetin numarasıdır.

$$I_i^j k_i^j = L_i^j \quad (8.6)$$

Buradan her bir ışık şiddeti için ortalama katsayı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{I_i^j}{L_i^j}}{n} \quad (8.7)$$

Daha sonra her bir ışık şiddeti için hesaplanan ortalama lüks dönüştürücü katsayısının da ortalaması alınarak eldeki sistem için parlaklık seviyesini lüks birimine çeviren nihai katsayı elde edilmiştir.

$$k_{lüks} = \frac{\sum_{i=1}^4 k_i}{4} = 0.0951 \quad (8.8)$$

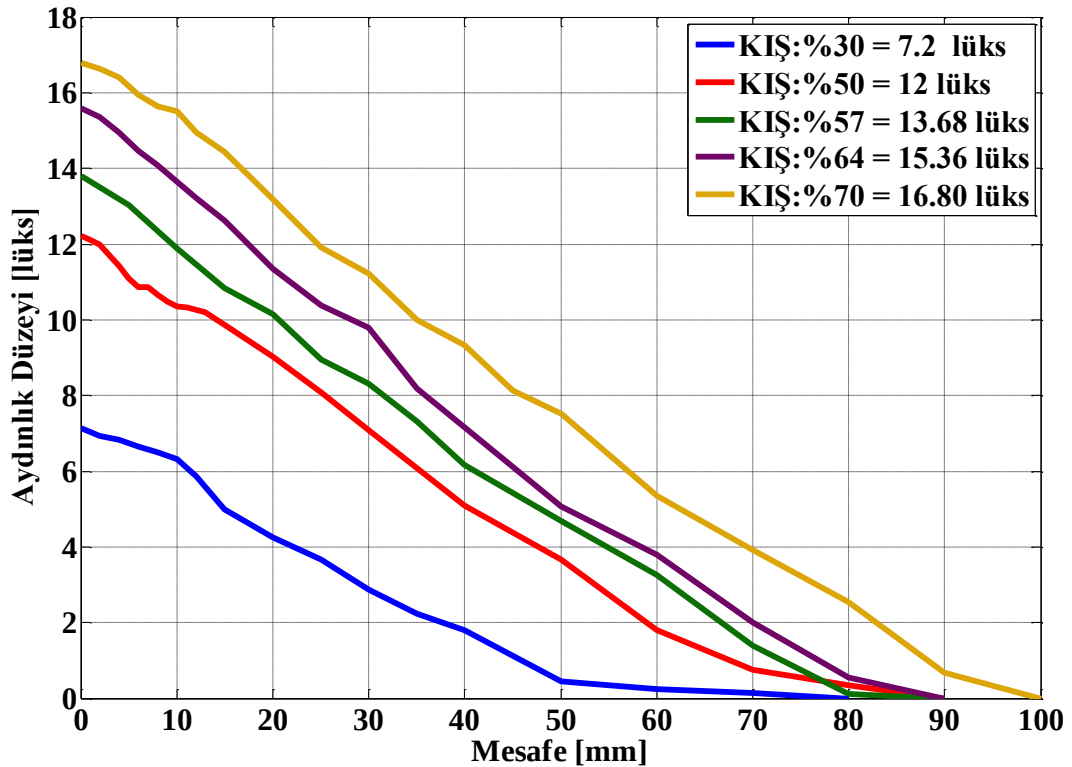
Sonuç olarak kamera ile algılan 0 - 255 arasındaki parlaklık seviyesi “I” aşağıdaki formülde yerine konulduğu SI birim sistemindeki aydınlık ölçüm birimi olan lükse dönüşmektedir, Şekil 8.6.

$$I[lüks] = k_{lüks} I \quad (8.9)$$

Bir diğer parametre ise kaynak ışık şiddetidir. Kaynak ışık şiddeti bir potansiyometre ile kontrol edilmektedir. Kaynak ışık şiddeti için potansiyometrenin konumuna göre minimum seviye %0 = 0 lüks (0. Seviye: tam karanlık) ve maksimum seviye %100 = 24 lüks (255. Seviye: tam aydınlık) olacak şekilde teorik olarak 255 farklı seviyede konumlandırılabilir. Yüzde ışık şiddetinin nasıl hesaplanacağı yukarıda denklem 8.2’de verilmişti. Yüzde ışık şiddetini lükse dönüşüm katsayısı ise: “0.24” tür, (8.10).

Metnin kalanında “K.I.Ş.” diye anlatılmak istenen kaynak ışık şiddetidir ve niceliği hem lüks hem de yüzde olarak verilmiştir. Bunun sebebi deney esnasında potansiyometrenin konumunun ayarlanmasındaki kolaylıktır. Yüzde kaynak ışık şiddetinin kaç lüks aydınlatma düzeyi olduğu aşağıdaki bağıntı ile kolayca hesaplanabilir.

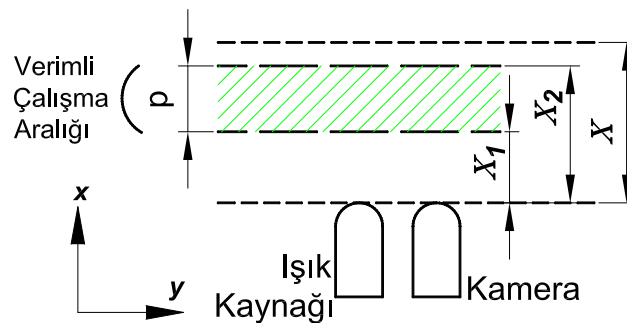
$$I[lüks] = (0.24)(\%I\dot{S}) \quad (8.10)$$



Şekil 8.6 Kaynak ışık şiddetine bağlı yansıma mesafesi ile ölçülen parlaklık miktarı değişiminin grafiği

8.1.3 İdeal Çalışma Değerleri

Burada amaç ideal çalışma alanını sağlayacak kaynak ışık şiddetinin tespit edilmesidir. Şekil 8.6'daki gibi yansıyan ışığın ışık şiddeti (aydınlık düzeyinin) değişiminin x_2 mm mesafe ile x_1 mm mesafe arasında gerçekleşmesi durumunda ideal çalışma mesafesi bu aralıktır, Şekil 8.7. Yansıyan ışık şiddetinin değişmeye başladığı ve bu değişimin bittiği mesafe aralığı ölçüm yapılması için ideal aralıktır. Eğer yansıyan ışık şiddeti 100 mm ile 0 mm aralığında değişiyor ise ideal çalışma aralığı 100 mm, 50 mm ile 0 mm arasında değişim gerçekleşiyor ise ideal çalışma aralığı 50 mm olacaktır.



Şekil 8.7 Parlaklık ölçümünün verimli olduğu aralık

Amaç en düşük mesafede en yüksek çözünürlüğü elde etmektir. Buna seçim parametresi (Γ) der isek, her bir deney için bu parametre, aydınlık düzeyi değişme miktarının gerçekleştiği mesafenin ($x_2 - x_1$), bu değişimin algılandığı seviye âdetine oranıdır, (8.11).

$$\Gamma_i = \frac{x_b^i - x_a^i}{n} \quad (8.11)$$

Seçim parametresi aslında yer değiştirme ölçüm çözünürlüğüdür. Seçim parametresi ne kadar az ise ölçüm çözünürlüğü o kadar fazladır.

Sonuç olarak hem ideal çalışma mesafesi en ufak olan hem de bu alanda en yüksek çözünürlükte ölçüm yapabilen konfigürasyon kaynak ışık şiddetinin 7.2 (%30) lüks olduğu durumdur, Çizelge 8.1.

Deney sonuçları incelendiğinde 7.2 lüks kaynak ışık şiddeti ile daha verimli ölçüm yapılacağı ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar kaynak ışık şiddeti 7.2 lüks olması verimli bir sonuç verse de ideal çalışma mesafesinin 50 mm olması fazladır.

Bir sonraki adım olarak, bu verimli aralıkta çalışabilecek kalınlıkta silikon ped üretilmiştir. Silikon ped ile optik deneyler yapılarak daha ince silikon pedler ile aynı verimde ölçüm yapılmasının yolları aranmıştır. Ayna ile yapılan deneylerde aynadan yansıyan ışığın kayıp yaşamadığı kabul edilmiştir.

Çizelge 8.1 Işık deneyleri sonuç tablosu

Deney No	Kaynak Işık Şiddeti Seviyesi	Adet	İdeal Çalışma Mesafesi $x_b^i - x_a^i$	Seçim Parametresi (Γ)
1	7.2 lüks	75	50 mm	0.665
2	12 lüks	115	70 mm	0.678
3	13.68 lüks	125	78 mm	0.680
4	15.36 lüks	132	81 mm	0.681
5	16.80 lüks	144	90 mm	0.693

Hava ortamında ışığın davranışı ile silikon ped malzemenin içinde ışığın davranışının farklı olacağı aşîkârdır. Hava ortamında verimli çalışma aralığı “p” olsa da silikon ped için bu değer farklı olacaktır. Işğın havada ilerlerken ki gücü saydam bir malzemenin içeresinde ilerlerken yaşanan kayıplar ile düşmektedir. Malzemedeki bu kayıp etkisine soğurma katsayısı etkir ve soğurma katsayısı malzemenin refraktif indeksine, kalınlığına ve ışğın boşlukta ki dalga boyuna bağıldır.

8.2 Refraktif İndeks (Sönme Katsayısı)

Bir malzemenin refraktif indeksi ışğın boşluktaki hızının o malzemenin içeresindeki hızına oranıdır [94 - 96]. Boşluktaki ışğın hızı c ve malzemenin içeresinde ışğın hızı v olarak kabul edilirse o malzemenin refraktif indeksi 8.12’deki denklemden bulunur.

$$n_r = \frac{c}{v} \quad (8.12)$$

Refraktif indeks ışığın dalga boyuna göre değişir ve soğurma yapan malzemelerin refraktif indeksi kompleks olabilir. Bu tip bir değerde gerçekte kısım (n_r) refraktif indeksi belirlerken sanal kısım (κ) soğurma katsayısıyla ilgilidir [97].

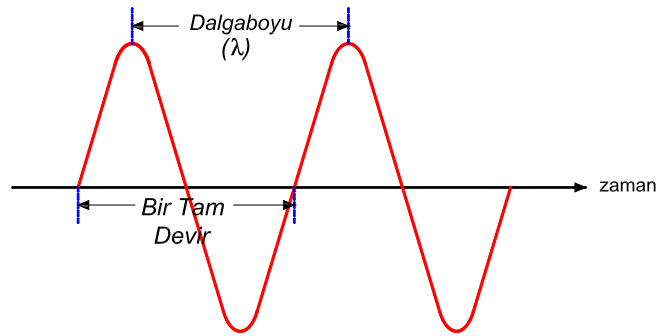
$$\tilde{n}_r = n_r + i\kappa \quad (8.13)$$

Refraktif indeksin sanal kısmı ışığın boşluktaki dalga boyu (λ_0) ve malzemenin refraktif indeksi (n) cinsinden aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\kappa = \frac{2\pi n_r}{\lambda_0} \quad (8.14)$$

8.2.1 Dalga Boyu ve Beyaz Işığın Boşluktaki Dalga Boyu

Dalga boyu, bir dalga örüntüsünün tekrarlanan birimleri arasındaki mesafedir, Şekil 8.8 [94].



Şekil 8.8 Dalga boyu

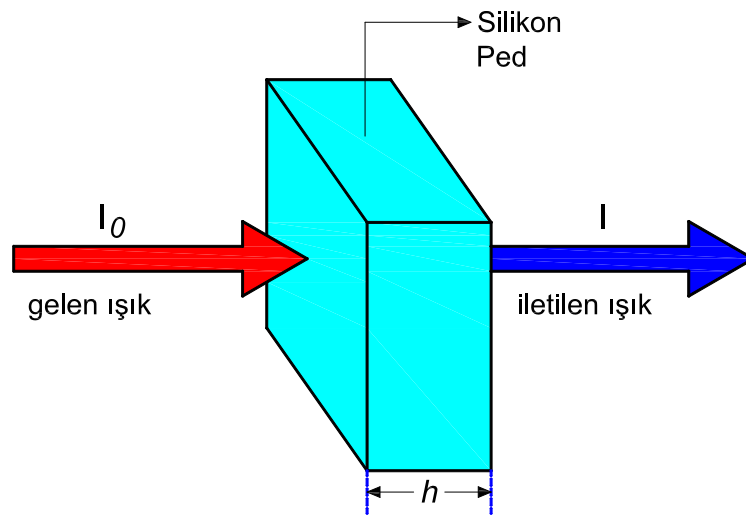
Beyaz ışık tüm renklerin birlikte oluşturduğu ışıktır. Beyaz ışık bir prizmaya vurduğunda renk tayflarına ayrılacaktır. Her bir rengin farklı bir dalga boyu vardır. Mesela mor renkte ışığın dalga boyu 380 nm ile 450 nm aralığında iken kırmızı ışığın dalga boyu 620 nm ile 750 nm aralığındadır. İnsan gözü 390 nm ile 700 nm dalga boyu aralığındaki renkleri algılayabildiğinden bu aralığa görünür ışık denir [98].

Üretilen dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneğinde buz mavisi LED'ler kullanılarak ışık kaynağı yapıldığından bu ışığın dalga boyu ortalama değer olan 485 nm olarak kabul edilmiştir. Silikon malzemenin refraktif indeksi ise $n_r = 3.4434$ olarak kabul edilmiştir [99].

8.3 Işık İletimi ve Soğurulma

Beer – Lambert yasasına göre boşlukta ilerleyen bir ışık farklı bir saydam ortama girdiğinde ortamın malzemesin özelliğine, malzemedeki ilerleme mesafesine ve ışığın dalga boyuna bağlı olarak ışık enerjisi soğurulur ve ısıya dönüşür [95 - 96].

Şekil 8.9’da görülen senaryoda silikon pede “ I_0 ” enerjisi ile giren ışık malzeme içinde bir miktar kayba uğrayarak “ I ” enerjisinde düşmektedir. “ I_0 ” ile “ I ” arasında malzemenin soğuran maddenin molar absorptivitesi “ b ” ile malzeme içindeki emici (absorplayıcı) cisimlerin konsantrasyonu “ c ” ile “ h ” ve “ λ ” ’ye bağlı logaritmik bir ilişki vardır.



Şekil 8.9 Silikon pedde ışık iletimi

$$I = I_0 e^{-bch} \quad (8.15)$$

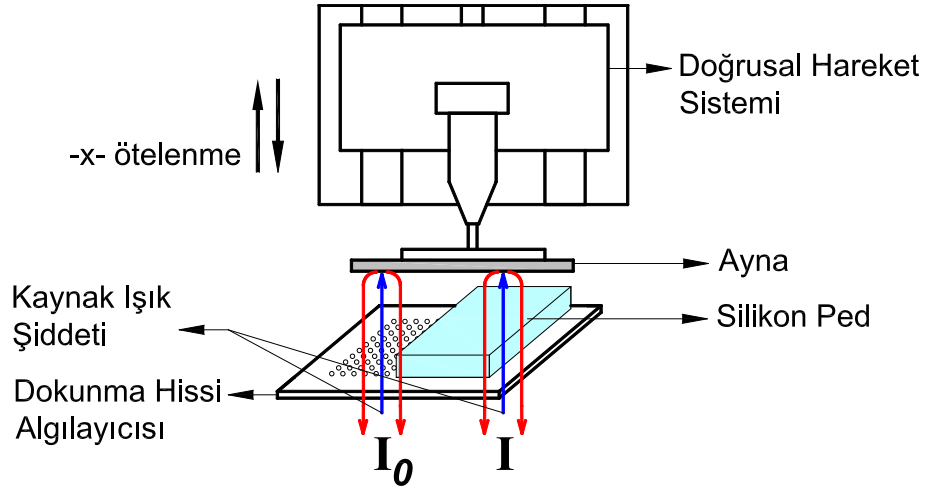
Soğurma katsayısı,

$$\Sigma = bc \quad (8.16)$$

olarak alınıp denklemde yerine konulur ise;

$$I = I_0 e^{-\Sigma h} \quad (8.17)$$

Şekil 8.10’da görüldüğü üzere deneyler yapılarak “ I_0 ” kaynak ışık şiddeti, “ I ” silikondan geçen ışık şiddeti ve “ h ” silikon malzemenin kalınlığı ölçülebilmektedir.



Şekil 8.10 Silikon pedin ışık soğurma katsayısını elde etme deneyleri

Işık, kaynaktan çıktıktan sonra silikon pedin içinden geçerek aynaya ulaşmaktadır. Gösterimdeki aksine gerçek deneylerde ayna ile silikon ped arasında bir boşluk (mesafe) yoktur. Ayna, silikon pedin üzerine tamamen temas etmektedir. Yansıyan ışık tekrar silikon pedden geçerek kameraya ulaşmaktadır. Sonuç olarak ışık silikon malzemenin içerisinde “2h” kadar yol almaktadır. Bu deneyler, farklı ışık şiddetlerinde ped 1 ve 2 için tekrarlanmıştır, Şekil 8.11.

Sonuç olarak havada ilerleyen “ I_0 ” enerjili ışık ışını, kalınlığı “2h” olan bir silikon ped içerisinden geçer ise çıkıştaki enerjisi “I” olur ve kaybolan enerji de ısıya dönüşür. Kaynak ışık şiddetinin “ I_0 ” ile aynı olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca aynadaki yansımada bir enerji kaybı olmadığı yani aynanın ışığı soğurmadığını ve tamamını yansıttığı kabul edilmiştir.

Daha önceki analizlerde kaynak ışık şiddetinin 7.2 lüks olduğu durumda en verimli ölçüm yapıldığı tespit edildiğinden yeni analizlere aydınlatma düzeyinin 7.2 lüks olduğu durumdaki veriler üzerinden devam edilmiştir. Şekil 100’de ışığı geçirme oranı diye kast edilen “ I_0/I ” değeridir.

Silikon pedin ışığı geçirme oranı:

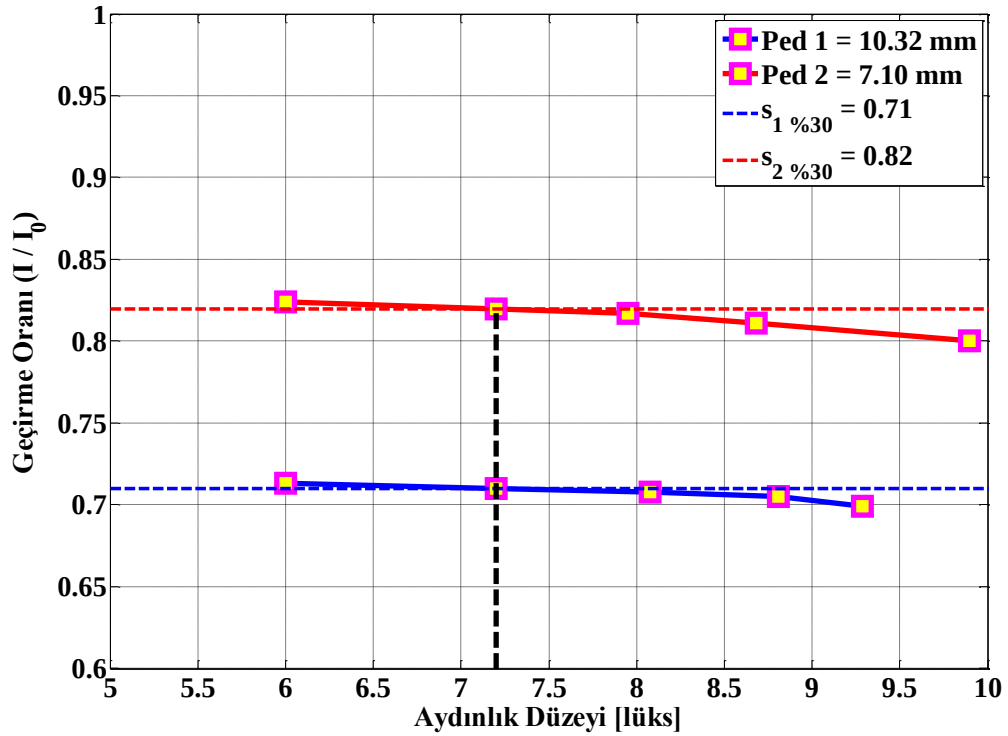
$$I_i = s_i I_0 \quad (8.18)$$

Genel formül tekrar düzenlenirse;

$$e^{-\Sigma h} = \frac{I}{I_0} \quad (8.19)$$

olur. Elde edilen veriler cinsinden parametrik olarak her bir silikon pedin soğurma katsayısı aşağıdaki formül ile elde edilebilir (ışık silikon malzemenin içerisinde “2h” kadar yol almaktadır).

$$\Sigma_i = \frac{\ln(I_0) - \ln(I_i)}{2h_i} = \frac{\ln(I_0) - \ln(s_i I_0)}{2h_i} \quad (8.20)$$



Şekil 8.11 Silikon pedin ışığı geçirme oranı

Yapılan hesaplamalar sonrasında Ped 1’in soğurma katsayısı 0.0166 iken Ped 2 ‘nin ki 0.0140 olarak bulunmuştur, Çizelge 8.2. Buradaki fark, silikon pedlerin farklı karışım oranları ile elde edilmiş olmalarından kaynaklanmaktadır.

Havada boşlukta belli bir mesafede gerçekleşen ışık değişimi daha yüksek bir soğurma katsayısına sahip olan silikon ped içerisinde o nispete daha kısa mesafede gerçekleşecektir.

Kaynak ışık şiddeti (I_0) ile kameraya ulaşan ışık şiddeti (I) silikon kalınlığına ve soğurma katsayısına bağlı olarak denklem 8.21'deki gibidir.

$$I = I_0 e^{-\sum_i h_i} \quad (8.21)$$

Kaynak ışık şiddeti tercih deneyleri sonucunda ışık şiddetinin $I_v = 7.2$ lüks olması durumunda en verimli ölçmenin ($\Gamma = 0.665$ mm) gerçekleşeceği sonucuna varılmıştı. Bu durumda kameraya ulaşan ışık şiddetinin " I_v " 7.2 lüks olması için kaynak ışık şiddeti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_0 = I e^{\sum_i h_i} \quad (8.22)$$

Bu hesaplar, yansıyan ışık parlaklık şiddetinin boşlukta (hava ortamında) 0 – 50 mm arasında gerçekleşen değişiminin, ışığın silikon ped içerisinde ilerlemesi durumunda nasıl gerçekleşeceğini anlamak içindir. Hava ortamında 0 – 50 mm mesafelerde gerçekleşen parlaklık değişiminin hangi silikon ped kalınlığı için gerçekleşeceği aşağıdaki bağıntı ile elde edilir.

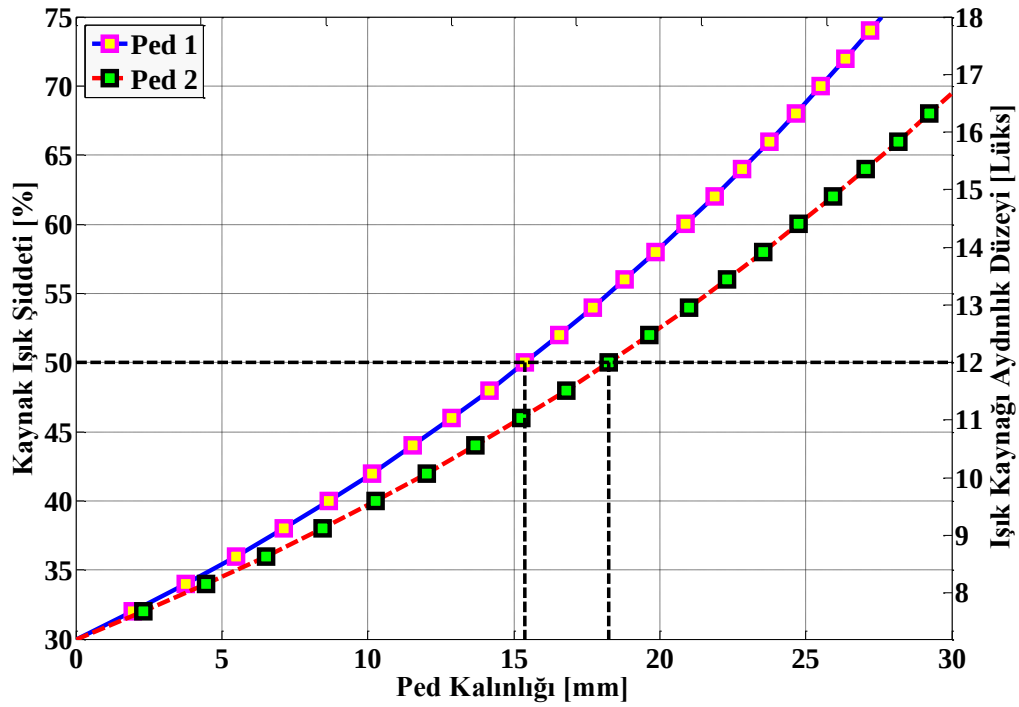
$$h_i = \frac{\ln(I_v / s_i) - \ln(I_v)}{2 \sum_i} \quad (8.23)$$

Yapılan hesaplama ile kaynak ışık şiddetinin 7.2 lüks ile 24 lüks arasında değişmesi durumunda verimli çalışma mesafesinin ne olacağı hesaplanmıştır. Bu durumda farklı soğurma katsayısına sahip ped 1 ve ped 2 için ideal çalışma alanı mesafesi aşağıdaki gibidir, Şekil 8.12, Çizelge 8.2.

Bu analizlerde amaç silikon ped kalınlığını optimize etmektir. Boşlukta iken 0 – 50 mm arasında gerçekleşen ışık parlaklık şiddeti (aydınlık düzeyi) değişiminin silikon ped içerisinde hangi mesafede gerçekleşeceği araştırılmıştır. Tüm bu analizlerde kameraya ulaşan ışık şiddetinin " I_v " 7.2 lüks olması için hesaplamalar yapılmaktadır. Kaynak ışık şiddeti, ped kalınlığı ve soğurma katsayısı belli bir aralıkta değişirken kameraya ulaşan

ışık şiddeti 7.2 lüks'tür. Bunun sebebi mesafe algılama çözünürlüğünün en yüksek olmasıdır. Daha önceki bölümde bu tercih detaylı olarak açıklanmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere bu durumda parlaklık değişimi 75 seviyede algılanmaktadır.

Silikon ped kalınlığının o silikon ped için ideal çalışma mesafesinden fazla olması gerekmektedir. Bunun sebebi ışık parlaklık şiddeti/aydınlık düzeyi değişiminin silikon ped içinde gerçekleşmesi gerekmektedir.



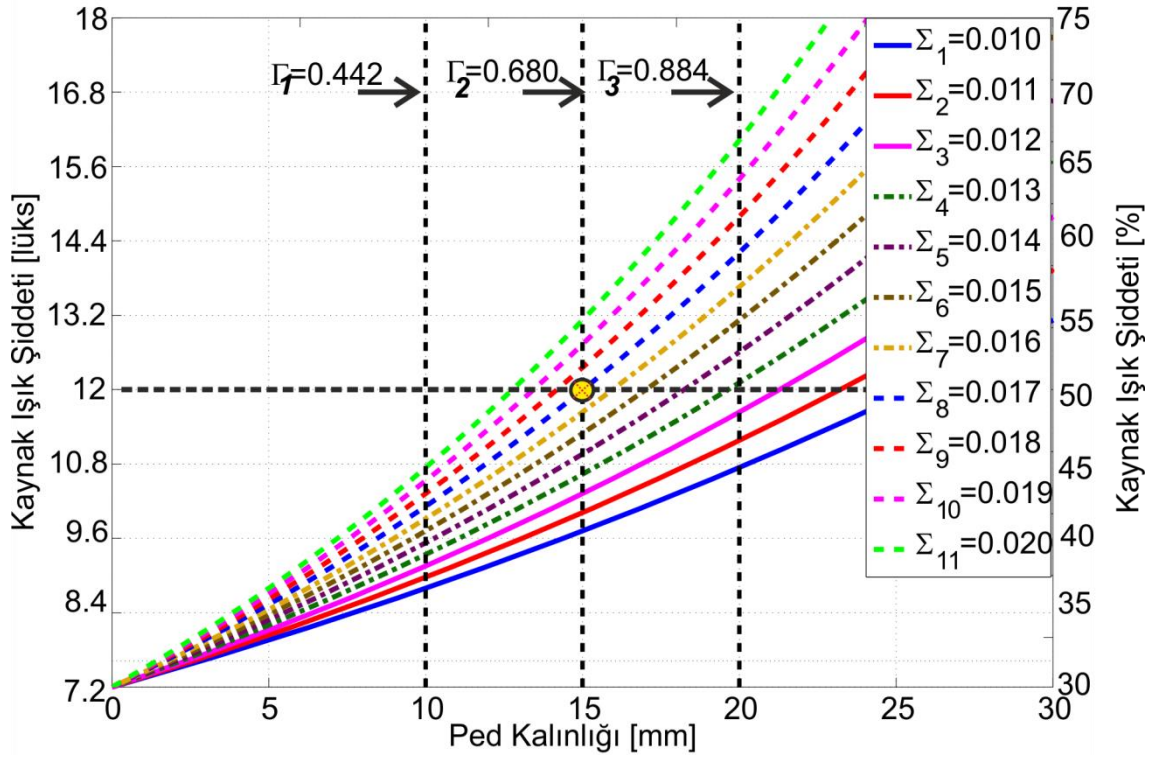
Şekil 8.12 Kaynak ışık şiddeti ve ped kalınlığına bağlı ideal çalışma mesafesi grafiği

Çizelge 8.2 Silikon pedlerin ışık geçirme karakterleri

	Soğurma Katsayısı	12 lüks Kaynak Işık Şiddetinde İdeal Çalışma Mesafesi ($I_v = 7.2$ lüks)
Ped 1	$\Sigma_1 = 0.0166$	$t_1 = 15.38$ mm
Ped 2	$\Sigma_2 = 0.0140$	$t_2 = 18.24$ mm

Soğurma katsayısı silikon pedin muhteviyatındaki bileşenlerin oranına göre değişmektedir. Soğurma katsayısının 0.01 ile 0.02 arasında değişmesi durumunda sistemin en verimli çalışacağı mesafe (t_i) ve buna bağlı seçim parametresi (Γ_i) aşağıdaki

gibidir, Şekil 8.13. Bu gösterimdeki tüm eğrilerde her noktada kameraya ulaşan ışık şiddeti " I_v " 7.2 lüktür.



Şekil 8.13 Kaynak ışık şiddeti silikon pedin kalınlığı ve pedin soğurma katsayısına bağlı seçim parametresi (çözünürlüğü)

Yapılan ölçümler ve analizler sonrasında Şekil 8.13'te görüldüğü üzere, ideal çalışma alanını sağlamak için, seçilecek silikon pedin; kalınlığı (h), soğurma katsayısı (Σ) ile kaynak ışık şiddeti (I_0) ve bu değerlere bağlı seçim parametresi (Γ) eklerde verilmiştir.

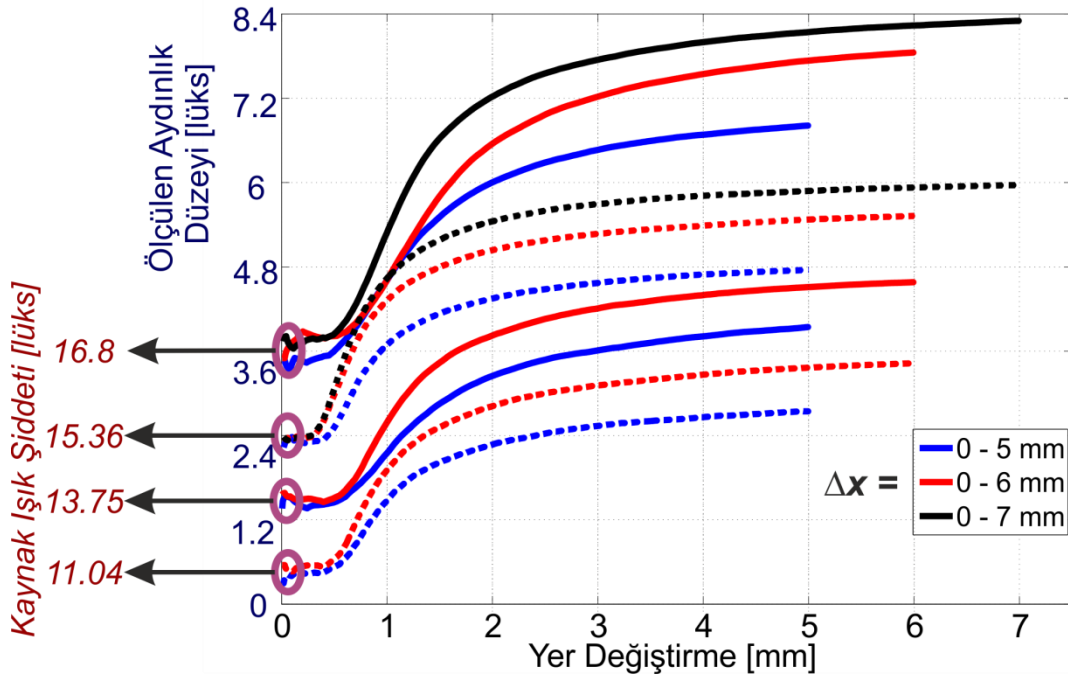
Hem kaynak ışık şiddetinin (I_0) en az olması hem de seçim parametresinin (Γ) en düşük yani çözünürlüğün en yüksek olmasından dolayı silikon pedin kalınlığının $h = 10 \text{ mm}$, soğurma katsayısının $\Sigma = 0.010$ ve kaynak ışık şiddetinin $I_0 = 8.78 \text{ lüks} (\%36.6)$ olması en ideal seçim olarak görünmektedir. Fakat silikon pedin 10 mm olması durumunda uygulanacak tahrikin elastik sınırları geçip plastik deformasyona sebep olması, kalınlığı 15 mm olan bir pede göre daha erken olacaktır. Bu da doğru bir ölçüm yapmayı engelleyecektir. Işık şiddetinin en az olacak konfigürasyonun seçimi enerji verimliliği açısından doğru bir yaklaşım olsa da çevresel bozucu etkilere, yani çevresel ışık kaynaklarına karşı sistemi daha duyarlı bir hale getirecektir. Tüm etkenler de hesaba

katıldığında $h = 15 \text{ mm}$, $\Sigma = 0.017$ ve $I_0 = 12 \text{ lüks (\%50)}$ olarak seçilmesi en doğrusu olacaktır.

Üretilcek dokunma hissi algılayıcısında istenilen ölçme kriterlerine göre bu grafik kullanılarak silikon pedin kalınlığına, soğurma katsayısına ve kaynak ışık şiddetine karar verilebilmektedir. Bu grafik tezin önemli çıktılarından biridir. Nu grafikteki niceliklerin yer aldığı tablo Çizelge B.'2de verilmiştir.

8.4 Deneyisel Olarak Silikon Ped Tercihinin Sınanması

Soğurma katsayısı $\Sigma_1 = 0.0166$, kalınlığı $h = 10.32 \text{ mm}$ olan Ped 1 ile yukarıda verilen Çizelge ve grafiğin sınanması için kaynak ışık şiddeti 11.04, 13.75, 15.36 ve 16.8 lüks olarak ayarlanarak Ped 1'e 5 mm, 6 mm ve 7 mm tahrik (batma) uygulanmıştır. Havada (boşlukta), ayna ile yapılan deneylerde yaklaşık olarak 0 ile 50 mm arasında gerçekleşen ışık parlaklık değişimi Ped 1 kullanıldığında yaklaşık 10 mm içerisinde gerçekleşmektedir, Şekil 8.14.



Şekil 8.14 Farklı kaynak ışık şiddetleri altında yer değiştirmenin (batma miktarı) 0-5 mm, 0-6 mm, 0-7 mm olduğu durumlarda ölçülen aydınlık düzeyi (yansıyan ışık şiddeti) grafiği

8.4.1 Yansıtıcı Yüzeyin Işık Yansıtma Katsayısı

İdeal çalışma alanının tespit için yapılan deneylerde ışık kaynaktan çıktıktan sonra aynadan yansıyıp geri dönmekteydi. Bu deneyler ile elde edilen sonuçlarla yapılan analizlerin sınanması için silikon ped kullanılmıştır. Silikon ped kullanılan deneylerde yansıtıcı yüzeyin ayna kadar iyi bir yansıtıcı olmadığı tespit edilmiştir. Yansıtıcı yüzey ile ayna arasında bir ilişki kurmak adına yansıtıcı yüzeyin ışık yansıtma katsayısı deneysel olarak elde edilmiştir. Bu deneylerde aynı kaynak ışık şiddeti için aynı mesafede duran ayna ve yansıtıcı yüzeyden yansıyan ışık şiddeti ölçülüp kaydedilmiştir. Bu deneylerde 7.2 lüks (%30) ile 19.2 lüks (%80) arasında kaynak ışık şiddeti için 11 farklı deney yapılmıştır.

$$I_{yan}^i = I_{ay}^i k_{yan}^i \quad (8.24)$$

Daha sonra yansıtıcı yüzey ile aynadan yansıyan ışık şiddeti birbirine oranlanarak ortalaması alınarak yansıtıcı yüzeyin ışık yansıtma katsayısı **0.5884** olarak elde edilmiştir.

$$k_{yan} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{I_{yan}^i}{I_{ay}^i}}{n} \quad (8.25)$$

Yansıtıcı yüzeyin ışık yansıtma katsayısı (k_{yan}), silikon pedin; kalınlığı (h), soğurma katsayısı (Σ) ile kaynak ışık şiddeti (I_0) ve silikondan geçen, yansıyıp geri gelen ışık şiddeti (I) olmak üzere bunlar arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$I = k_{yan} I_0 e^{-\Sigma 2h} \quad (8.26)$$

Kaynak ışık şiddeti 13.2, 15.36, 16.8 ve 5 mm, 6 mm ve 7 mm yer değiştirme (batma) için elde edilen deneysel ölçüm değeri ile yukarıdaki bağıntı ile hesaplanan değer aşağıdaki gibi karşılaştırılmıştır, Çizelge 8.3.

Çizelge 8.3 Yansıtıcı yüzeyin ışık yansıtma katsayısı deneyleri ile teorik hesabın karşılaştırılması

Batma Miktarı [mm]	K.I.Ş. = 16.8 lüks		K.I.Ş. = 15.36 lüks		K.I.Ş. = 13.20 lüks	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
5	6.52	6.86	4.83	4.86	4.05	4.29
6	7.52	7.70	5.49	5.63	4.69	4.85
7	8.38	8.35	6.01	6.10		

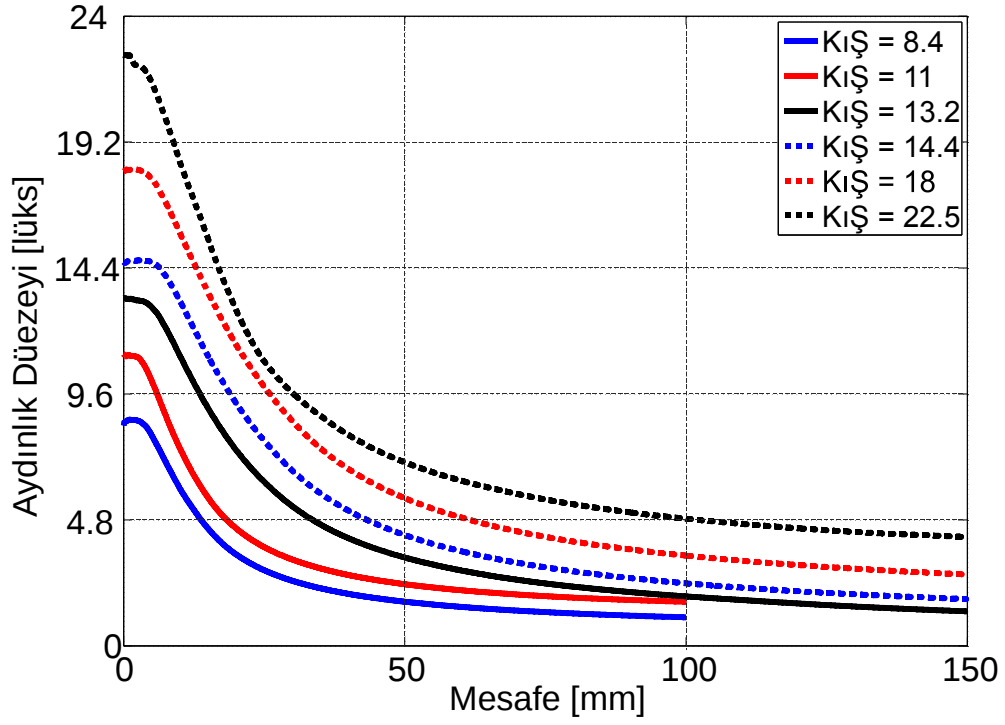
8.5 Aydınlik Düzeyi ile Yer Değiştirme Arasındaki İlişkinin Modellenmesi

Işık yer değiştirme modeli deneyi isimli Şekil 86'de görüldüğü gibi farklı kaynak ışık şiddeti için 0 mm ile 100 veya 0 mm ile 150 mm arasında deneyler gerçekleştirilmiştir ve veriler kaydedilmiştir. Böylelikle aydınlık düzeyi (parlaklık seviyesi) ile yer değiştirme arasındaki ilişki arada silikon ped olmadığı durum için elde edilmiştir, Şekil 8.15.

Sonrasında kaynak ışık şiddetine bağlı olarak aydınlık düzeyi ile yer değiştirme (mesafe) arasındaki ilişki en küçük kareler metodu ile eğri uydurularak elde edilmiştir.

Bu doğrusal olmayan ilişki 3. dereceden bir polinom olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Burada 0 parlaklık düzeyi yani 0 lüks ile maksimum parlaklık düzeyi 24 lüks arası 0 ile 100 arasındaki ışık şiddeti seviyesi olarak kabul edilmiştir. Yani I_0 ile I_v değerleri boyutsuzdur ve ışık şiddeti seviyesini oransal olarak vermektedirler. I_0 kaynak ışık şiddetinin 0 ile 100 arasındaki seviyesi iken I_v yansıyan ışık şiddetinin 0 ile 100 arasındaki seviyesidir. k^* katsayısı ise 0 ile 150 mm arasında gerçekleşen aydınlık düzeyi değişimini 0 ile 1 aralığına getirerek normalize etmektir, 8.16.

Sonuç olarak x^* birimsiz bir değer olup 0 ile 1 arasında bir çarpandır. x^* kaynak ışık şiddetine ve ölçülen ışık şiddeti seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Burada deneyler 0 ile 150 mm arasında yapılmıştır.



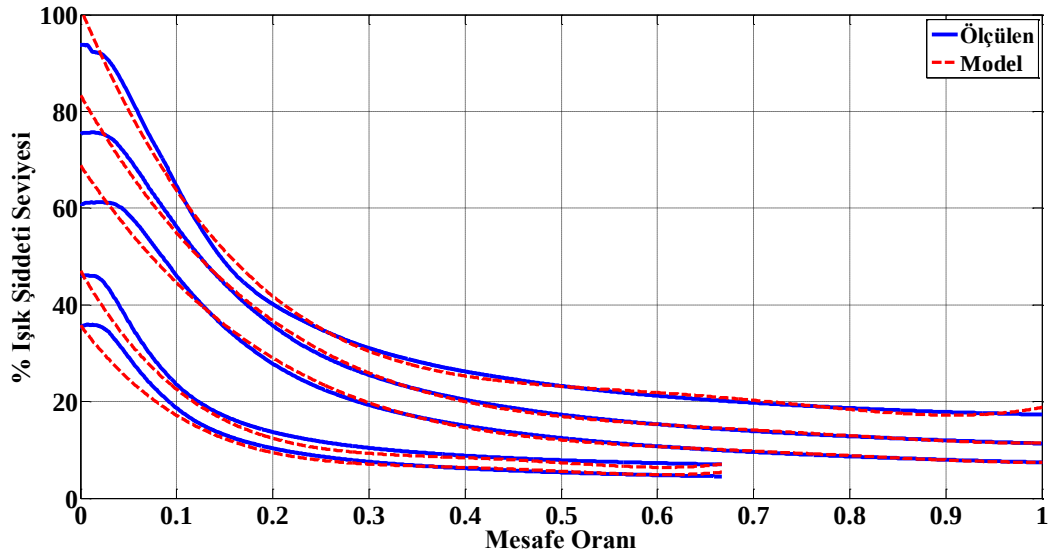
Şekil 8.15 Farklı kaynak ışık şiddeti (K.I.Ş.) ile 0 – 150 mm yer değiştirmeye bağlı aydınlık düzeyi (ölçülen ışık şiddeti) grafiği

Deneylerde 150 mm'nin ötesine geçilmesinin birinci sebebi ölçülen ışık şiddeti, 150 mm mesafede kaynak ışık şiddeti en yüksek seviye olan 24 lüks değerinde olduğu durum için bile sıfırdır. Bir diğer sebepte üretilecek sistemde 15 cm üzerinde kalınlığında bir silikon pede ihtiyaç olmayacağı düşünülmektedir.

$$k^* = \frac{1}{150} [mm^{-1}] \quad (8.27)$$

$$x^*(I_v) = \frac{k^*}{I_0} (-0.003I_v^3 + 0.0120I_v^2 - 0.2127I_v + 1.4480) \quad (8.28)$$

Bu yapılan analizler ile boşlukta; ışık şiddeti ile yansıtıcı yüzeyin ölçüm yüzeyine olan mesafesi arasında bir ilişki kurulmuştur. Araya silikon ped konulur ise silikon pedin ışık parlaklığına olan etkisi soğurma katsayısı, ped kalınlığı ve yansıtıcı yüzeyin yansıtma katsayısı ile orantılı olacaktır, Şekil 8.17. Burada ΔI , yer değiştirme (Δx) bağlı ölçülen aydınlık düzeyindeki değişimdir. $0 < \epsilon < 1$ olduğu için yansıtıcı yüzeyin etkisi ihmal edilmiştir.



Şekil 8.16 Ölçülen ışık şiddeti ile yansıtma mesafesi arasındaki modelin doğrulama grafiği

Beer-Lambert yasası aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir ise ve gerekli matematiksel sadeleştirmeler yapılır ise denklem 8.31 yani ışık şiddetindeki değişim ile yer değiştirme arasındaki matematiksel bağıntı elde edilmiş olur.

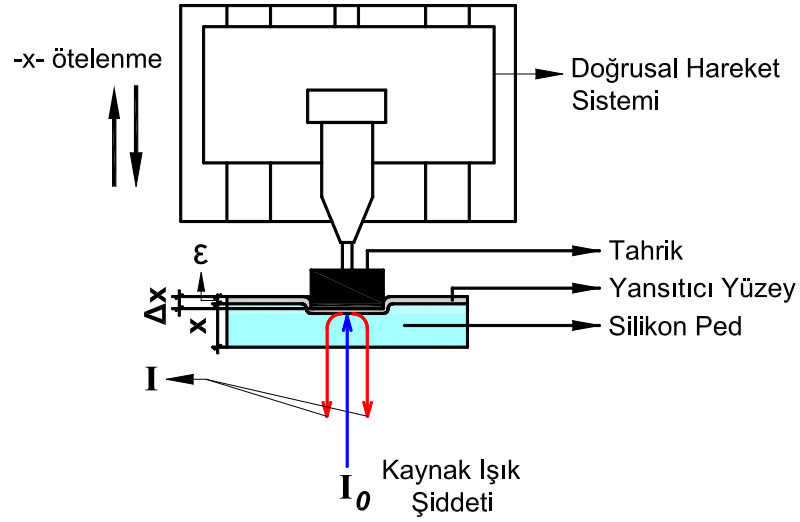
$$\Delta I = I_0 k_{yan} e^{-\Sigma 2(x-\Delta x)} \quad (8.29)$$

$$\ln\left(\frac{\Delta I}{I_0 k_{yan}}\right) = -\Sigma 2(x-\Delta x) \quad (8.30)$$

Bu denklemden Δx yani yer değiştirme, kaynak ışık şiddeti, silikon pedin kalınlığı, yansıtıcı yüzeyin yansıtma katsayısına bağlı olarak Beer-Lambert modeli yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Bu denklemden ΔI ölçülen ışık parlaklığı (aydınlık düzeyi); Δx ise buna bağlı yer değiştirme miktarıdır.

$$\Delta x = x - \frac{\ln(I_0 k_{yan}) - \ln(\Delta I)}{2 \Sigma} \quad (8.31)$$

Denklem 8.31'deki ifadede " I_0 " ve " ΔI " nicelikleri lüks birim cinsindendir. soğurma katsayısının Σ ise lüks/mm birim cinsindendir.



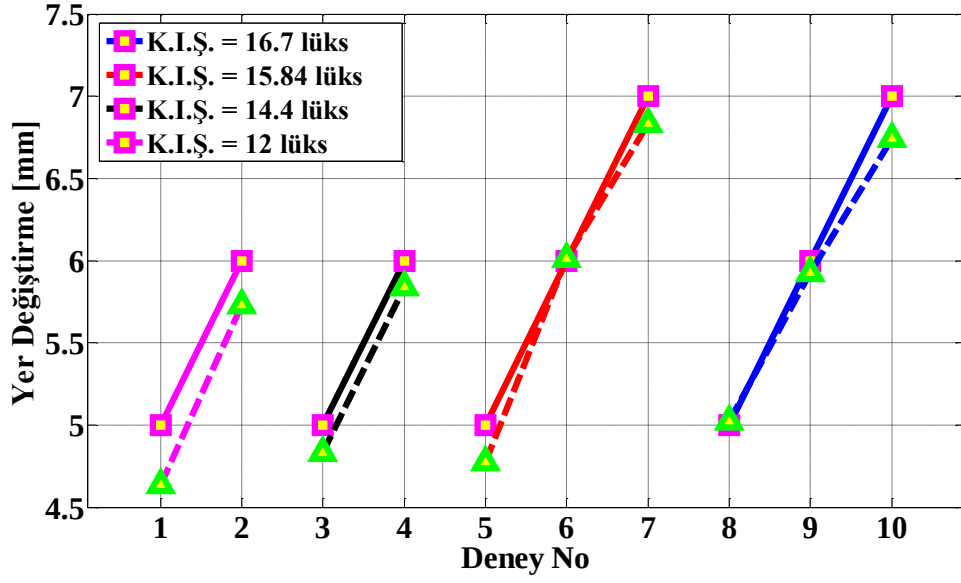
Şekil 8.17 Işık şiddeti (aydınlık düzeyi) ile yer değiştirme modeli deneyleri

Şekil 8.18’de ölçülen ışık şiddetinden kaynak ışık şiddetine bağlı olarak yer değiştirme (batma miktarı) miktarının hesaplayan modelin doğrulaması yer almaktadır. Bu grafikte düz çizgiler (kare şekiller) gerçek batma miktarı değerleri iken kesikli çizgiler (üçgen şekiller) yukarıdaki bağıntı ile elde edilmiştir.

Deneyler farklı kaynak ışığı şiddetleri altında tekrar edilmiştir. Gerçek değerler ile teorik model sonuçları arasında bir fark vardır. Bu farkın, ışık ölçmedeki bozucular, model oluşturulurken yapılan kabuller ile silikon pedin karakterizasyonu elde edilirken yapılan yaklaşımların toplamından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak birçok unsur bir araya getirilerek oluşturulan matematiksel model gerçeğe yakın ve mantıklı bir sonuç vermektedir. Bu modelin iyileştirilmesi ile dokunma algılayıcının kuvvet ölçümü de iyileşecektir.

Sonuca en çok etkiyen faktör ışık şiddetinin ölçülmesindeki bozucu etkenler yani çevresel ışık kaynaklarıdır. Her ne kadar deneyler karanlıkta ve deney düzeneğinin etrafı kaplanarak yapılsa da çevresel ışık hala önemli bir bozucu etken olarak sonuca etkimiştir. Bu sorunun kızılötesi ışık kullanılarak çözülmesi öngörülmüştür.



Şekil 8.18 Batma miktarı ile ışık şiddeti arasındaki modelin doğrulanması

Bu bölümde yapılan çalışmaların sonucunda dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneğinde silikon pede uygulanan tahrik ile oluşan yer değiştirmeyi, ölçülen parlaklık düzeyi veya bir diğer ifade ile ışık şiddeti üzerinden hesaplayan bir model elde edilmiştir.

Ölçülen değer ve hesaplanan değer arasındaki fark yüzdelik olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplandığında yüzde doğruluk değerinin en az %92 olduğu görülmüştür.

$$YD = 100 \left(1 - \frac{\sigma_{\bar{o}} - \sigma_H}{\sigma_{\bar{o}}} \right) \quad (8.32)$$

SİSTEME EN UYGUN MATEMATİKSEL MODELİN SEÇİMİ

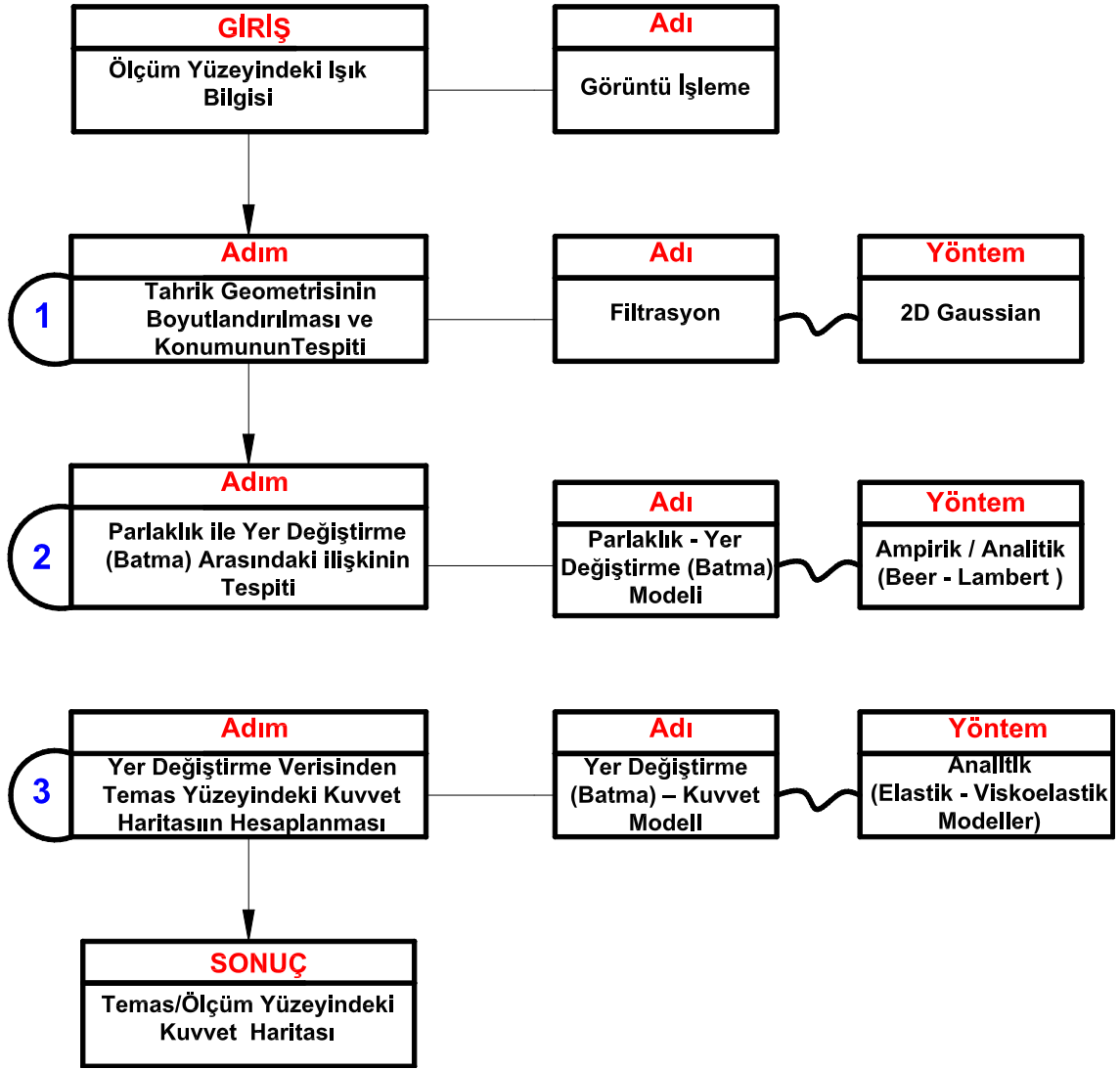
Ölçülen parlaklık değişiminden kuvvetin hesaplanmasını giden yol birbirini takip eden 3 ana alt bölümde açıklanmıştır. Her bir alt sistem bir öncekinin çıktısını kullanmaktadır. Bu alt birimler metnin devamında detaylı olarak açıklanmıştır.

Matematik model seçimi çalışması için gerekli ölçümleri yapacak iki adet deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzenekleri ile kontrollü bir şekilde yer değiştirme yapıp kuvvet ölçülmekte ve kontrollü bir şekilde kuvvet uygulanıp yer değişme ölçülmektedir. Bu deney düzenekleri kullanılarak yapılan deneyler ile eldeki sistem için en uygun model araştırılmıştır. Bu 2 deney düzeneğine ileride detaylı olarak açıklanmıştır.

Matematiksel hesaplamalar 3 ana alt başlıkta toplanmıştır, Şekil 9.1. Birbirini takip eden bu modellerin girişi parlaklık şiddeti çıkışları ise tahrike bağlı yer değiştirme (deplasman) ve kuvvet ile bu bilgilerin temas yüzeyindeki konumlarıdır.

Birbirini takip eden bu 3 basamağın her birinin çıkışı diğerinin girişidir. Her bir bağıntı ampirik, analitik ve nümerik modeller yardımıyla farklı matematiksel araçlar kullanılarak elde edilmiştir.

Matematiksel yaklaşımlar sayesinde adım adım parlaklık bilgisinden yer değiştirme (deplasman) bilgisine oradan da kuvvet bilgisine ulaşılması amaçlanmıştır.



Şekil 9.1 Matematik model basamakları

9.1 Deneyel Düzenekteki Sorunlar ve Sonuçları

Tez kapsamında gerçekleştirilen tasarımın önemli ve öne çıkan özellikleri, yüksek geometrik çözünürlükte olması, çok noktalı ölçme yapabilmesi, çevresel bozucu etkilere karşı duyarsız olması, ucuz olması ve esnek yapıda olmasıdır.

Tasarlanan sistemde bazı kısımlar eldeki imkânlar ile ideal şartlarda üretilemediğinden, imalat aşamasında değişikliklere gidilmiştir. Bu değişiklikler sonucunda ortaya çıkan dokunma hissi deney düzeneği, tasarım aşamasında hedeflenen niteliklerden bir kısmını (kuvvet ölçüm çözünürlüğü gibi) tam olarak başaramamıştır. Bu gibi sorunlar ve sebepleri ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

9.1.1 Fiber Optik Kablolarda Yaşanan Sorunlar

Sistemin tasarımı aşamasında data fiber optik kabloların kullanılması düşünülmüş olmasında rağmen deneysel düzeneğin ve prototiplerin üretiminde aydınlatma fiber optik kabloları kullanılmıştır. Data fiberleri kızılötesi ışığı geçirdiği için çevredeki ışığa karşı duyarsızdır. Fakat data fiberleri 9 mikron çapında olduklarından imalat noktasında sorun çıkarmaktadır. İmkanlar dahilinde data fiberlerinin kesilip bir yere monte edilmesi ve sonlandırılması yapılamamıştır.

9 mikronluk çapa sahip data fiber optik kabloları yerine 0.75 mm çapındaki aydınlatma fiber optik kablolar imalatla kullanabilirliği açısından mecburen tercih edilmiştir. Aydınlatma fiberleri normal ışığı geçirdiğinden çevresel ışığın bozucu etkisine maruz kalmaktadırlar. Ortam aydınlığındaki değişim kamera ile ölçüm yapılan yüzeye etki etmesi durumunda ölçülen değer bozulmaktadır. Mekanik olarak yapılan tasarım dışında bu bozucu etkiyi yok etmek için görüntü işleme programında filtreler kullanılmaktadır. Bu filtreler çevresel etkiyi önlese de parlaklık duyarlılığını düşürdüğü için ölçüm çözünürlüğünü de düşürmektedir.

9.1.2 Sabit Olmayan Silikon Ped

Deneysel düzenekte kullanılan silikon ped sisteme entegre olmasına rağmen yekpare bir yapıda değildir. Bunu sebebi henüz geliştirme aşamasında bir sistem ortada olduğundan silikon ped üzerinde de birçok deney yapılmış ve farklı farklı onlarca adet silikon ped sistem üzerinde denenmiştir. Tasarım aşamasında reseptör ve lambaların yani temas yüzeyine giden tüm fiber optik kabloların silikon pedin içinde sonlanması düşünülmüştür. Bu da silikon pedin sistem üzerinde dökülmesi ve orada katılıp kabloları içerisine alması demektir. Bu şekilde üretilen bir silikon ped sistemden ayıramayacağından imalat aşamasında bu konseptten vazgeçilmiş ve modüler bir sistem üretilmiştir.

9.1.3 Filtre

Data fiberleri yerine aydınlatma fiberlerinin kullanılması çevresel ışığın ciddi bir bozucu olmasına sebep olmuştur. Fiber kabloların ucunun, her ne kadar üzerlerinde silikon ped olsa da, kablolar pedin içinde sonlanmadığından açıkta kalmasına sebep olmuştur.

Bu 2 durum çevresel etkinin sistem üzerinde ciddi bir bozucu etki olmasına imkan tanımıştır. Bu gürültüyü engellemek için görüntü işleme yazılımında bir filtre geliştirilmiştir. Bu filtrenin 2 amacı vardır. İlki sistem başlangıcındaki parlaklık miktarını sıfır yer değiştirme (batma) olarak kabul ederek ilk kalibrasyonu yapmaktır. İkinci olarak bu filtre ışık değişim oranının belli bir eşik değere ulaşmadan sonuca etkilemesini engelleyerek bir alçak geçiren filtre gibi davranmaktadır. Sonuç olarak bu filtre ölçüm çözünürlüğünü düşürmektedir.

Maksimum yer değiştirme (deplasman) ile sıfır yer değiştirme (deplasman) arasını 255 seviyede ölçülmesi tasarlanmışken, ortaya çıkan sistemde görüntü işlemedeki filtre çıkışında bu seviye 100'ün altında gerçekleşmektedir. Seçilen silikon ped ve kaynak ışık şiddeti için bu seviye 75'tir. Ayrıca tam karanlık ile tam aydınlık değerlerinin 0 yer değiştirme ve birim yani %100 yer değiştirmede gerçekleşeceği kabul edilmiştir. Fakat gerçekleştirilen sistemde yaklaşık olarak %165 uzama 75 seviyede ölçülebilmıştır. Bu santimetre karede 0.0612 N olan teorik kuvvet ölçüm çözünürlüğünü 0.34 N'a, 0.61 kPa olan basınç ölçüm çözünürlüğünü 3.32 kPa'a düşürmüştür.

Sonuç olarak uzun süren araştırma ve geliştirme çalışmaları sonrasında ortaya çıkan deney düzeneği ile iddia edilen ve bir benzeri olmayan tasarımın çalıştığı kanıtlanmıştır.

9.2 Matematik Model Seçimi ve Sistemin Tanımlanması

Bu bölümde elastik silikon pedin matematiksel modeli üzerinde durulacaktır. Tasarlanan ve üretilen dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği ile ölçülmek istenen kuvvet, silikon pede uygulanan bir tahrik sonrası ped üzerinde oluşan yer değiştirme, deplasmana bağlıdır. Algılayıcı optik olarak silikon pedde oluşan yer değiştirmeyi, (deplasmanı) parlaklık şiddeti üzerinden ölçmektedir. Bu konuya bir önceki bölümde detaylı olarak değinilmiştir. Bir önceki bölümde elde edilen deneysel verilere dayalı teorik model (parlaklık miktarı – yer değiştirme modeli) üzerinden

uygulanan tahrike bağı silikon ped üzerindeki yer değıştirmeler ışı parlaklık şiddeti üzerinden ölçülerek hesaplanmıştı. Hesaplanan yer değıştirme bilgisinden temas (ölçüm) yüzeyindeki kuvvet ve gerilme haritasına bu bölümde bahsedilen/seçilen model ile ulaşılmaktadır.

9.2.1 Yapılan Çalışmalardaki Ön Kabuller ve Deney Düzenekleri Hakkında

Dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneğinin kamera ve görüntü işleme programı ile ölçülen nicelik, ölçüm yüzeyindeki ışı şiddeti (aydınlık düzeyi) seviyesidir. Ölçülen parlaklık miktarındaki değışim ve bu değışimin zaman bağı türevi, ölçüm yüzeyine uygulanan tahrike bağı yer değıştirmeye (deplasmana, batma miktarına) “ Δh ” (“ Δx ”) ve yer değıştirme hızına “ v ” bağıdır. Bir önceki bölümde parlaklık değışimi bilgisinden yer değıştirme bilgisine nasıl ulaşılaçağı açıklamış ve gösterilmiştir. Bu bölümde yer değıştirme bilgisinden bu yer değıştirmeye sebep olan kuvvet bilgisinin nasıl hesaplanacağı üzerinde durulmuştur.

9.2.2 Matematiksel Modellerin Doğrulanmasında Kullanılan Deney Düzenekleri Hakkında

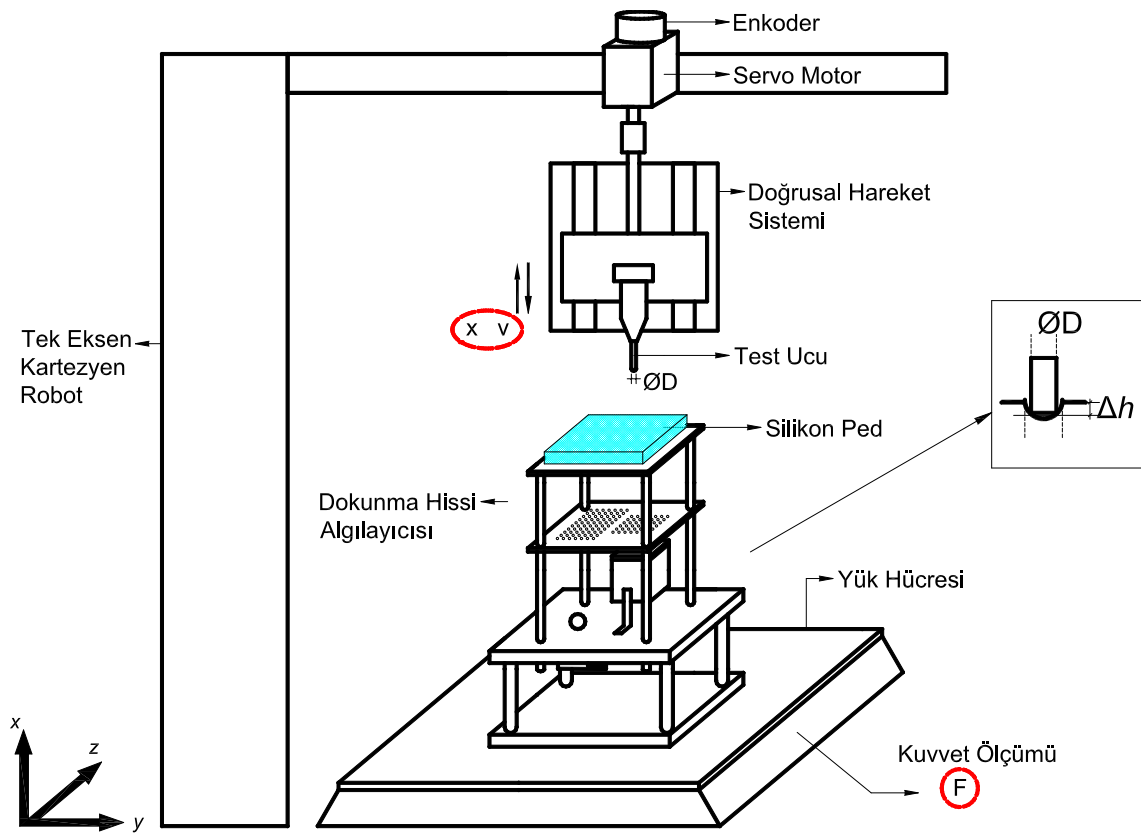
Silikon pedin matematiksel modeli olarak hem elastik hem de viskoelastik modeller üzerinde durulmuştur. Silikon pedin karakteristiğini elde edebilmek için ve her bir modelin sonucunu karşılaştırmak için 2 farklı deney düzeneğı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bunlardan ilki olan tek eksenli kartezyen robot ile pozisyon kontrolü yapılarak kuvvet bilgisi ölçülmekte iken ikincisi, sabit kuvvet deney düzeneğı ile silikon pedin viskoelastik davranışı incelenmiştir. Bunlara ek olarak ikinci deney düzeneğinde yapılacak basit bir değışim ile üçüncü ve son deney düzeneğı olan değışken kuvvet deney düzeneğı elde edilmiştir. Bu deney düzeneğı ile farklı ve değışken kuvvetler uygulanarak hem yer değıştirme bilgisi hem de uygulanan değışken kuvvet ölçülmüştür.

9.2.2.1 Tek Eksenli Kartezyen Robot Hakkında

Şekil 9.2’de görüldüğü gibi deney düzeneğı tasarlanmış, üretilmiş ve çalıştırılmıştır. Bu deney düzeneğinden ilerleyen metinde, tek eksenli kartezyen robot diye

bahsedilecektir. Robot ile dokunma hissinden bağımsız olarak pozisyon, hız ve kuvvet ölçümü yapılabilmektedir. Robot ile kontrollü olarak deneyler gerçekleştirilebilmektedir.

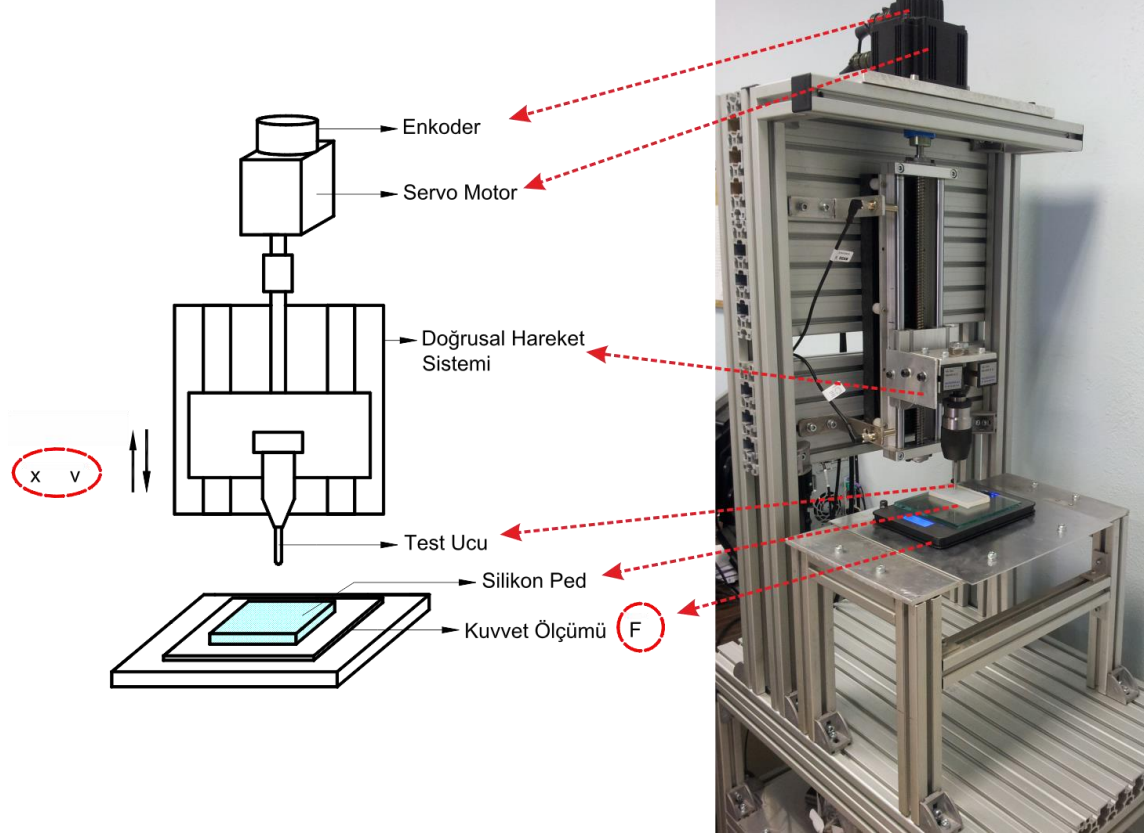
Robot sistemi içinde hassas olarak pozisyon, hız ölçümü optik kodlayıcı (enkoder) ile kuvvet ölçümü de yük hücresi ("load cell") ile gerçekleştirilmektedir, Şekil 9.3. Matematiksel analizlerde resimde görülen sistem kullanılacaktır. Yani servo motor ile hassas olarak kontrol edilen pozisyon ile silikon pede bir tahrik uygulanacaktır. Yük hücresi bu tahrik kuvvetinin büyüklüğünü ölçecektir. Elde edilecek matematiksel model de pozisyon bilgisini bağımsız değişken olacak ve yük hücresi ile ölçülen kuvvet bilgisine ulaşılmaya çalışılacaktır.



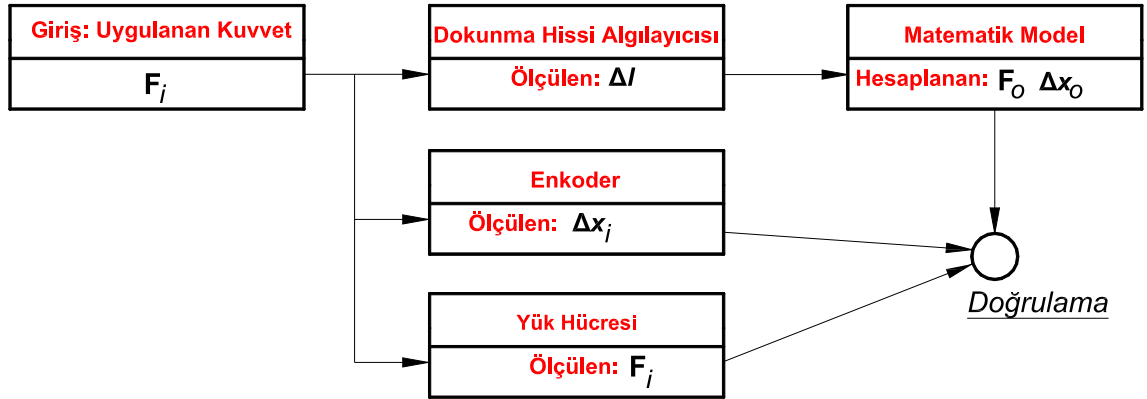
Şekil 9.2 Matematik modelleme deney düzeneği

Dokunma hissi algılayıcısı ile ölçülen parlaklık değişimi sonrası hesaplanan " Δx_o ", " F_o " enkoder ve hassas terazi (yük hücresi) ile ölçülen ve referans kabul edilen " Δx_i ", " F_i " değerleri karşılaştırılıp matematik modelin uygunluğu sınanacaktır ve en doğru modelin seçimi yapılacaktır, Şekil 9.4.

Ayrıca tahrik elemanın çapı da hesaplanacak ve gerçek değeri ile karşılaştırılacaktır. Aşamalar halinde adım adım yapılacak matematik modelleme çalışması takip eden bölümlerde açıklanacaktır.



Şekil 9.3 Tek eksenli kartezyen robot deney düzeneği

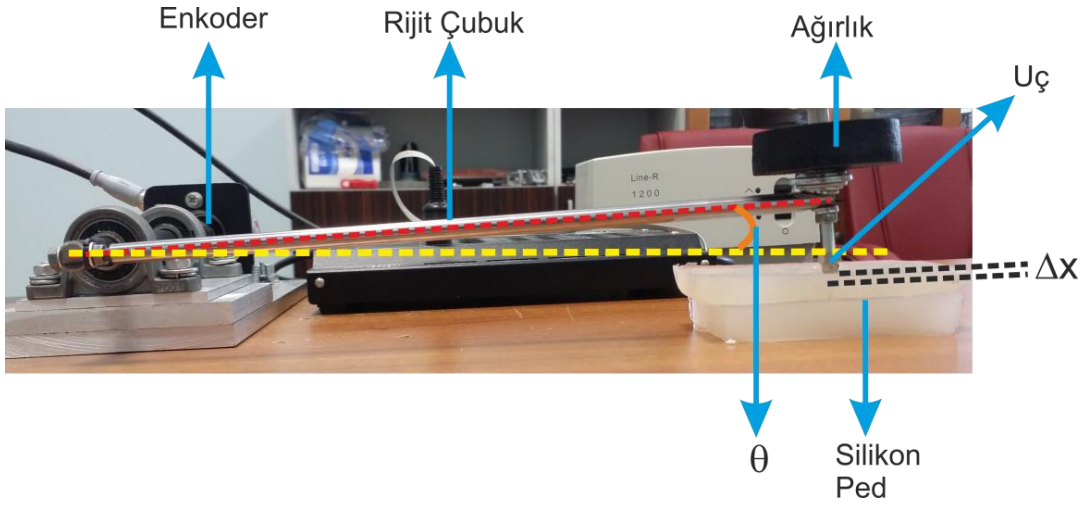


Şekil 9.4 Matematik modelin doğruluğunun sınanmasının blok diyagramı

9.2.2.2 Sabit Kuvvet Uygulayabilen Deney Düzeneği Hakkında

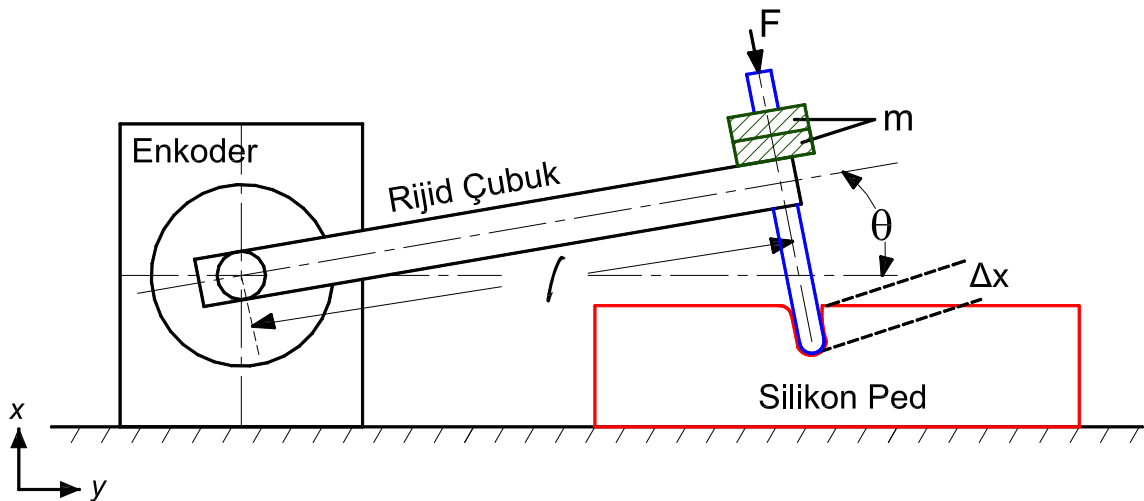
Tek eksenli kartezyen robot deney düzeneğinde konum kontrolü yapıldığında silikon pedin viskoelastik davranışının tespiti için kullanımı mümkün değildir. Silikon pedin

sabit kuvvet altında davranışı algılayabilmek şekil 9.5'deki gibi sabit kuvvet uygulayabilen bir deney düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir.

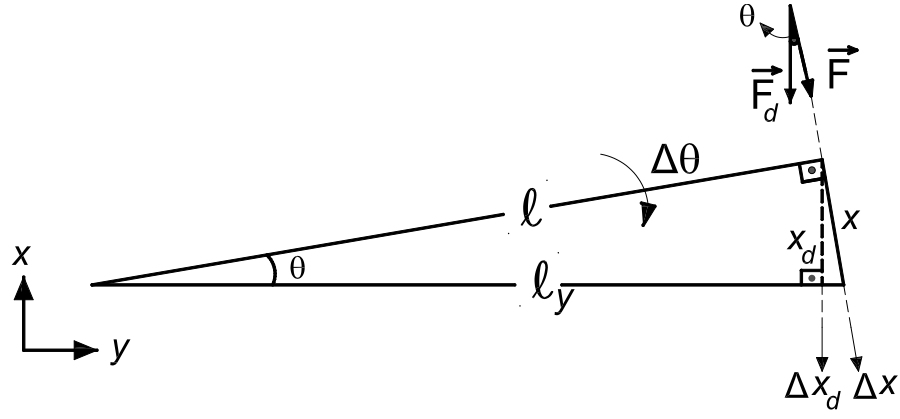


Şekil 9.5 Sabit kuvvet uygulanabilen ve yer değiştirmenin ölçüldüğü deney düzeneğinin resmi

Bu düzenek te “ m ” kütleli cisimler ile kuvvet kontrol edilmektedir. Deney için öncelikle ek ağırlıksız sistem silikon pedin üzerine serbest olarak bırakılır. Sonra daha önceden belirlen ek ağırlık sisteme şekildeki gibi eklenir. Eklenen kütleyle bağlı olarak açı değişimi ölçülür. Açı değişimi esnasında küresel uçlu tahrik elemanı silikon pede batmaktadır. Açı enkoder üzerinden ölçülmektedir. Yer değiştirme, açı ve rijit homojen çubuğun uzunluğu cinsinden bağıntılar aşağıdaki gibi elde edilebilir, Şekil 9.6 – 9.7.



Şekil 9.6 Sabit kuvvet uygulanabilen ve yer değiştirmenin ölçüldüğü deney düzeneğinin 2B açıklaması



Şekil 9.7 Sabit kuvvet uygulanabilen ve yer değıştirmenin ölçüldüğü deney düzeneğinin serbest cisim diyagramı

Deney başlatılırken ilk açı yani başlangıç açısı yaklaşık 1.5 derece olarak seçilmiştir. Böylelikle $x_d = 7.5$ mm olmaktadır. Sabit kuvvet deneylerinde yer değıştirmenin en fazla 12 mm olması beklenmektedir. Rijit çubuğun boyu 294 mm olduğuna göre yaklaşık olarak 2.4 derecelik bir açısal yer değıştirme ile dikey olarak 12 mm'lik bir batma gerçekleşmektedir. 0 derece etrafında ± 1.5 derecelik bir açısal değışmede doğrusallaştırılması için yapılan kabulün geçeğe yakın bir sonuç vermesi beklenmektedir.

$$\theta = 1.5^\circ \quad (9.1)$$

$$0^\circ < \Delta\theta < 3^\circ \quad (9.2)$$

$$l \sin \theta < \Delta x < l \sin \theta \quad (9.3)$$

$$0 < \Delta x < 15 \quad (9.4)$$

Başlangıç açısının 1.5 derece, toplam açısal değışmenin en fazla 3 derece olması durumunda 15 mm'lik bir dikey yer değıştirme olacaktır. Bu kabuller altında dönmeden kaynaklanan doğrusal olmayan yer değıştirme ve kuvvetler ihmal edilerek doğrusal olduğu kabul edilmiştir.

$$\Delta x = l_y \sin(\Delta\theta) \quad (9.5)$$

$$\Delta x_d = l \sin(\Delta\theta) \quad (9.6)$$

Yapılan deneylerde kuvvet sabittir. Sabit kuvvet altında yer değiştirme verisi elde edildikten sonra, elde edilen yer değiştirme verisi viskoelastik modeller ile kıyaslanmıştır. Denklem 9.7 ve 9.8 formundaki denklem ile elde edilecek deney verisi ile viskoelastik model ile hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

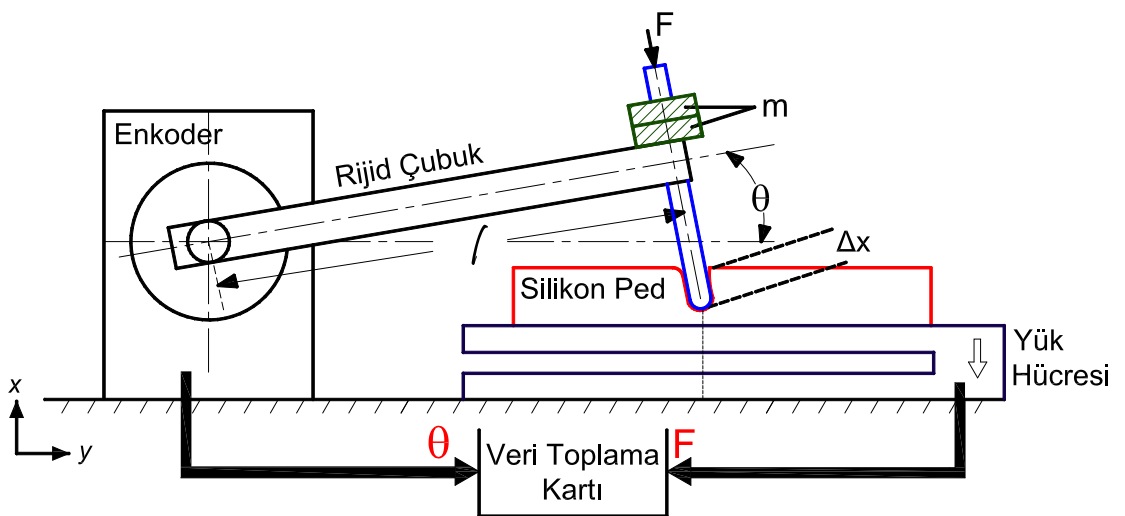
$$F_d \cong m g \sin \theta \quad (9.7)$$

$$\Delta x_d(t) = g(F_d, k, b, t) \quad (9.8)$$

Sabit kuvvet deney düzeneği ile “*m*” kütleleri ile kontrol edilen sabit bir “*F*” kuvveti altında enkoder ile batma miktarının değişimi ölçülmektedir.

9.2.2.3 Değişken Kuvvet Ve Yer Değiştirme Ölçme Deney Düzeneği Hakkında

Daha önceki deney düzeneklerinde ya kuvvet ya da yer değiştirmeden biri sabit olarak seçilerek deney gerçekleştirilebilmekteydi. Şekil 9.8’deki deney düzeneğinden enkoder yardımıyla açı değişimi yani batma miktarı (yer değiştirme), yük hücresi ile de kuvvet ölçülmektedir. Bu deney düzeneğinde kuvvet ve yer değiştirme bağımsız olarak değiştirilebilmektedir. Böylelikle hem belli bir yer değiştirme için gerekli kuvvet hem de belli bir kuvvet uygulandığında yer değiştirme ölçülebilmektedir.

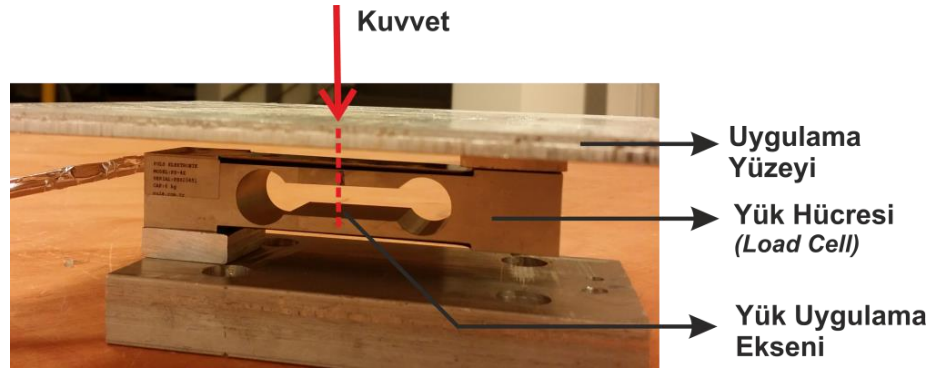


Şekil 9.8 Değişken kuvvet uygulanabilen yer değiştirme ve uygulanan kuvveti ölçen deney düzeneği

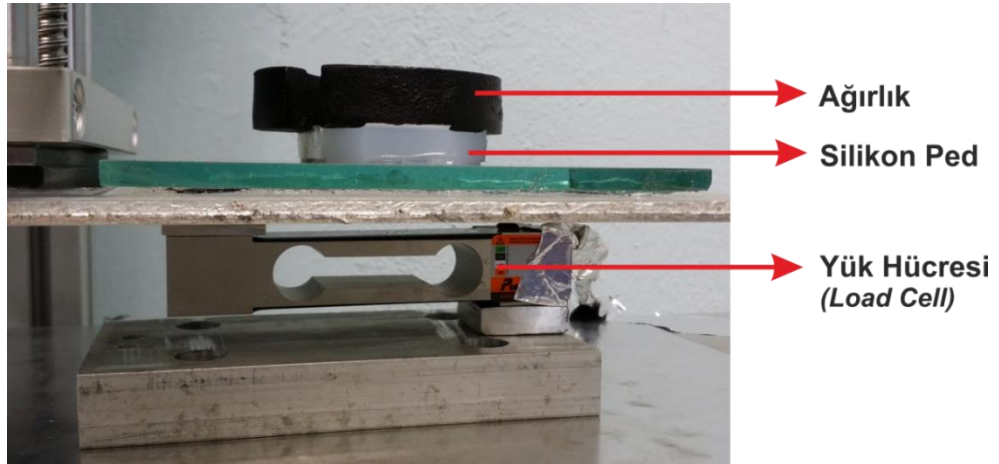
Bu deney düzeneği ile yapılacak deneyler ile silikon pedin modeli için hangi matematiksel modelin daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Sonuç olarak eldeki sistem için en uygun matematiksel yaklaşım seçilmiştir.

9.2.3 Yük Hücresi ile Kuvvet Ölçümü

Kuvvet ölçümü için 0 – 60 N arası ölçüm yapan analog 0 - 10 VDC çıkışlı platform tipi bir yük hücresi kullanılmıştır. Sensörün çıkış hassasiyeti 2 mV/V olduğu için 60 N kapasiteli olan yük hücresi ile teorik olarak kuvvet 0.012 N çözünürlüğünde ölçülebilmektedir. Yapılan deneylerde en fazla %0.2 ile %0.5 yani 20 mV ile 50 mV arasında elektriksel bir parazit tespit edilmiştir, Şekil 9.9 - 9.10. Sonuç olarak en kötü ölçümde yaklaşık olarak 0.3 N'luk bir çözünürlük elde edilebilmektedir. Ölçümleri bilgisayar aktaran veri toplama kartının analog dijital çeviricisi 16 bit olduğu için 0.15 mV çözünürlüğünde okuma yapabilmektedir.



Şekil 9.9 Platform tipi yük hücresi ile ölçüm



Şekil 9.10 Platform tipi yük hücresi silikon pede uygulanan kuvvetin ölçülmesi

9.2.3.1 Yük Hücresinin Kalibrasyonu

Yük hücresinin çıkışı 0 – 10 VDC gerilimdir. Gerilim çıkışı ile ölçülen kuvvet arasından doğrusal ilişki mevcuttur. Bu ilişkinin doğrusal olması ölçümün doğruluğunu da göstermektedir. 0.2 N ile 20 N aralığında 11 farklı kuvvet uygulanarak gerilim değerleri kaydedilmiştir.

Yapılan 11 deneyde uygulanan kuvvet ile ölçülen gerilim değeri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

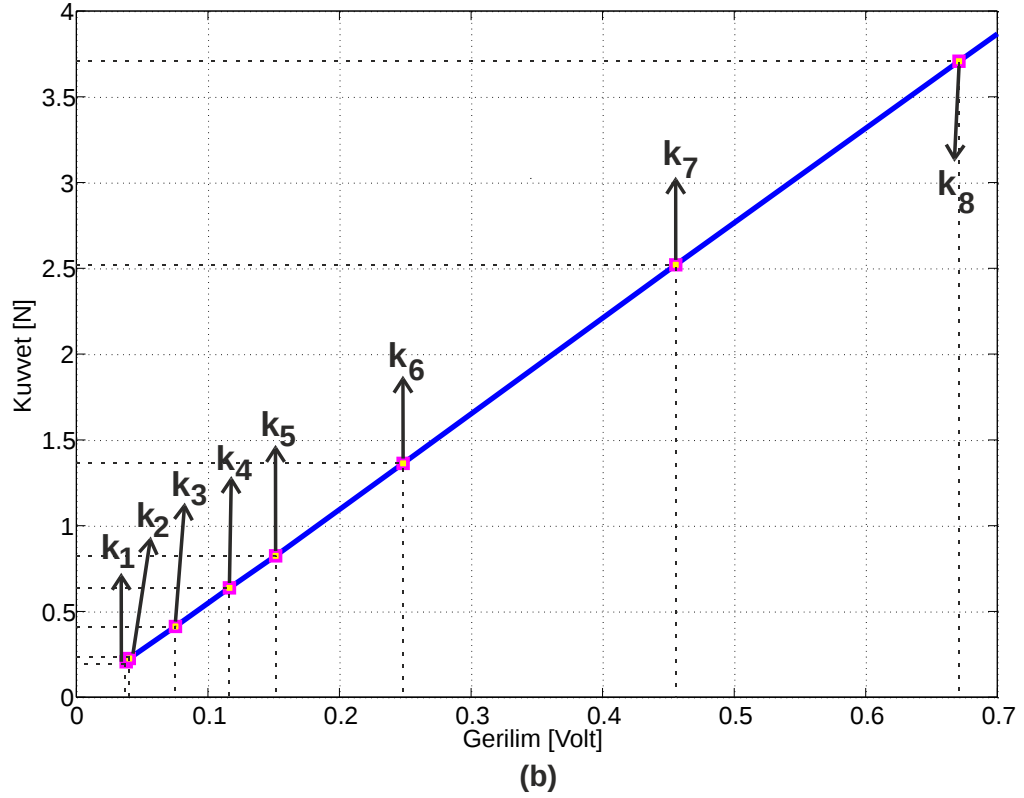
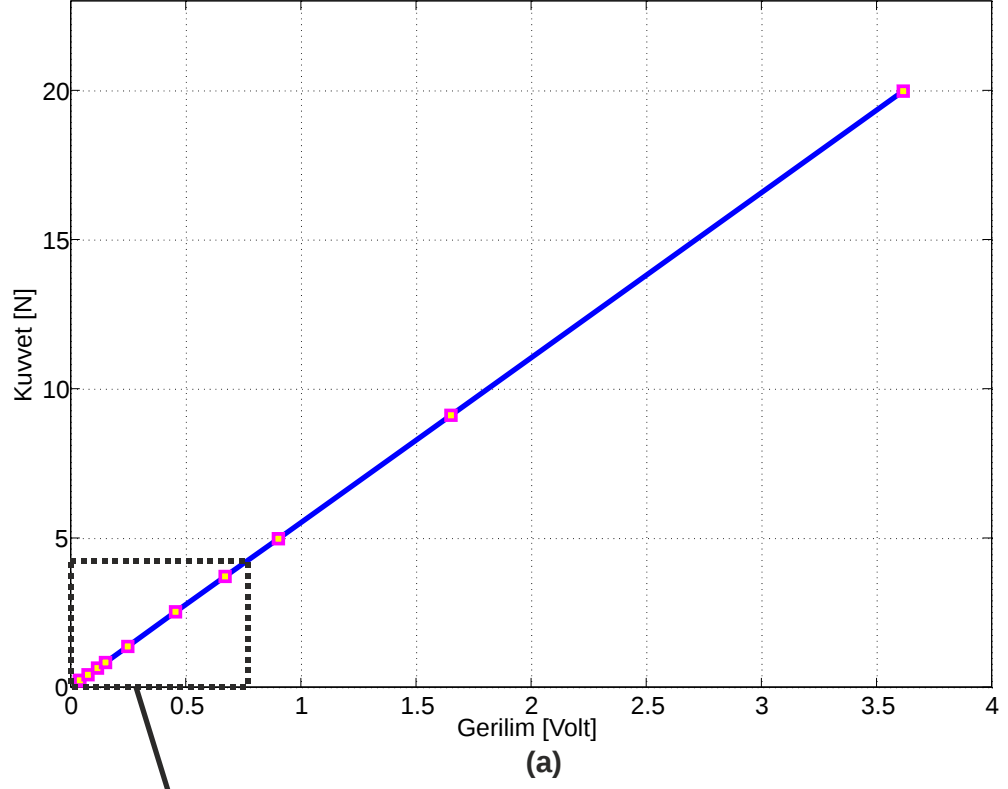
$$N = kV \quad (9.9)$$

$$k = \frac{N}{V} \quad (9.10)$$

$$k_{ORT} = \frac{\sum_{i=1}^{n=11} \left| \frac{N_i}{V_i} \right|}{n} \quad (9.11)$$

Sonuç olarak ölçülen voltaj değeri k_{ORT} katsayısı ile çarpıldığında uygulanan yük/kuvvet Newton biriminden hesaplanabilir. Ölçümün doğrusal olduğu Şekil 9.11’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere geniş bir değer aralığında uygulana kuvvete karşı ölçülen gerilim doğrusal olarak belli bir oranda artmaktadır.

Ek B’de verilen Çizelge B.1’de yük hücresinin kalibrasyon katsayısı yani ölçülen gerilim değerini uygulanan kuvvete dönüştüren katsayı görülmektedir.



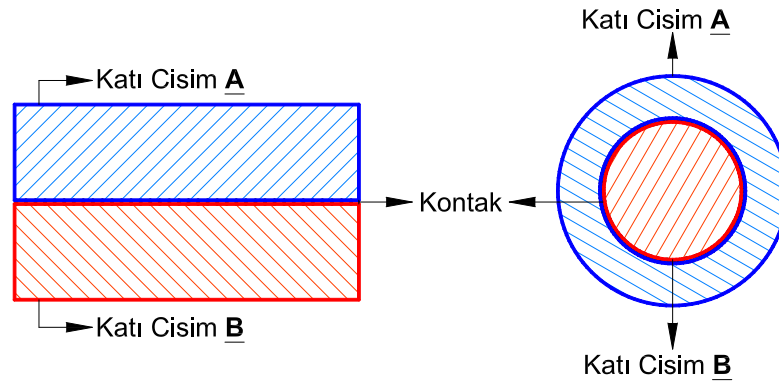
Şekil 9.11 a. Ölçümün doğrusallığı b. Ölçümün doğrusallığı - yakınlaştırılmış görüntü

9.3 Kontak Mekaniğinde Bazı Kavramlar

Bu bölümde kontak mekaniği ait terminoloji ile eldeki sistemi modeli için kullanılacak teknik üzerinde durulmuştur.

9.3.1 Uyan Kontak

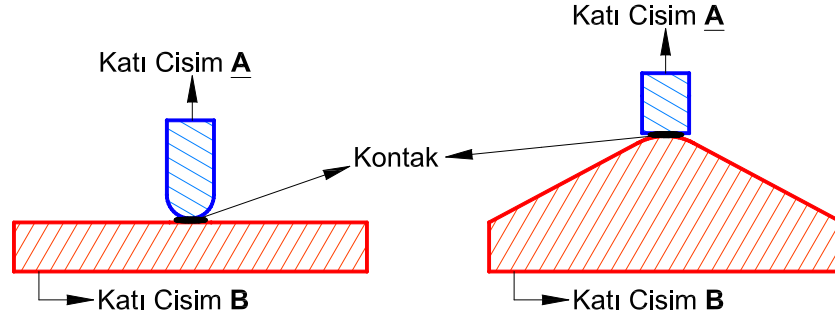
Birbiri ile aynı olan yüzeylerin temasına (“conforming”) uyan kontak denilir. Bu tip kontakta deformasyon gerçekleşmeden önce cisimler birbirlerine birden fazla noktandan temas halindedir. Şekil 9.12 ‘de görüldüğü gibi iki aynı dikdörtgenler prizmasının veya eş merkezli iç içe geçmiş iki silindirin yüzey teması ile uyan kontak gerçekleşir [100 - 105].



Şekil 9.12 Uyan kontak

9.3.2 Uymayan Kontak

Farklı yüzeylerin birbiri ile temasına (“non-conforming”) uymayan kontak denilir. Uymayan kontakın gerçekleştiği durumlarda cisimler arası temas yüzeyi cisimlerin yüzey büyüklükleri ile oranlandıklarında küçük kalır. Uymayan kontakta temasın gerçekleştiği alanda basınç yoğun ve büyük olur. Bu tip bir kontak noktasal ve çizgisel olabilir. Uymayan kontak gerçekleştiğinde yüzeyde deformasyon oluşumu öncesi noktasal ya da çizgisel olarak temas gerçekleşmektedir, Şekil 9.13 , [100 - 105].



Şekil 9.13 Uymayan kontak

9.3.3 Elastik Yarı Düzlem

Şekil 9.12 ve 9.13’de birbirine temas eden cisimlerden katı cisim B olarak tanımlanan geometri elastik bir yarı düzlemdir. Yarı düzlem, geometride sadece tek bir sınırı olan diğer sınırların sonsuza gittiği kabul edilen ideal olarak homojen ve izotropiktir [100 - 105].

9.3.4 Bağlı ve Bağlı Olmayan Elastik Kontak

Birbiri ile kontak halindeki iki cisim ayrılmaya çalışıldığında, eğer cisimlerin kontak noktalarında birbirilerine bağlanmalarından (yapışmalarından) meydana gelen tutucu, ayrılmaya karşı direnç gösteren bir kuvvet etkisi görülüyorsa bu bağlı “adhesive” bir kontaklıdır. Eğer böyle bir kuvvet oluşmuyorsa ve cisimler teması bağlı olmayan “non-adhesive” bir kontaklıdır, [100 - 105].

9.3.5 Sıkıştırılabilirlik ve Sıkıştırılamazlık (Bulk Modülü)

Sıkıştırılabilirlik hidrostatik basınç altında hacmin değişime kabiliyetidir. Sıkıştırılabilirlik katı veya sıvılarda uygulanan basınca karşılık hacimdeki değişim oranıdır. Bunun tersi sıkıştırılamamazlık yani Bulk modülüdür [106].

Bulk modülü malzemenin basınca karşı şekil değiştirmeye gösterdiği direncin oranıdır. Birimi Pascal’dır.

9.3.6 Silikon Pedin Bulk Modülü ve Sıkıştırılamazlığı

Silikon; karbon, hidrojen, oksijen ve bazı başka elementlerin bir araya gelmesi ile oluşan polimer yapıda bir malzemedir [107].

Elastomer ise viskoelastik yapıdaki polimerlere verilen genel addır. Viskoelastisite hem viskoz hem de elastik olmayı gerektirir. Bu gibi malzemeler genel olarak düşük Elastisite (Young's) modülüne sahip olurlar.

Elastomerler, yani elastik polimerler genel olarak lastik diye adlandırılırlar. Silikon ped'te bu anlamada bir elastomerdir yani lastiktir.

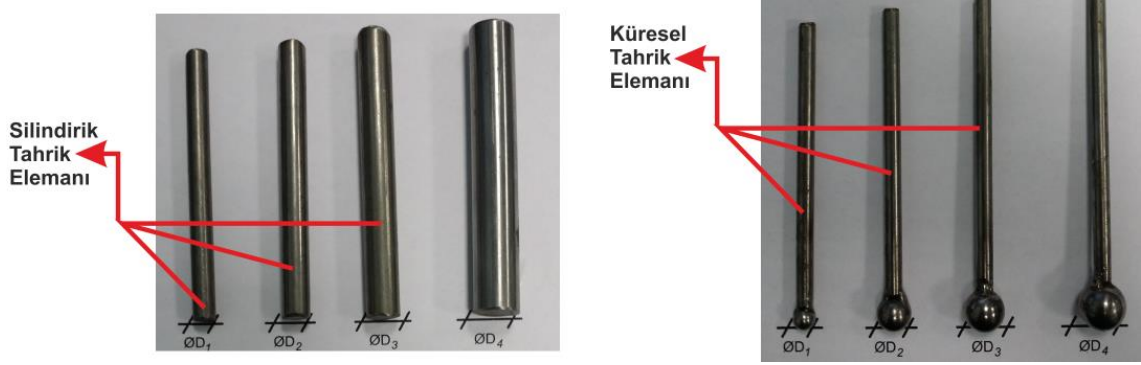
Silikon ped yani lastik, polimer zincirlerinden oluşmaktadır. Her bir polimer zinciri birçok monomerin bir araya gelmesi ile oluşur. Bir polimer oluşturmak için diğer monomerlere kimyasal olarak bağlanabilecek küçük herhangi bir moleküle monomer denir. Birbirine kovalent bağlar ile bağlanmış polimer zincirleri silikon pede veya lastiğe katı gibi bir fazda davranmasına imkân tanır. Monomer düzeyinde ise sıvı gibi bir fazda davrandığından şekil değiştirmesi kolaydır. İncelendiğinde lastiğin kolayca şekil değiştirdiği fakat hacim değiştirmesin çok zor olduğu ortaya çıkmaktadır, [106].

Elastik ve kayma modülü değeri bulk modül değerinden çok küçük olan silikon ped veya lastik için modelleme yapıldığında hacimsel değişim ihmal edilerek şekilsel değişim üzerinde yoğunlaşmıştır. Böylelikle silikon pedin veya lastiğin sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmiş olunur.

9.3.7 Rijit Tahrik Elamanının Elastik Modülü ve Poisson Oranı - ν

Deneylerde kullanılacak küresel tahrik elemanı çelik bir milin ucuna rulman bilyesinin kaynaklanması ile elde edilmiştir. Yani kontağı gerçekleştirecek malzeme rulman bilyesidir, Şekil 9.14. Silindirik tahrik elamanında da yine kromlu çelik mil malzeme kullanılmıştır.

Bu iş parçalarının üretiminde kullanılan malzeme DIN normuna göre 100 Cr 6 kodu olan alaşımlı soğuk iş çeliği olarak da adlandırılan kromlu çeliktir. Bu malzemenin elastik modül değeri 200 GPa'dır [110]. Bu malzeme ile üretilen tahrik elemanları rijit olarak kabul edilmiştir. Alaşımlı çelik malzemenin poisson oranı da 0.3 olarak kabul edilmiştir [110].



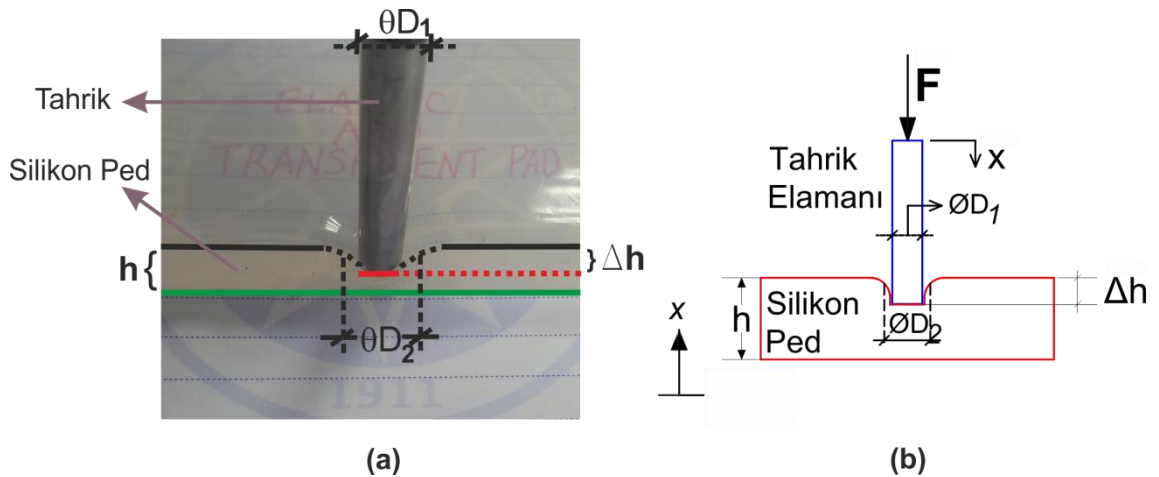
Şekil 9.14 Küresel ve silindirik tahrik elemanlarının gerçek fotoğrafı

9.4 Silikon Pedde Gerçekleşen Kontak için Kullanılabilecek Modeller Hakkında

Tez kapsamında üretilen deney düzeneği ile yapılan deneylerde, Şekil 9.15.a görünen 3 boyuttan Şekil 9.15.b deki tek boyuta indirgenmiş modelin yer değiştirme (batma miktarı) yani yer değiştirme “ Δh ” değeri ile kontak bölgesinin çapı, “ D_2 ” ölçülebilmektedir.

Tahrik elemanının çapı “ D_1 ” ise kontak bölgesinin çapı yani yer değiştirmenin olduğu bölgenin çapı “ D_2 ” ve yer değiştirme “ Δh ” üzerinden denklem 9.12’deki gibi hesaplanabilir. Bu denklem devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır [101, 108, 109].

$$\theta D_1 = \sqrt{\theta D_2 \Delta h} \quad (9.12)$$



Şekil 9.15 Fiziksel modelin serbest cisim diyagramı

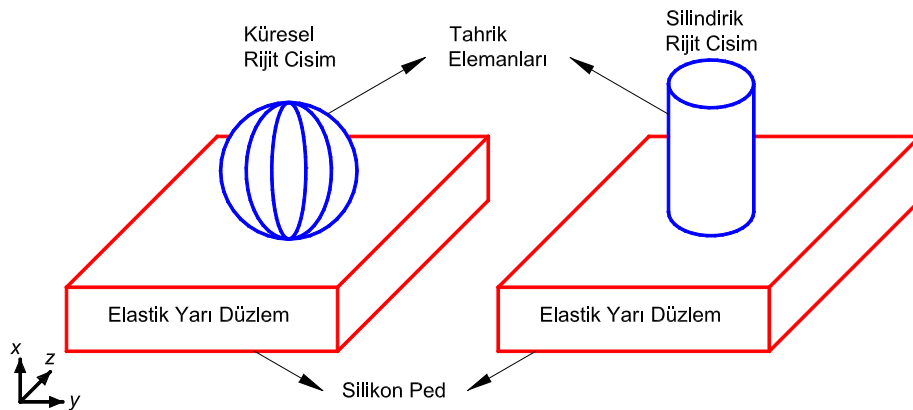
“ Δh ”, “ D_1 ” ve “ D_2 ” değerlerinin ölçülüp hesaplanması ile pede uygulanan tahrik kuvveti “ F ” ve yüzeydeki kuvvet haritası hesaplanabilir. Bunun için;

- Boyut İndirgeme Metodu Modeli
- Sönümlü Boyut İndirgeme Metodu Modeli
- Maxwell Modeli
- Kelvin – Voigt Modeli
- Zener (Standart Doğrusal Katı Modeli) Modeli

modelleri içinden tez kapsamında geliştirilen isteme en uygun olanının belirlenmesine çalışılmıştır. Bu modeller ile elde edilen sonuçlar, deney düzeneklerinden elde edilecek gerçek sonuçlar ile karşılaştırılarak sistem için en uygun model ortaya çıkarılmıştır. Modellerin doğruluğu araştırması aşağıdaki kabuller altında gerçekleştirilmiştir.

9.4.1 Kabuller

- Silikon ped ideal bir elastik yarı düzlem olarak modellenmiştir, Şekil 9.16.
- Tahrik elamanı olarak sadece silindir ve küre geometrisi kullanılacaktır.
- Tahrik elamanları rijit kabul edilmiş ve modellenmişlerdir.
- Tahrik ile oluşan kuvvetin silikon ped üzerinde oluşturacağı deformasyon elastik sınırlar içerisinde kalacaktır.
- Temasın sürekli olduğu tahrik elamanı ile temas edilen yüzey arasındaki kontakın birlikte hareket edeceği kabul edilmiştir.
- Uygulanan kuvvet yatay eksene diktir ve kayma kuvveti olmadığı kabul edilmiştir.
- Gerçekleşen kontak, uymayan ve bağlı olmayan bir kontak olarak kabul edilmiş ve modellenmiştir.
- Silikon ped homojen ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiş ve modellenmiştir.



Şekil 9.16 Tahrik elemanları ve elastik yarı düzlem

9.5 Boyut İndirgeme Metodu

“The Method of Dimensionality Reduction”, yani boyut indirgeme metodu kısaca MDR bazı kontak mekaniği problemleri için uygulanabilen, 3 boyutlu geometri ve modelin indirgenerek tek boyutlu olarak irdelenmesi ile kesin ve açık çözümün hesaplanabildiği bir paket tekniktir. Bu teknik kullanılarak elastik düzlemde gerçekleşen yer değiştirme ile kontak kuvveti arasındaki ilişki ve bazı durumlarda kontak alanı arasındaki ilişki kurulabilmektedir. Bağlı veya bağımsız kontak problemleri tek boyuta indirgenip modellendikten sonra klasik kontak mekaniği temelleri kullanılarak kolayca çözülebilmektedir. Bu teknik, elastisite teorisi üzerine kurulmuş ve kesin çözüm veren bir tekniktir, bir yaklaşım metodu değildir [111 - 113].

Bu metotta modelin basitleştirilmesi aşağıdaki aşamalar ve kabuller ile adım adım yapılmaktadır.

- Yaklaşık 320 m/s olan ses hızından çok daha düşük hızlarda gerçekleşen temasta, deformasyona sebep olan kuvvetin uygulandığı alana statik-benzer bir etkisinin olduğu kabul edilmiştir.
- Potansiyel enerji yani kuvvet-yer değiştirme ilişkisi sadece temasın gerçekleştiği alan ile ilgilidir, teması gerçekleştiren cismin veya temasın uygulandığı yüzeyin şekli veya ebatlarından, yani sistemin bütününden bağımsızdır.
- Kinetik enerji ise genel bir değer olup sistemin bütününe şekli ve ebatlarına bağlıdır ve fakat gerçekleşen mikro kontaklardan bağımsızdır.
- Temas, rijit katı bir cisim ile sıkıştırılmaz viskoelastik yani elastomer yapıda bir malzeme arasında gerçekleşmektedir.

Böyle bir yaklaşım ile ataletsel etkenler ile elastik etkenler birbirinden bağımsız hale getirilmiştir.

Öncelikli olarak gerçekleşen kontak, Şekil 9.17’de görüldüğü gibi 2 boyuta, serbest cisim diyagramı olarak indirgenmiştir.



Şekil 9.17 İki boyutlu serbest cisim diyagramı

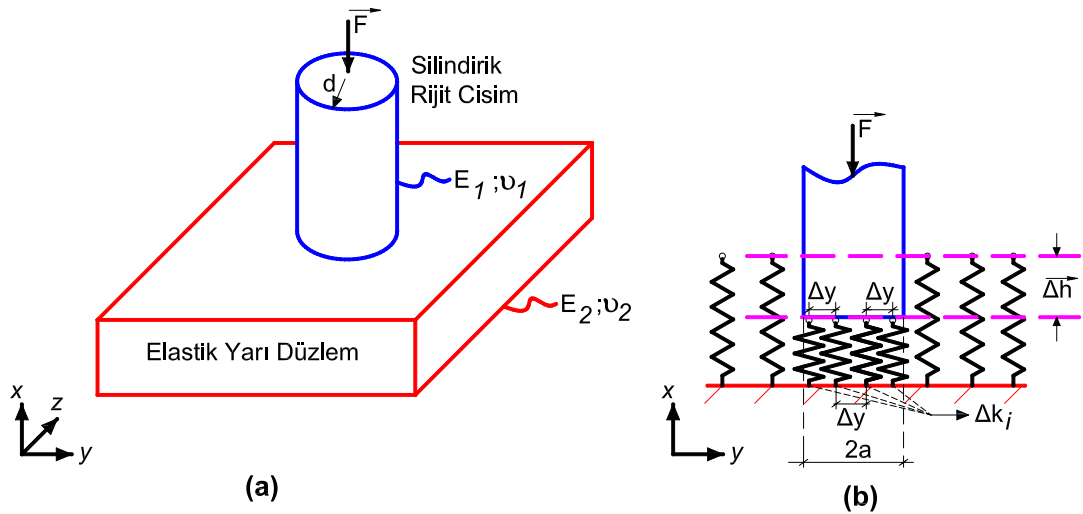
Şekilde 3 boyutlu problemin tek boyuta (yer değiştirme ve uygulanan kuvvet tek boyutludur) indirgenmiş hali görülmektedir. Bu gösterimde sadece x yönünde hareket bulunmaktadır.

9.5.1 Silindirik Kontak

Herhangi bir rijit silindirik tahrik elemanının elastik bir yüzeye bastırıldığında gerçekleşen kontakın rijitliği ("stiffness", k 'sı); silindirik elamanın çapı ile doğru orantılıdır [101].

$$k = 2dE^* \quad (9.13)$$

Silindirik rijit bir tahrik elamanı ile uygulanan tahrik ile gerçekleşen yer değiştirme tek boyutlu olarak aşağıdaki gibi gösterilmiştir, Şekil 9.18. Burada E_1 , ν_1 sırası ile rijit tahrik elemanının elastik modülü ile poisson oranı iken E_2 , ν_2 ise elastik silikon pedin elastik modülü ile poisson oranıdır.



Şekil 9.18 3 boyutlu silindirik kontakın tek boyuta indirgenmesi

E^* efektif elastisite modülü olup kontak halindeki iki cismin elastik modül ve poisson oranlarına bağlı bir değişkendir, (9.14). 9.13 numaralı denklemi sağlamak için birim uzunluktaki rijitlik E^* olarak seçilmiştir.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (9.14)$$

Her bir yay, denklem 9.15'deki rijitliğe, yay sabitine sahip olmalıdır.

$$\Delta k_i = E^* \Delta y \quad (9.15)$$

Bu durumda normal kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki denklem 9.16'daki gibi olur.

$$F = \sum_{i=1}^n \Delta k_i \Delta h \quad (9.16)$$

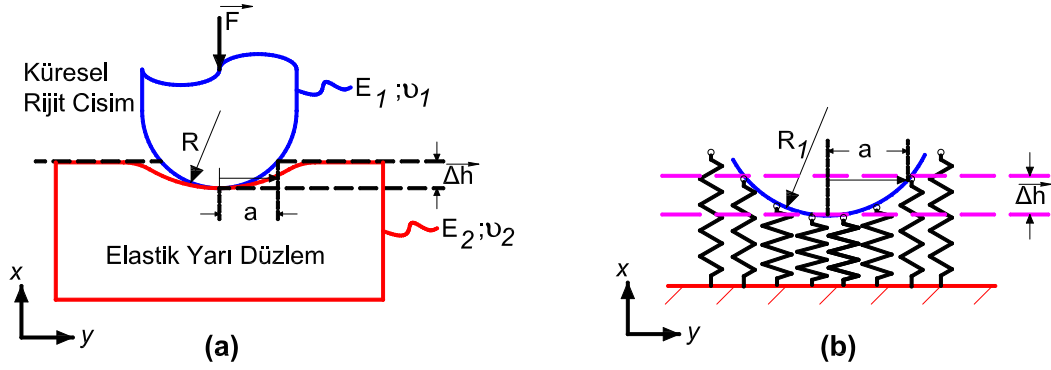
Ya da birinci denklem kullanılarak yaylar yerine kontak rijitliği ve tahrik elemanının çapı kullanılarak aynı denklem elde edilebilir.

$$F = 2d E^* \Delta h \quad (9.17)$$

Denklem 9.16 ve 9.17 aynı olup silindirik rijit bir tahrik elemanının elastik bir yüzeye F kuvveti ile bastırılması durumunda elastik yüzeyde oluşacak batma miktarı yani yer değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır.

9.5.2 Küresel Kontak

Yukarıda anlatılan teknik ile sadece silindirik tahrik elemanları ile yapılan kontaklarda değil küresel tahrik elemanları içinde geçerlidir, Şekil 9.19. Sadece dikkat edilmesi gereken her bir yayın farklı konum değiştirmesidir.



Şekil 9.19 3 boyutlu küresel kontağın tek boyuta indirgenmesi

Enine kesitin dikey doğrultuda uzama faktörü Geiko & Popov kuralı gereği 2 olarak alındığında 3 boyutlu küresel temas tek boyuta indirgenebilmektedir, [107].

$$R_1 = \frac{R}{2} \quad (9.18)$$

Kontak yarıçapı denklem 9.19'daki gibi hesaplanabilir, [101, 108, 109].

$$a = \sqrt{2R_1 \Delta h} = \sqrt{R \Delta h} \quad (9.19)$$

Bu durumda normal kuvvet ile batma miktarı yani yer değiştirme arasındaki ilişki denklem 9.20'deki gibi olur. Bu da hertzian teorisi ile uyuşmaktadır.

$$F = \frac{4\sqrt{2}}{3} E^* \sqrt{R_1 \Delta h^3} \quad (9.20)$$

Hem küresel hem de silindirik rijit tahrik elemanın, elastik bir yüzeye bastırılması ile oluşan kontakta, kuvvet ile batma miktarı arasındaki bağıntı boyut indirgeme metodu ile yukarıdaki gibi hesaplanmıştır.

Kullanılan matematiksel modelleme metodunda tahrik elemanının çapı bilindiği durum üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır. Fakat tez kapsamında kullanılacak modelde tahrik elemanı küresel bir yapıda ise bu kürenin çapı değil tahrik ve oluşan bölgenin yani kontağın çapı ölçülebilmektedir. Yani “R” değil “a” ölçülebilmektedir. Bu durumda 9.21 ve 9.22 numaralı denklemler yardımıyla küresel tahrik elemanının çapı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$R_1 = \frac{a^2}{2\Delta h} \quad (9.21)$$

$$R = \frac{a^2}{\Delta h} \quad (9.22)$$

9.22 numaralı denklem ile batma miktarı (yer değıştirme) ve kontak yarıçapı ile tahrik elamanın yarıçapı arasındaki bağıntı gösterilmektedir.

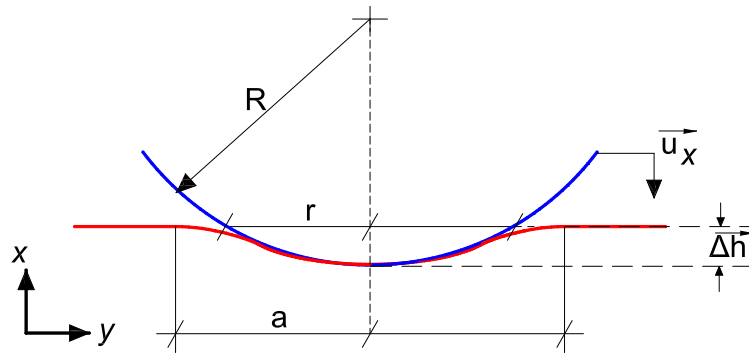
9.5.3 Hertzian Kontak Teorisi

Elastik yarı düzlem ile küresel rijit tahrik elemanı arasında gerçekleşen kontak yüzeyindeki noktaların yer değıştirmesi u_x maksimum basınç p_0 ve kontak yarıçapı – a 'ya bağılı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir [101].

$$u_x = \Delta h - \frac{r^2}{2R} = \frac{1}{E^*} \frac{\pi p_0}{4a} (2a^2 - r^2) \quad (9.23)$$

Bu ifadenin nasıl üretildiğı ile ilgili detaylar verilen referansta [101] mevcuttur. Kontak mekaniğinde kullanılan temel teorilerden biri olan Hertzian kontak teorisi bu ifadenin ispatını yapmaktadır.

Buradan yer değıştirme ile maksimum basınç arasındaki bağıntı ile yer değıştirme ile kontak yarıçapı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi ortaya çıkmaktadır, Şekil 9.20.



Şekil 9.20 Hertzian kontak modeli

$$\Delta h = \frac{\pi a p_0}{2E^*} \quad (9.24)$$

$$a = \frac{\pi R p_0}{2 E^*} = \sqrt{R \Delta h} \quad (9.25)$$

Maksimum basınç ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir [101].

$$p_0 = \frac{2}{\pi} E^* \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (9.26)$$

Kontak alanı ile maksimum basınca bağlı olarak uygulanan kuvvet aşağıdaki gibi ifade edilebilir [101].

$$F = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2 \quad (9.27)$$

(9.25) ile (9.26), (9.27)'inci denklemde yerine konulduğunda normal kuvvet ile deplasman arasındaki ilişki bulunur.

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R \Delta h^3} \quad (9.28)$$

Denklem 9.20 ile denklem 9.28 karşılaştırıldığında Hertzian teorisi ile boyut indirgeme metodun uyduğu görülmektedir.

9.5.4 Kontak Alanında Gerilim Dağılımı

Silindirik kontak yüzeyindeki basınç dağılımı Abel transformasyonu ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir, [109].

$$p(r) = -\sigma_{xx}(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{\dot{q}(y)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (9.29)$$

$\Delta f(y)$, y koordinatında yaydaki normal kuvvet olmak üzere doğrusal kuvvet yoğunluğu aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$q(y) = \Delta f(y) / \Delta y \quad (9.30)$$

Gerçekleşen kontakta, kontak yarıçapı a 'nın tahrik yarıçapı r 'den büyük olduğu durumlar için gerekli işlemler yapıldığında silindirik tahrik elemanı için basınç dağılımı denklem 9.28'deki gibi olurken, küresel tahrik elemanı için denklem 9.31'deki gibi olmaktadır [111 - 113].

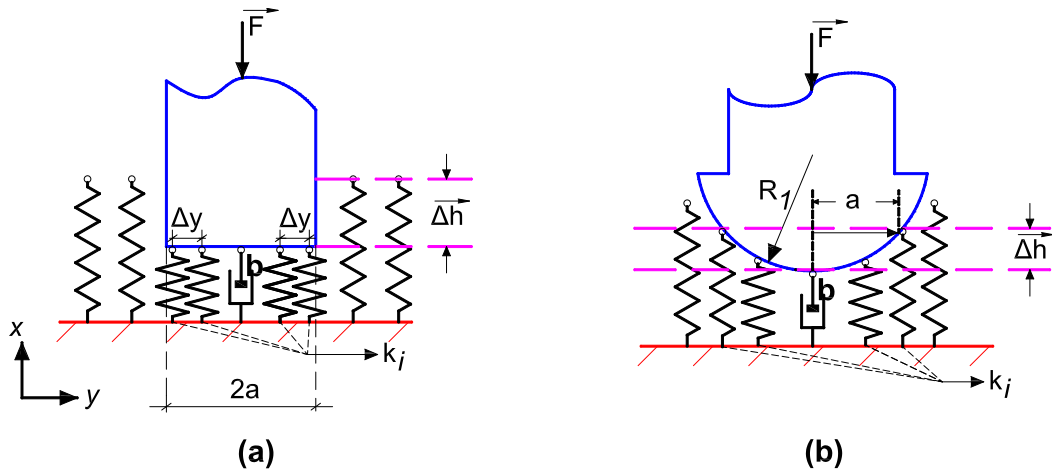
$$p = \frac{F_N}{2\pi a^2} \frac{1}{\sqrt{1-(r/a)^2}} \quad (9.31)$$

$$p = \frac{2}{\pi} E^* \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \sqrt{1-(r/a)^2} \quad (9.32)$$

Boyut indirgeme ile hesaplanan (9.31), (9.32)'deki bağıntılar Hertzian teorisi ile uyuşmaktadır.

9.6 Sönümlü Boyut İndirgeme Metodu Modeli

Sönüm katsayısı hesaplanırken sönümün tahrik geometrisinden bağımsız olduğu kabul edilmişti. Buradan yararlanarak boyut indirgeme metodu ile elde edilen tek boyutlu kontak modeline basit bir sönüm elemanı eklenerek yeni bir model elde edilmiştir, Şekil 9.21.



Şekil 9.21 Elastik ped de gerçekleşen kontak için klasik model alternatifleri

Pozitif x doğrultusu aşağı yönlüdür, kuvvet ile yer değiştirme pozitif x doğrultusundadır. Şekil 9.21.a'da silindirik b.'de ise küresel kontak için model gösterilmiştir. Bu iki model de de silikon pedin elastik modülü ve sönüm katsayısı üzerinden yer değiştirme ile

kuvvet arasındaki ilişki kurulmuştur. Silindirik kontak için matematiksel ifade denklem 9.33 ile verilmiştir.

$$F = 2d E^* \Delta h + b v \quad (9.33)$$

Küresel kontak için ise için matematiksel ifade denklem 9.34 ile verilmiştir.

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R \Delta h^3} + b v \quad (9.34)$$

9.7 Viskoelastisite ve Doğrusal Viskoelastik Malzemelerin Modellenmesi

Viskoelastik malzemeler hem viskoz hem de elastik davranan malzemelerdir. Elastomer, viskoelastik yapıdaki polimerlere verilen genel addır. Elastomerler, yani elastik polimerler genel olarak lastik diye adlandırılırlar. Silikon ped'te bu anlamada bir elastomerdır yani lastiktir.

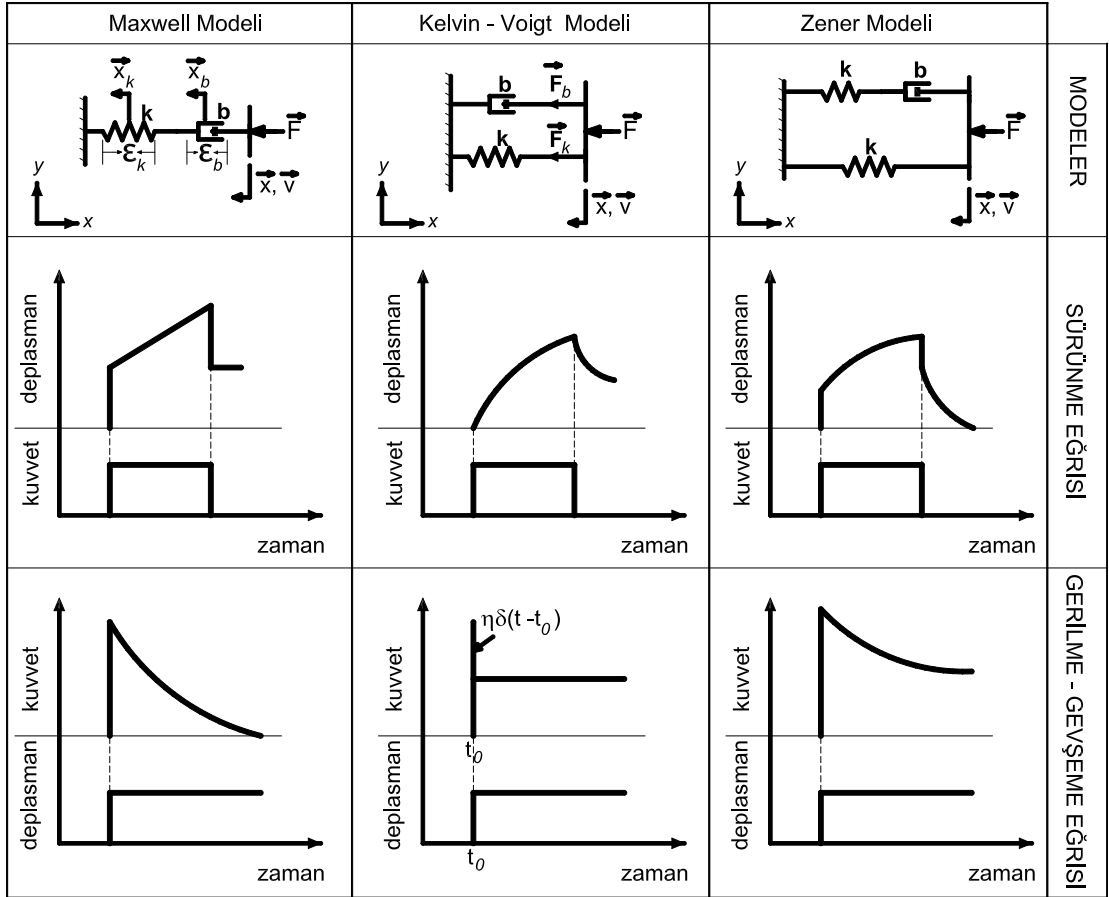
Viskoelastik terimi, hem katıların elastik hem de sıvıların akış davranışını tanımlamaktadır [114 - 116]. Yarı katı ürünler hem katı, hem de sıvının özelliklerini gösterir. Bir katı madde, akış ile karakterize edilemez, ancak elastisite özelliği ile tanımlanır. Viskoelastik malzemelere dışarıdan bir tahrik uygulandığında yani yük altında nasıl şekil değiştirdikleri; gerilimin gevşemesi-boşalması ("stress relaxation") ve sürünme ("creep") ile açıklanmaktadır [117 - 118].

Viskoelastik malzemeler de deformasyonun sabit olması durumunda gerilimin nasıl azalacağını yani nasıl gevşeyeceğini gösteren bir eğriye gerilimin gevşemesi-boşalması eğrisi ("stress relaxation") denir, [119]. Sabit deformasyonda kuvvet eğrisini gösterir.

Sürünme eğrisi viskoelastik malzemenin yük altında yavaş hareketle değişim eğrisi olarak tanımlanır. Sürünme eğrisi elde edebilmek için sabit gerilim (σ) bir zaman periyodu (t) içinde uygulanır. Bir diğer ifade ile sabit kuvvet altında deformasyon eğrisidir. Deformasyon veya gerilim zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Elastik katılar kısa bir sürede deformasyona uğrarlar. Gerilim ile biçimleri değişir ve gerilim kalkınca da orijinal yapılarına dönüşebilirler [120].

Viskoelastik malzemelerin modellenmesinde 3 farklı temel model vardır. Viskoelastik davranış bu 3 model gibi mekanik modellerle açıklanabilir. Bunlardan ilki seri halde bir yay ve damperden oluşan Maxwell modeli, ikincisi paralel halde bir yay ve damperden oluşa Kelvin-Voigt modeli sonuncusu da seri bir yay dampere paralel bir yaydan oluşan Zener bir diğer adıyla standart doğrusal katı modelidir, Şekil 9.22.

Hem viskoz hem de elastik davranan viskoelastik malzemelerin modellenmesinde kullanılan Maxwell modeli gerilim boşalmasının hesaplanmasında daha doğru sonuç verirken sürünme hesaplanmasında zayıf kalmaktadır. Buna karşın Kelvin-Voigt modeli ise sürünmeyi daha iyi hesaplarken gerilim boşalmasında zayıftır. Standart doğrusal katı modelleri yani Zener modelleri hem sürünme hem de gerilimin gevşemesinde daha başarılı sonuç vermektedir, Şekil 9.22.



Şekil 9.22 Doğrusal viskoelastik modeller ile sürünme ve gerilme-gevşeme eğrileri

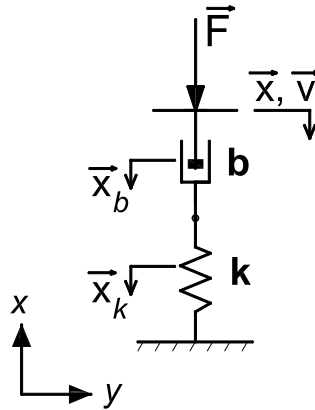
Doğrusal viskoelastik modeller klasik yay damper modellerinden farklıdır. Klasik bir yay damper sisteminde uygulanan F kuvvetine bağlı olarak bir yer değiştirme olur ve kuvvet sabit kaldıkça yer değiştirme sabittir. Bir başka ifade ile aynı yer değiştirme miktarı için

belli ve sabit bir kuvvet uygulamak gerekmektedir. Viskoelastik modellerde ise kuvvet sabit kalsa da yer değiştirme sabit olmamaktadır.

Doğrusal viskoelastik modellerde sabit bir yer değiştirme için sabit bir kuvvet gerekli değildir, şekil 9.22. Kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki bir önceki klasik modellerdeki gibi değildir. Bu da viskoelastik malzemelerin katı değil yarı katı olarak modellenmesinden kaynaklanmaktadır.

9.7.1 Maxwell Modeli

Maxwell modeli viskoelastik malzemeler için ortaya atılmış bir modeldir. Maxwell modeli uç uca eklenmiş tamamen elastik bir yaya ve tamamen viskoz bir damperden oluşmaktadır, şekil 9.23.



şekil 9.23 Maxwell modeli

Maxwell modelinde sabit bir gerilim uygulandığında, materyal üzerinde bir deformasyon olur. Gerilim kaldırıldığında yay eski haline döner, ancak viskoz akış eski haline dönemez, [121 - 123].

şekil 9.23'teki model $t=0$ anında sabit bir yer değiştirme (x) uygulanırsa yay ve damper üzerinde eşit bir kuvvet meydana gelir, (9.35). Toplam yer değiştirme ise yay ve damperdeki yer değiştirmelerin toplamına eşittir (9.36).

$$\vec{F} = -k \vec{x}_k = -b \frac{d\vec{x}_b}{dt} \quad (9.35)$$

$$\vec{x} = \vec{x}_k + \vec{x}_b \quad (9.36)$$

Bu analizlerde amaç kuvvet şiddeti ile yer değiştirme miktarı arasındaki ilişkinin tespiti olduğu için analizlere vektörel niceliklerin şiddeti üzerinden skaler işlemler yapılarak devam edilmiştir. Denklem 9.36, 9.35'te yerine yazılır ve devam eden matematiksel işlemler yapılır ise;

$$k(x - x_b) = b \left(\frac{dx_b}{dt} \right) \quad (9.37)$$

$$\frac{k}{b} dt = \frac{dx_b}{(x - x_b)} \quad (9.38)$$

Denklem 9.39 integre edilir ve $t = 0$ için $x_b = 0$ başlangıç şartları yerine konulursa;

$$\int \frac{k}{b} dt = \int \frac{1}{(x - x_b)} dx_b \quad (9.39)$$

$$\frac{k}{b} t = -\ln(x - x_b) + C \quad (9.40)$$

$$x_b(t=0) = 0 \Rightarrow C = \ln(x) \quad (9.41)$$

$$-(k/b)t = \ln[(x - x_b)/x] \quad (9.42)$$

$$(x - x_b)/x = \exp(-kt/b) \quad (9.43)$$

$$F(t) = -k x_k(t) \quad (9.44)$$

$$x_k = x - x_b \quad (9.45)$$

Denklemler düzenlenip tekrar yazılırsa kuvvet ile toplam yer değiştirme arasındaki ilişki denklem 9.46'daki gibi ortaya çıkmaktadır.

$$F(t) = -k x \exp(-kt/b) \quad (9.46)$$

Denklem 9.46'da görüldüğü üzere toplam yer değiştirme sabittir ve zamandan bağımsızdır. Buna rağmen kuvvet giderek azalmaktadır. Bunun sebebi bu modelde yay sabitinin zamanla değişmesidir, [121 - 123].

Maxwell modeline göre sabit yer değiştirme için gerekli kuvvet zamanla üstel olarak azalmaktadır. Bu model için gerilimin gevşeme zamanı λ saniye cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda \equiv \frac{b}{k} \quad (9.47)$$

Başlangıç anında;

$$F(0) = -k x_k = -b \dot{x}_b \quad (9.48)$$

iken gevşeme zamanında

$$F(\lambda) = \frac{1}{e} F(0) \quad (9.49)$$

sonsuzda ise

$$F(\infty) = 0 \quad (9.50)$$

olur.

9.7.2 Kelvin – Voigt Modeli

Voigt modelinde ise, yay ve silindir içinde piston paralel bağlıdır, Şekil 123. Deformasyon zamanla üstel biçimde değişir. Sabit bir kuvvet altında iken yer değiştirme üssel olarak değişmektedir. Uygulan yük kaldırıldığında yer değiştirme sıfıra inmez, [121 - 123].

Şekil 9.24'te model $t=0$ anında sabit bir kuvvet (F) uygulanırsa yay ve damper üzerinde eşit bir yer değiştirme (x) meydana gelir, (9.51). Toplam kuvvet ise yay ve damperdeki kuvvetlerin toplamına eşittir (9.52).

$$\vec{F} = -k \vec{x} - b \frac{d\vec{x}}{dt} \quad (9.51)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_k + \vec{F}_b \quad (9.52)$$

Yine skaler olarak devam eden matematiksel işlemler yapılır ise;

$$(k/b)dt = dx / [(F/b) - x] \quad (9.53)$$

Denklem 9.54 integre edilir ve t = 0 için x = 0 başlangıç şartları yerine konulursa;

$$\int \frac{k}{b} dt = \int \frac{1}{[(F/b) - x]} dx \quad (9.54)$$

$$\frac{k}{b} t = -\ln[(F/b) - x] + C \quad (9.55)$$

$$x(t=0) = 0 \Rightarrow C = \ln(F/b) \quad (9.56)$$

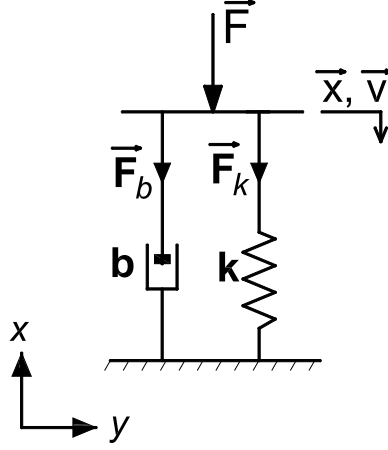
$$-\left(\frac{k}{b}\right) t = \ln\left[1 - \frac{kx}{F}\right] \quad (9.57)$$

$$1 - kx/F = \exp(-kt/b) \quad (9.58)$$

Böylelikle yer değiştirme ile kuvvet arasındaki ilişki aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$x(t) = -\frac{F}{k} [1 - \exp(-kt/b)] \quad (9.59)$$

$$F = -k x(t) \frac{1}{1 - \exp(-kt/b)} \quad (9.60)$$



Şekil 9.24 Kelvin - Voigt modeli

9.7.3 Zener (Standart Doğrusal Katı Modeli) Modeli

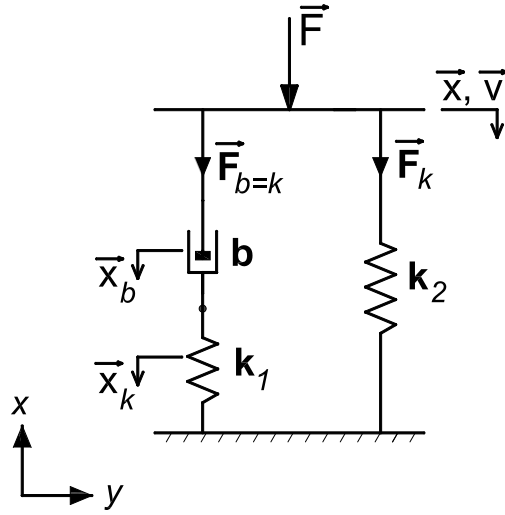
Maxwell modeli gerilim boşalmasının hesaplanmasında daha doğru sonuç verirken Kelvin-Voigt modeli ise sürünmeyi daha iyi hesaplamaktadır. Bu iki modelin karışımı olan standart doğrusal katı modeli yani Zener modelleri hem sürünme hem de gerilimin gevşemesinde daha başarılı sonuç vermektedir. Uç uca eklenmiş yay ve damperden oluşan Maxwell elemanına paralel olarak eklenmiş bir adet yaydan oluşan bu basit model ile viskoelastik katılar için daha iyi sonuç vermektedir, Şekil 9.25.

Standart doğrusal katı modelin matematiksel ifadesi denklem 9.61'deki gibidir, [124].

$$\vec{F}(t) = -k_1 \left[\exp\left(-\frac{k_1 t}{b}\right) \right] \vec{x}(t) - k_2 \vec{x}(t) \quad (9.61)$$

$$\vec{F}(t) = -\vec{x}(t) \left[k_1 \exp\left(-\frac{k_1 t}{b}\right) + k_2 \right] \quad (9.62)$$

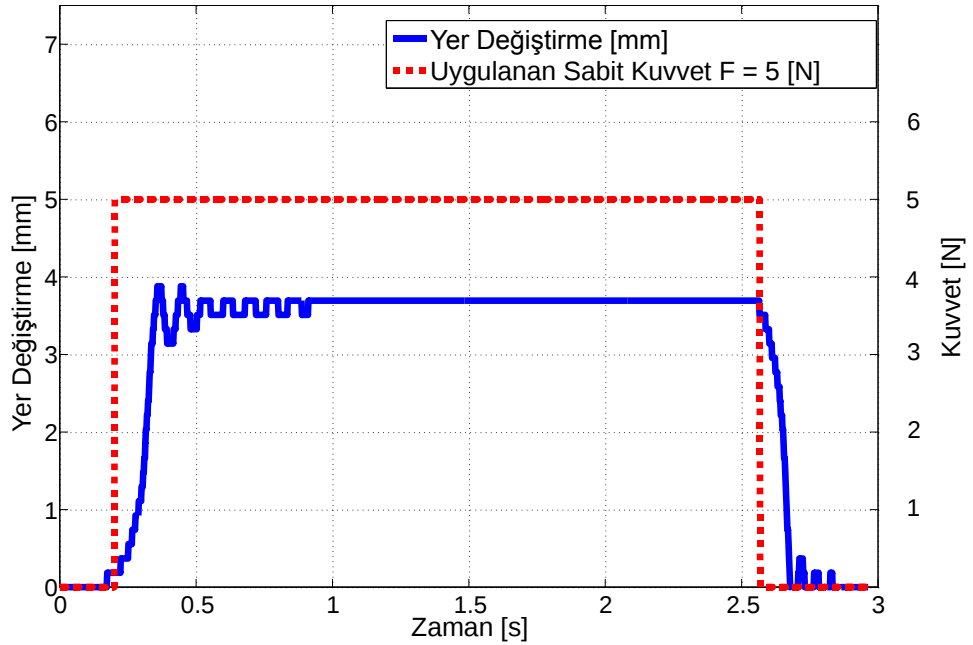
Bu modelde 2 adet yay olduğu için bu iki yay sabiti de matematiksel modelde yer almaktadır. Fakat ilerleyen bölümlerde daha detaylı bir şekilde açıklandığı üzere elastik pedin yay sabiti deneysel olarak bulunmaktadır. İki farklı yay sabiti değeri elde edilememektedir. Burada bir kabul yapılmaktadır. Yani en doğru sonucu veren k_1 ve k_2 değerleri yapılan sabit kuvvet deneyleri ile elde edilecektir.



Şekil 9.25 Zener modeli

9.8 Silikon Pedin Viskoelastik Davranışı

Silikon pedlere ağırlıklar yardımıyla sabit kuvvet uygulandığında batma yani yer değiştirme grafikleri aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir, Şekil 9.26. Bu deneyde silikon pede sabit 5 N kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan kuvvet ile silikon ped üzerinde gerçekleşen yer değiştirme dinamiği üzerinde silikon pedin hangi viskoelastik model daha yakın davrandığı gözlenmiştir.



Şekil 9.26 Sabit kuvvet altında yer değiştirme deneyi

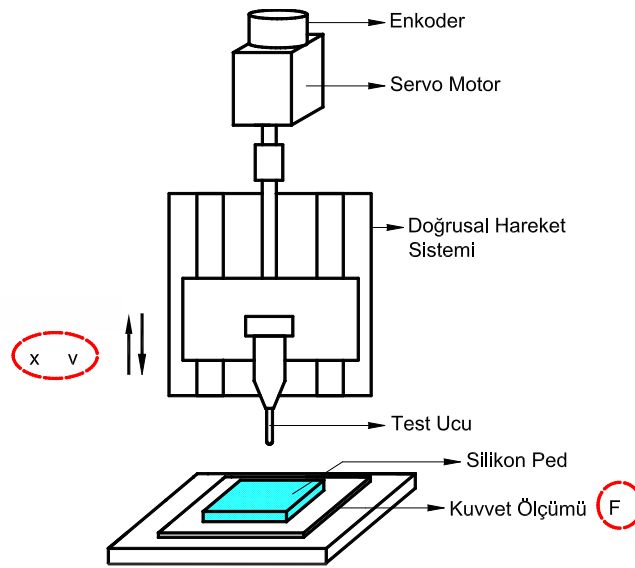
Bu grafikte mavi eğri uygulanan kuvvete bağlı yer değiştirmenin zaman ile değiştirmesini göstermektedir. Kırmızı eğri ise uygulana kuvvetin zaman ile değişmesini göstermektedir. Mavi eğrideki yani yer değiştirmedeki osilasyonlar ağırlıklarının ped üzerine konulurken ki darbe etkisidir.

Bu deney sonrasında silikon pedin viskoelastik davranışın Kelvin – Voigt ile Zener modeline benzediği görülmektedir.

9.9 Deney Sonuçları ile Matematiksel Modellerin Karşılaştırılması

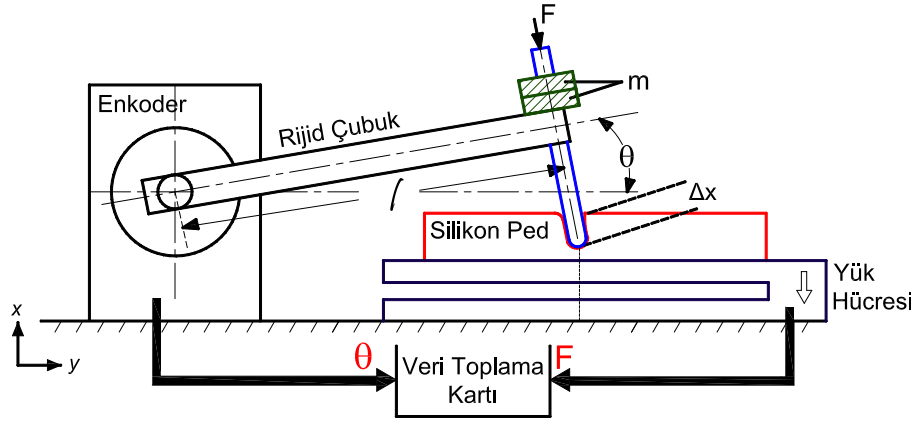
Eldeki sistem için en uygun matematiksel modelin tespiti için iki farklı deney düzeneğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki; tek eksenli kartezyen robottur, Şekil 9.27. Bu deney düzeneğinde konum kontrolü yapılmış ve kuvvet ölçülmüştür.

İkinci deney düzeneği ise değişken kuvvet ve yer değiştirme deney düzeneğidir, Şekil 9.28. Bu deney düzeneğinde hem kuvvet ölçümü hem de ve konum ölçümü yapılmıştır.



Şekil 9.27 Tek eksenli kartezyen robot

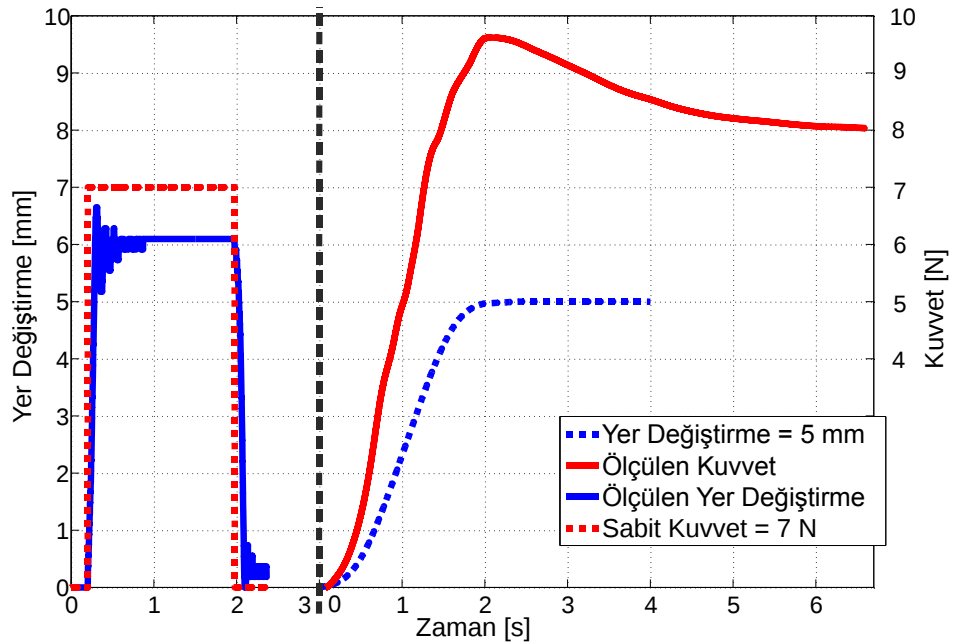
Yapılan tüm deneylerde uygulanan tahrik kuvveti " F " ve bu kuvvete bağlı gerçekleşen yer değiştirme " x " ile ölçülmüştür. Yer değiştirme hızı " v " yer değiştirmenin türevi olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9.28 Değişken kuvvet ve yer değiştirme ölçme deney düzeneği

Silikon pede sabit bir kuvvet uygulandığında gerçekleşen deformasyonun yani yer değiştirmenin nasıl gerçekleştiği gözlenmiştir. İkinci olarak silikon pede sabit yer değiştirme uygulanarak, değişen kuvvet gözlenmiştir, Şekil 9.29.

Bu iki farklı deney silikon pedin dinamiğine en uygun modeli tespit etmek için gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde sabit yer değiştirme altında kuvvet değişimi ve sabit kuvvet altında yer değiştirme ölçülmüştür.



Şekil 9.29 Silikon pedin sabit kuvvet ve sabit yer değiştirme uygulandığında davranışı

Bu grafiğin sol bölümünde kırmızı eğri yani kuvvet kontrol edilerek mavi eğri yani yer değiştirme ölçülmekte iken, grafiğin sağ yarısında mavi eğri yani yer değiştirme kontrol edilerek kırmızı eğri yani kuvvet ölçülmüştür.

Devam eden analizlerde, önceden belirlenen matematiksel modellere deneylerden ölçülen yer değiştirme ve yer değiştirme hızı bilgisi girilmiştir. Model çıkışı olarak, kuvvet hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvet, ölçülen kuvvet ile karşılaştırılmıştır. Daha önceki bölümlerde yapılan çalışmalar sonrasında matematiksel analizler için silikon ped 1 seçilmişti. Devam eden çalışmalar da silikon ped 1 kullanılacaktır.

Viskoelastik modeller için yay sabiti değeri kontak mekaniği için kullanılan elastisite üzerinden hesaplanmıştır.

$$k_{sil} = DE^* \quad (9.63)$$

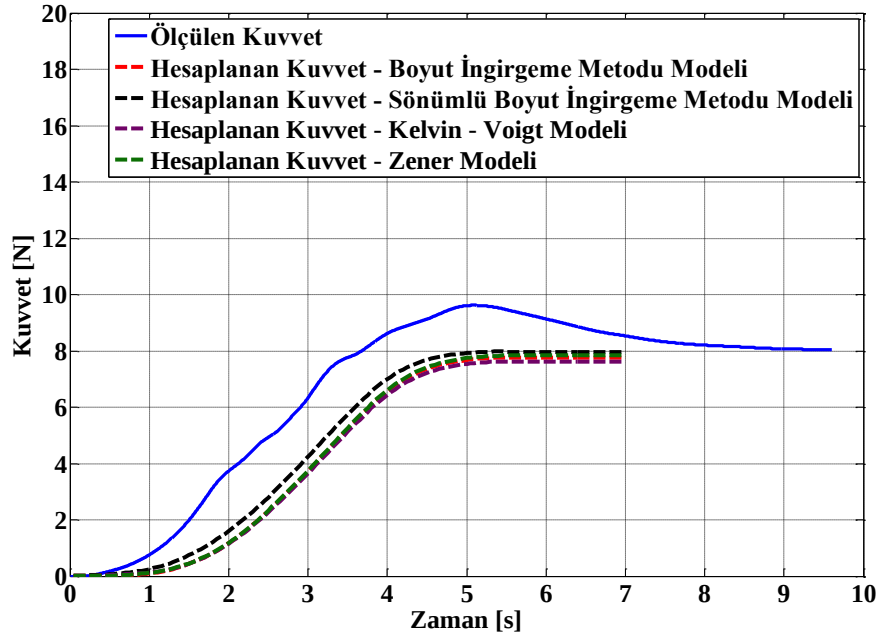
$$k_{kür} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R x(t)} \quad (9.64)$$

Viskoelastik modellerde yay sabiti yerine kantağın tipine göre uygun yukarıdaki ifadeler yerine konularak genel denklemler elde edilmiştir. Zener modelindeki 2 farklı yay sabiti değeri ise deneysel olarak elde edilmiştir.

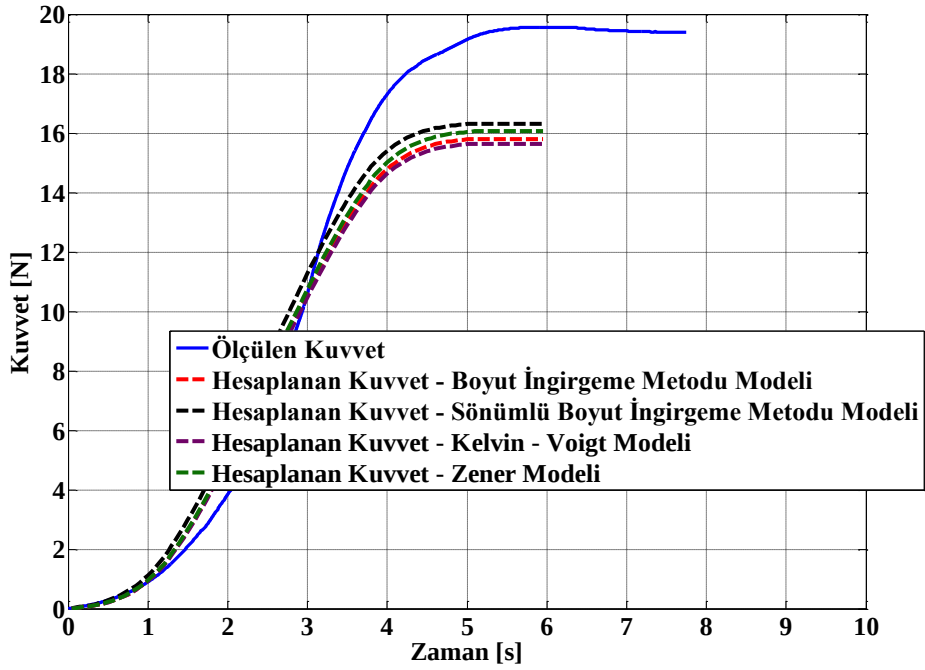
Boyut indirgeme metodu, sönümlü boyut indirgeme metodu, Kelvin – Voigt ve Zener modelleri için birinci deney düzeneği olan tek eksenli kartezyen robot ve yük hücresi ile gerçekleştirilen deneylerde konum kontrolü yapılarak kuvvet ölçümü yapılmıştır.

Yapılan deneylerde amaçlanan; sabit yer değiştirme altında iken uygulanan kuvvet bilgisine ölçülen yer değiştirme bilgisi üzerinden hangi matematiksel modelin daha fazla yakınsayacağını tespitidir. Yapılan deneyler sonucunda sabit yer değiştirme için Zener (Standart Doğrusal Katı Modeli) ile sönümlü boyut indirgeme metodun daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Burada sabit yer değiştirme diye kastedilen sabit hız ile belirlenen final değere ulaşana kadar tahrik elemanın silikon pede batırılmasıdır. Bu deneyler esnasında hem pozisyon verisi hem de kuvvet verisi ölçülmüş ve saklanmıştır. Daha sonra pozisyonun zaman bağılı değişimi modellere girilerek kuvvetin zaman bağılı değişimi hesaplanmış, ve hesaplanan değerler ile ölçülen değerler aynı grafikte çizdirilerek karşılaştırılmıştır, Şekil 9.30 – 9.31.



Şekil 9.30 Çapı 10 mm küresel tahrik elemanı ile toplam 5 mm sabit hızda yer değiştirme için matematiksel modeller ile ölçümün kıyaslanması



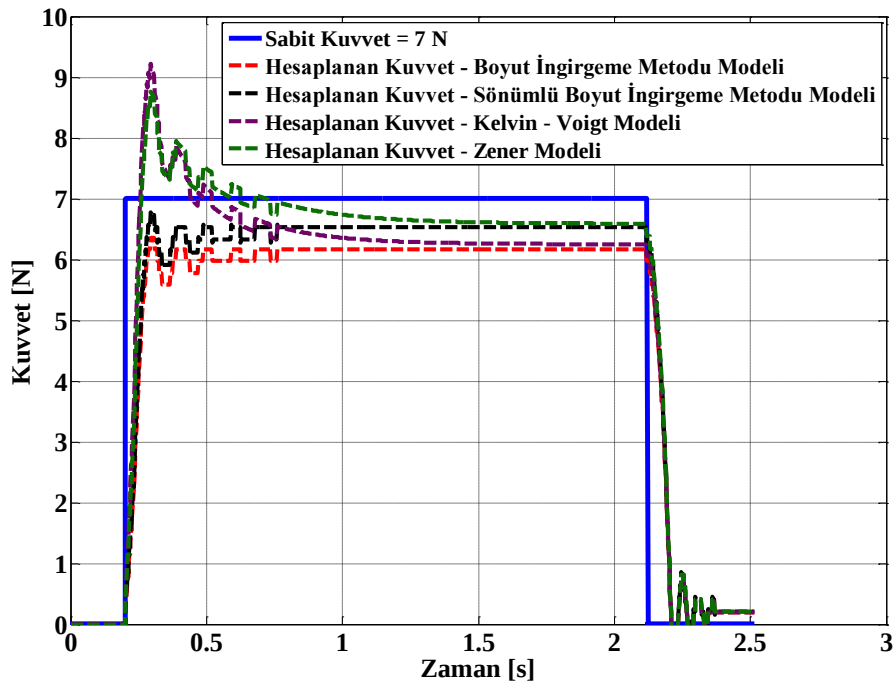
Şekil 9.31 Çapı 10 mm silindirik tahrik elemanı ile toplam 4 mm sabit hızda yer değiştirme için matematiksel modeller ile ölçümün kıyaslanması

İkinci deney düzeneği ile sabit kuvvet uygulanarak yer değiştirme bilgisi ölçülmüştür. Viskoelastik modeller, boyut indirgeme metodu modeli ve sönümlü boyut indirgeme metodu modelleri kullanılarak, ölçülen yer değiştirme değerine bağlı kuvvet

hesaplanmıştır. Modellerin çıktısı olan hesaplanan kuvvet değerleri ile uygulanan sabit kuvvet değeri kıyaslanarak silikon ped için en uygun model tespit edilmeye çalışılmıştır, Şekil 9.32.

Model sonuçlarındaki osilasyonlar, ağırlıklarının ped üzerine konulurken ki darbe etkisinin yer değiştirme ölçümüne etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu deneylerin amacı geçici rejim cevapları değil, kalıcı rejim hatasının tespitidir. En düşük kalıcı rejim hatası, yani her bir modelin kalıcı rejim cevabının 7'ye olan uzaklığı üzerinden hangi modelin eldeki sistem için daha uygun bir matematiksel yaklaşım olduğuna karar verilmiştir.

Yapılan deneyler ve gözlemler sonucunda Zener modeli ile sönümlü boyut indirgeme metodun diğer modellere göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Kelvin – Voigt model ile Zener modeli arasında kıyaslama yapıldığında beklendiği gibi Zener modelinin daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur zira, silikon pedin modellemesi esnasında malzeme karakterizasyonu yapılırken eldeki malzemenin katıya benzer davrandığı tespit edilmişti.



Şekil 9.32 7 N sabit kuvvet uygulandığında gerçekleşen yer değiştirme bilgisinden matematiksel modeller ile hesaplanan kuvvetlerin kıyaslanması deneyi

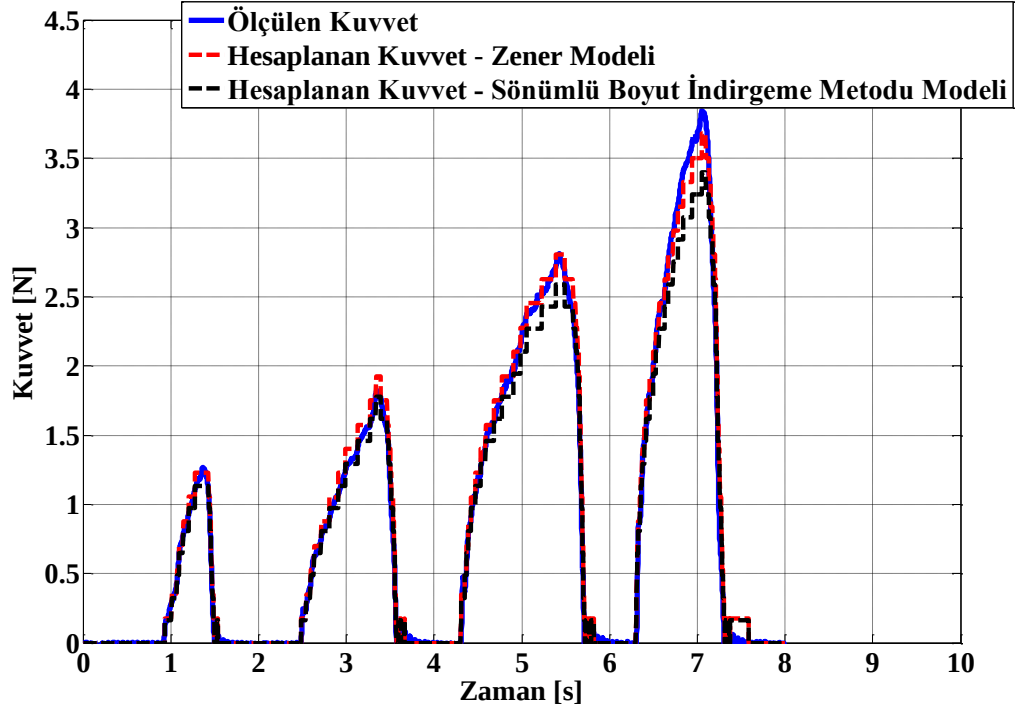
9.10 Tez Çalışmasında Gerçeklenen Sisteme En Uygun Matematiksel Modelin Seçimi

Daha önceki deneylerde silikon pede sabit yer değiştirme uygulandığında ve silikon pede sabit kuvvet uygulandığında ölçülen nicelikler ile modeller ile hesaplanan nicelikler kıyas edilerek Zener modeli ile sönümlü boyut indirgeme metodun diğer modellere göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmişti.

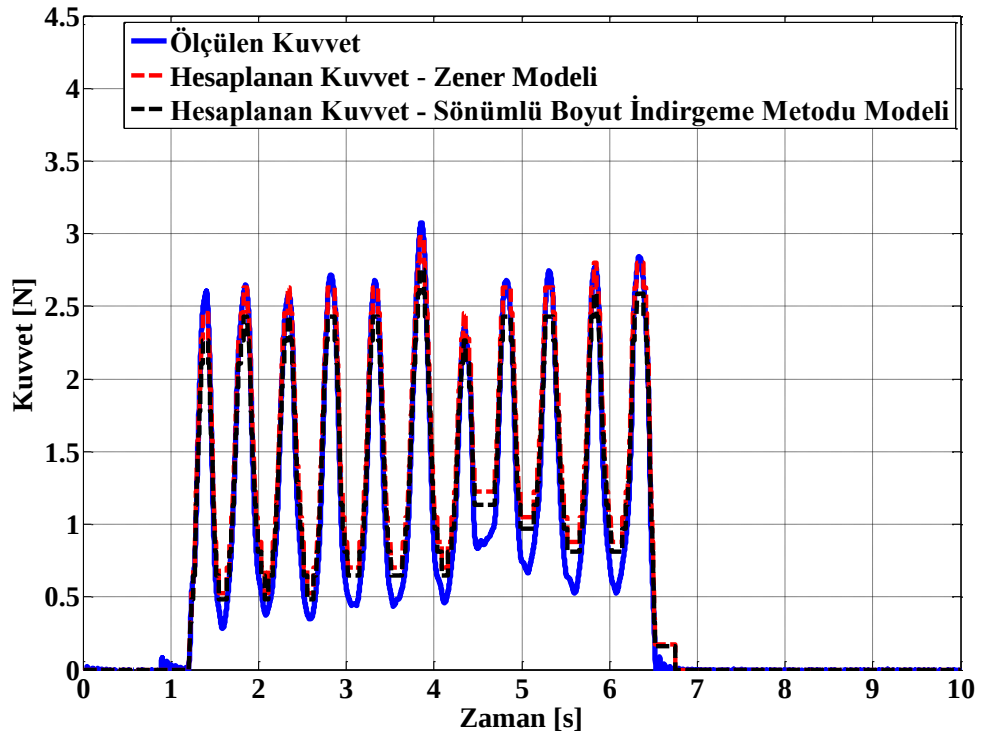
Devam eden bölümde verilen grafiklerde bu iki modelin doğruluğu kıyaslanmıştır. Pede uygulanan farklı ve değişken yer değiştirme yani batma uygulanarak kuvvet ve yer değiştirme ölçülmüştür. Daha sonra bu iki model yardımıyla yer değiştirme bilgisinden kuvvet hesaplanmış ve hesaplanan kuvvet verisi ile ölçülen kuvvet verisinin karşılaştırılması, doğrulanması ve sonuç olarak en uygun modelin seçiminin yapılması amaçlanmıştır, Şekil 9.33 – 9.37.

Bu deneylerde yer değiştirme yani pozisyon verisi optik kodlayıcı (enkoder) ile hız verisi ise ölçülen yer değiştirmenin türevi alınarak elde edilmiştir. Sonuç grafiklerinde türev almanın olumsuz etkisi olarak gürültü her ne kadar filtrelenmeye çalışılsa da mevcuttur. Kuvvet bilgisi ise yük hücresi ile ölçülmüştür.

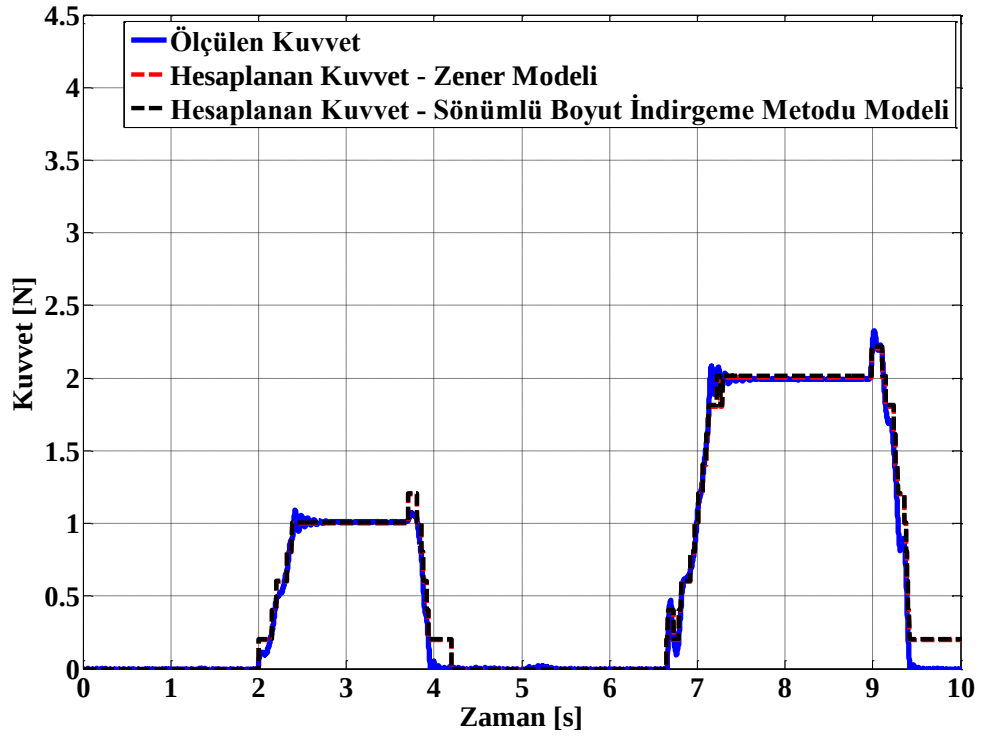
Her bir deneyde farklı yer değiştirmeye sebep olacak kuvvetler uygulanarak tüm senaryolar için modelin sınanması sağlanmıştır. Bu grafiklerin her birinde silikon pede değişken tahrik uygulanmıştır. Uygulan tahrik ile gerçekleşen yer değiştirme ve uygulanan tahrikin kuvveti ölçülerek kaydedilmiştir. Ölçülen zamana bağlı yer değiştirme verisi modellere giriş olarak uygulanarak bu yer değiştirmeye sebep olan kuvvet hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvet verisi ile ölçülen kuvvet verisi grafikte üst üste çizdirilerek, hesabın ne kadar doğru olduğu ve sonrasında hangi modeli daha doğru sonuç verdiği tespit edilmeye çalışılmıştır.



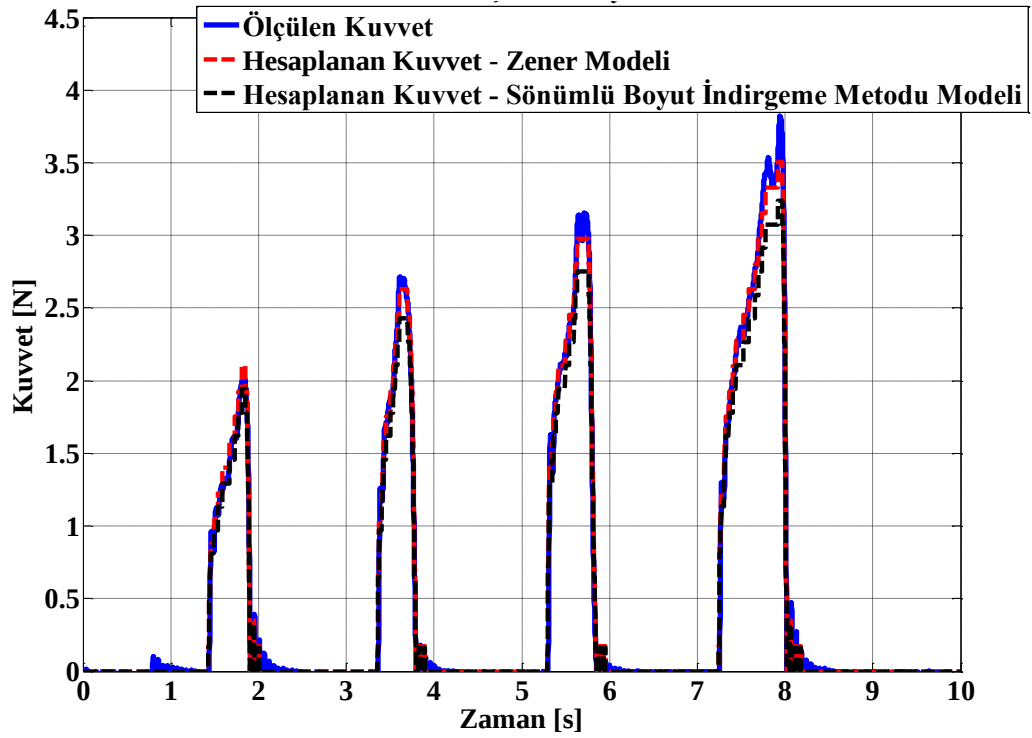
Şekil 9.33 Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan birinci deney: artan yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet



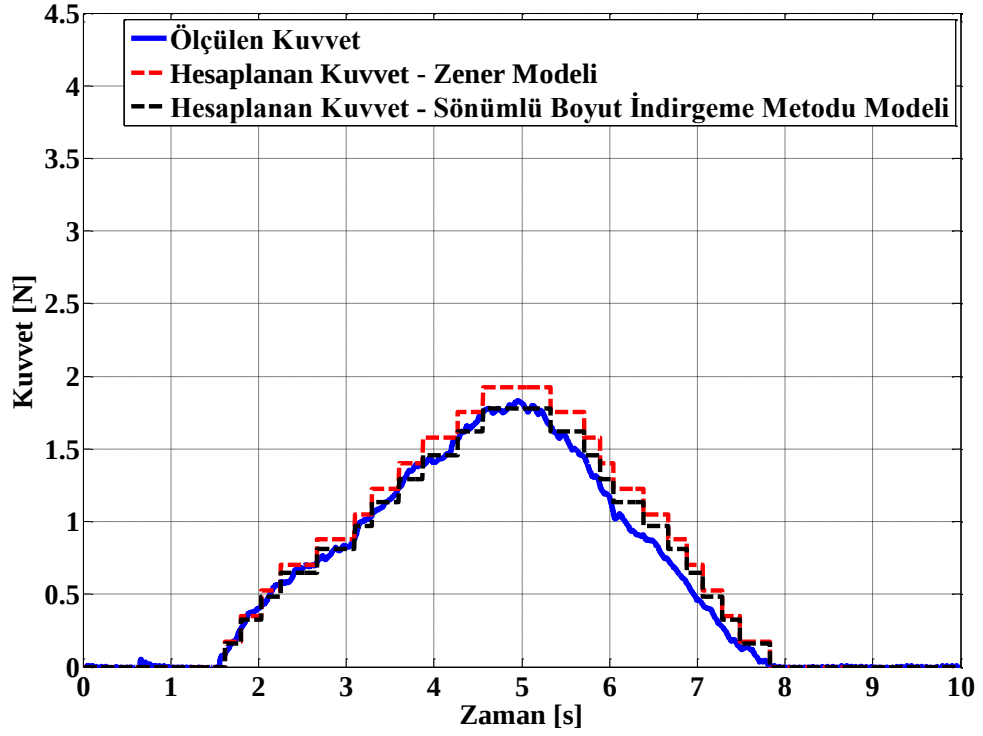
Şekil 9.34 Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan ikinci deney: sinüzoidal yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet



Şekil 9.35 Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan üçüncü deney: artan sabit yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet



Şekil 9.36 Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan dördüncü deney: artan ve hızla değişen yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet



Şekil 9.37 Eldeki sisteme en uygun matematiksel modelin seçimi için yapılan beşinci deney: yavaşça artan ve azalan yer değiştirme için ölçülen ve hesaplanan kuvvet

Üretilen dokunma hissi algılayıcı geliştirme düzeneğinde ölçülmek istenen kuvvet bilgisi için iki adet matematiksel model kullanılmaktadır. Bunlardan ilki parlaklık değişimi ile yer değiştirme bilgisini veren modeldir ve bu model bir önceki bölümde detaylı olarak yer verilmiştir. Parlaklık değişiminden yer değiştirme hesaplandıktan sonra, yer değiştirme bilgisi üzerinden bu bölümde seçilecek matematiksel model yardımıyla kuvvet hesaplanmaktadır. Burada yapılan deneylerin amacı yer değiştirme bilgisinden kuvvet bilgisinin en doğru şekilde hangi model ile hesaplanacağını tespitidir. Bu yüzden bir dokunma algılayıcısı ile ölçülmesi muhtemel farklı senaryolar ile modeller sınanmıştır.

9.11 En Uygun Model Tercihi Çalışması Sonucu

Yapılan tüm analizler ve deneyler sonrasında tez kapsamında üretilen ve insan dokusunun mekaniği taklit eden silikon ped her ne kadar viskoelastik bir malzeme olsa da katı fazındaki bir malzemeye benzer davrandığı gözlenmiştir. Fakat silikon pede uygulanan tahrik, bir diğer ifade ile % yer değiştirmeye bağlı olarak pedin modelinde

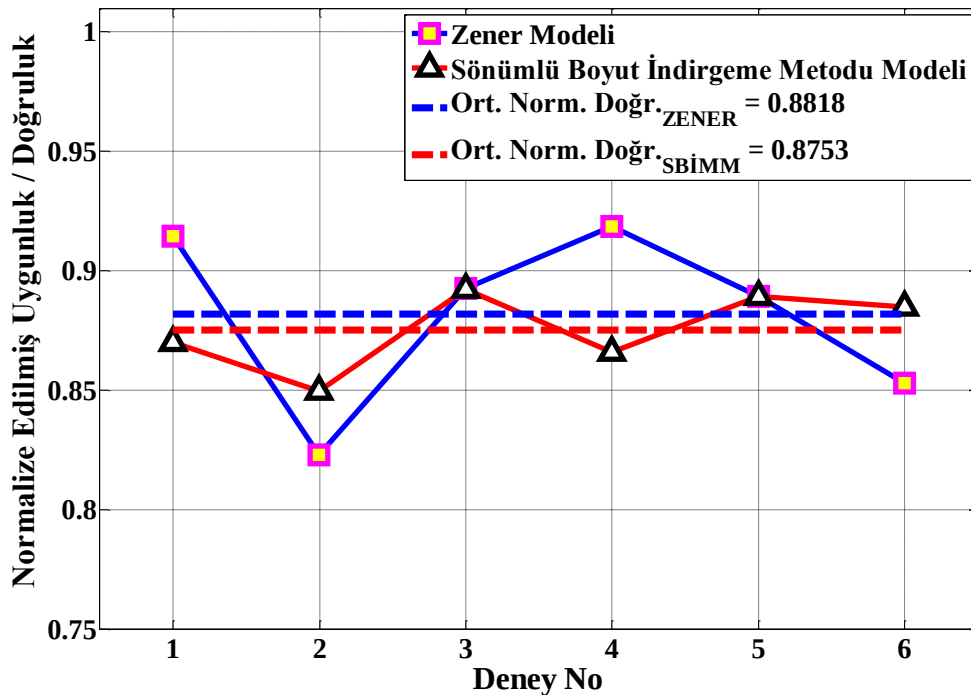
bulunan yay etkisi değişmektedir. Bunun sebebi olarak katıya yakın viskoelastik bir malzemenin sürünme ve gerilme-gevşeme dinamiği olduğu düşünülmektedir.

Farklı senaryolarda yapılan deneyler sonrasında silikon ped dinamiğinin sönümlü boyut indirme metodu modeli ile ve Zener (Standart Doğrusal Katı Modeli) ile temsil edilebildiği bir önceki bölümde görülmüştür.

Fakat seçilen 2 model kıyaslandığında hangisinin daha doğru sonuç verdiği grafikler üzerinden seçilememiştir. Hangi modelin seçileceğine karar vermek için karekök ortalama hata değerlerinin normalize edilmesi analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde model seçim deneylerindeki 6 farklı deney verisi kullanılmıştır, Şekil 9.38.

- Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi için öncelikli olarak hatanın yani ölçülen veri ile hesaplanan veri arasındaki fark bulunmuştur. Hata hesaplanırken karekök ortalama hata metodu kullanılmıştır. Karekök ortalama hata (KKOH) metodu her bir andaki ölçülen ve hesaplanan verinin farkının mutlak değerinin toplam veri âdetine bölünmesiyle hesaplanır, [125].



Şekil 9.38 Modellerin karekök ortalama hatalarına göre normalize edilmiş doğrulukları

“O” ölçülen veri, “H” hesaplanan veri ve n adet veri olsun. Bu durum karekök ortalama hata aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$KKOH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O^i - H^i)^2}{n}} \quad (9.65)$$

Bu hatanın normalize edilmesi ise aşağıdaki gibi yapılır. Normalizasyon ölçülen veri setinin aralığına göre yapılmıştır.

$$NKKOH = \frac{KKOH}{O_{\max}^i - O_{\min}^i} \quad (9.66)$$

Hatayı elde ettikten sonra doğruluk basit bir çıkarma işlemi yapılarak kolayca bulunabilir.

$$ND = 1 - NKKOH \quad (9.67)$$

Şekil 9.38’de doğruluk değeri 1 ise mükemmel uyum 0 ise uyumsuz anlamına gelmektedir. Bu değer 100 ile çarpılır ise yüzde cinsinde modelin doğruluğu elde edilebilir.

Sonuç olarak %88.18’luk doğruluk oranı ile Zener metodu ortalama olarak daha iyi sonuç verse de ortalama doğruluk oranı %87.53 olan sönümlü boyut indirgeme metodu silikon pedin matematiksel modeli olarak seçilmiştir. Bu seçimdeki kıstas olarak doğruluk oranının **başarı sınırı % 85** kabul edilmiştir. Her ne kadar Zener modeli toplamda daha doğru olsa da bazı senaryolardaki cevabı istenilen başarı seviyesi olan %85’in altında kalmıştır. Yani sönümlü boyut indirgeme metodu modeli daha kararlı bir cevap vermiştir. Her bir deney için en fazla uygulanan basınç değerleri Çizelge 9.1’deki gibidir.

Çizelge 9.1 Her bir deneyde uygulanan maksimum basınç değerleri ve model doğruluğu

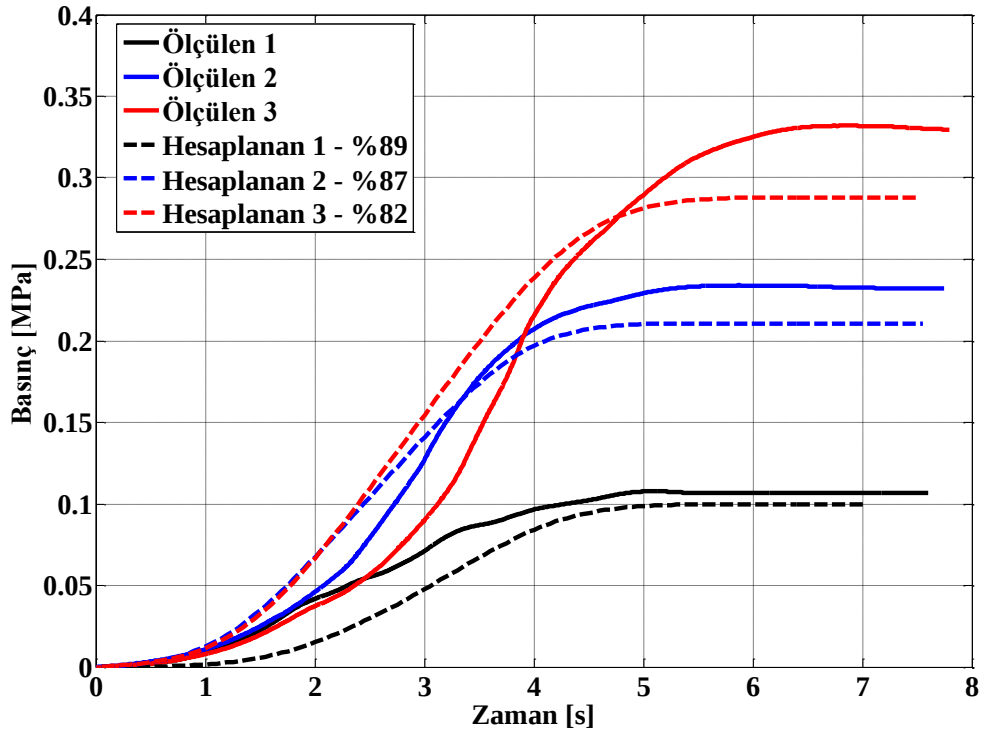
Deney No	Maks. Basınç [MPa]	Zener Modeli	S.B.İ.M. Modeli
1	0.1936	% 91	% 87
2	0.2420	% 82	% 85
3	0.1461	% 89	% 89
4	0.2012	% 91	% 86
5	0.1472	% 88	% 88
6	0.1152	% 85	% 88

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki elastisite modülü 0.1560 MPa olan silikon pede uygulanan basınç 0.25 MPa'ın altında olduğu durumlarda doğruluk % 85 - 95 aralığında gerçekleşirken 0.30 MPa üstünde bir basınç uygulandığında doğruluk % 85'in altına inmektedir, Şekil 9.29.

" F_{σ}^i " ölçülen kuvvet değeri, uygulanan tahrikin alanı da " A^i " ise uygulanan basınç her bir deney için ölçülen kuvvetin yüzey alanına oranı olmaktadır. Aynı şekilde hesaplanan basınç ta elde edilebilmektedir.

$$\sigma_{\sigma}^i = \frac{F_{\sigma}^i}{A^i} \quad (9.68)$$

$$\sigma_H^i = \frac{F_H^i}{A^i} \quad (9.69)$$



Şekil 9.29 Modelin basınca bağlı doğruluğu

Grafikte gözüken % doğruluk oranı hesaplanırken sistemin geçici rejim cevabı dikkate alınmamıştır. Kalıcı rejim cevabı üzerinden doğruluk oranı tespiti yapılmıştır.

$$YD = 100 \left(1 - \frac{\sigma_{\ddot{o}} - \sigma_H}{\sigma_{\ddot{o}}} \right) \quad (9.70)$$

Sonuç olarak elastisite modülü 0.1560 MPa olan silikon pedin plastik deformasyon sınırının 0.25 MPa'ın olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit gözlemle de doğrulanmıştır. 0.25 MPa üzerinde basınç uygulanan deneylerde silikon ped üzerinde iz kaldığı (plastik deformasyon olduğu) gözlenmiştir.

Bu bölümde yapılan çalışmaların sonucunda; dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneğine uygulanan fiziksel tahrik ile oluşan yer değiştirme bilgisi üzerinden uygulanan tahrik kuvvetinin hesaplanmasını sağlayan en uygun matematiksel model tespit edilmiştir.

Bir önceki bölümde, yer değiştirme, parlaklık değişimi üzerinden hesaplanmıştır. Elde edilen bu hesap bilgisi bu bölümdeki sonuç ile birleştirilince ortaya çıkan genel sonuç parlaklık değişimi ile kuvvet arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır.

Bir önceki bölümde yansıyan ışık şiddeti (aydınlık düzeyi) bilgisinden %92 başarı ile yer değiştirmenin hesaplanabildiği gösterilmişti. Bu bölümde ise yer değiştirme bilgisinden %85 başarı ile uygulanan tahrik kuvvetin hesaplanabildiği gösterilmiştir.

Sonuç olarak 0.92 ile 0.85 çarpılır ise sonuç 0.78 olduğundan, tasarlanıp üretilen sistem ve ortaya konulan matematik modeller ile en kötü senaryo için %78 doğruluk oranı ile kuvvet ölçümü yapıldığı söylenebilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında insan parmak ucu hassasiyetinde bir dokunma algılayıcısı geliştirme düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarımda tez danışmanı Dr. Utku Büyüksahin'in patent [66 - 67] kullanılmış ve bu patent temelinde geliştirme, analiz, modelleme ve imalat çalışmaları yapılmıştır.

Patentin öne sürdüğü dokunma algılayıcısı, kısaca santimetre kareye 1 milyondan fazla reseptör sığdırabilmeyi mümkün kılan ve bu milyonlarca adet verinin düşük maliyetle ve kolayca bilgisayara aktarılması sağlayan bir tasarıma sahiptir.

Bu çalışmanın literatüre en önemli katkısı ve patent çalışmasından farkı şeffaf ve elastik olan silikon pedin mekanik özelliklerinin ve kaynak ışık şiddetinin dokunma algılayıcısına etkilerinin ortaya konulması ve bu etkilerin nasıl kontrol edileceğinin açıklanmasıdır [63 - 64].

Tez çalışmasının bir diğer önemli çıktısı da ışık parlaklığı ile yer değiştirme arasındaki matematiksel ifadenin tanımlanmasıdır. Çalışmanın devamında ise böyle bir sistem için yer değiştirme ile kuvvet ilişkisinin tanımlayan en uygun matematiksel model seçilmiştir.

Bu doktora tezi ile çok noktalı algılama yapabilen, yeni ve ileri teknoloji bir dokunma algılayıcısı için literatür taraması ve araştırma yapılmış, bir geliştirme düzeneği tasarlanmış ve üretilmiş, tasarım geliştirilmiş, analiz ve modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan tez çalışması ile amaçlanan ve bu çalışmayı patent çalışmasından farklı kılan en önemli katkı; istenilen çözünürlükte ve istenilen geometrik boyutlarda bir dokunma algılayıcısında kullanılacak silikon pedin, ışık kaynağının ve yansıtıcı yüzeyin özelliklerine, elek yapısına, fiber optik kablo çapı ve adetine karar verilebilmesidir.

Bu çalışmanın bir diğer önemli çıktısı da teze konu olan optik tasarım ile farklı özelliklerde yeni bir algılayıcı üretildiğinde, üretimde kullanılan yeni malzemelerin özellikleri, bu tez çalışması ile elde edilen matematiksel ifadelerde yerine konularak kuvvet ölçümünün yapılabilmesidir.

Yapılan deneysel çalışmalar ve teorik modeller (Beer – Lambert yasası) yardımıyla silikon pedin soğurma katsayısı, silikon pedin kalınlığı, yansıtıcı yüzeyin yansıtma katsayısı ve kaynak ışık şiddetine bağlı olarak yansıyan ışık şiddeti ile yansıma mesafesi yani yer değiştirme arasında matematiksel bir ilişki kurulmuştur. Böylelikle hangi kaynak ışık şiddetinde ve hangi silikon ped yapısında parlaklık değişiminin nasıl gerçekleşeceği hesaplanabilmektedir. Bu katkı ile istenilen özelliklerde bir dokunma algılayıcısı üretmek için hangi özelliklerde bir silikon ped ve ışık kaynağı kullanılması gerektiği belirlenebilmektedir.

Bu tez kapsamında elde edilen matematiksel bağıntılar yardımıyla farklı bir ped, farklı bir yansıtıcı yüzey ve farklı bir ışık kaynağı kullanılması durumunda da, her bir unsurun formül içindeki parametresi yerine konularak parlaklık ile mesafe arasındaki ilişki tanımlanabilmektedir.

Tezin bir diğer önemli çıktısı ise ışık şiddetine bağlı olarak ölçülen yansıma mesafesi yani yer değiştirme değeri ile bu yer değiştirmeye sebep olan kuvvet arasındaki ilişkinin; elastik (boyut indirgeme metodu modeli) ve viskoelastik (Zener modeli) teoriler yardımıyla ve yapılan deneysel analizler ile kurulmuş olmasıdır. Literatürde var olan teorik modeller incelenmiş ve dokunma algılayıcısı için en uygun matematik model yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkarılmıştır.

Yapılan modelleme çalışması ile istenilen çözünürlükte ve istenilen geometrik boyutlarda bir dokunma algılayıcısının tasarımı için silikon ped malzemenin

özelliklerine, ışık kaynağının şiddetine, yansıtıcı yüzeyin özelliklerine karar verilebilmektedir. Bu gibi parametreler, ya tez içerisinde verilen matematiksel modeller yardımıyla hesaplanabilmektedir ya da tez içerisinde verilen Çizelge ve grafikler üzerinden seçim yapılabilmektedir. Burada amaç belirlenen özelliklere haiz bir dokunma algılayıcısının nasıl elde edileceği bilgisine ulaşmaktır.

Yapılan çalışmanın bir sonucu da istenilen çözünürlükte ve mesafe aralığında yer değiştirmenin algılanabilmesi için silikon ped kalınlığının ayarlanabilmesidir. Silikon pedin kalınlığı istenilen bir aralıkta kalması şartıyla soğurma katsayısı değiştirilerek hem pedin kalınlığı kontrol edilebilmekte hem de istenilen nitelikte ölçüm yapılması sağlanabilmektedir. Böylelikle ileriki çalışmalarda kuvvet, daha ince silikon pedler kullanılarak daha küçük yer değiştirmeler ile ölçülebilecektir. Bunun için silikon pedin soğurma katsayısı ile ışık kaynağının şiddetinin elde edilen matematiksel bağıntılar yardımıyla ayarlanması kâfi gelecektir.

Ölçülen kuvvet çözünürlüğü silikon pedin mekanik özelliklerine bağlıdır. Örneğin, kullanılan silikon pedin elastik modülü yarı değere indirilirse çözünürlük 2 katına çıkacaktır. Aynı şekilde daha geniş bir aralıkta ölçüm yapılmak istenirse elastik modül arttırılabilmektedir. Burada temel nokta birim uzamanın 255 seviyede ölçülüyor olmasıdır. Bu da gri renk kodlamasındaki tam aydınlık ile tam karanlık arasındaki adım sayısıdır.

Algılayıcının önemli bir özelliği de geometrik çözünürlüğüdür. Geometrik çözünürlük ölçüm yüzeyine uygulanan 2 farklı girişin (tahrikin) algılayıcı tarafından 2 farklı giriş olarak algılanabilmesi için aralarında olması gereken minimum mesafedir. İnsanda 1 mm olan bu değer, tez kapsamında üretilen sistemde de 1 mm olarak seçilmiştir. Fakat istenilmesi durumunda kullanılacak fiber optik kabloların çapına ve elek dizim yapısına bağlı olarak geometrik çözünürlük arttırılabilmektedir. Bunun ile ilgili de yapılan analizlere tez içerisinde yer verilmiştir. Fiber optik kablo çapına ve hangi elek yapısına bağlı geometrik çözünürlüğün değişimi bölüm 5'te detaylı olarak açıklanmıştır.

Özetle, yapılan çalışmada:

- Silikon pedin kalınlığı, pedin ışık soğurma katsayısı, yansıtıcı yüzeyin yansıtma katsayısına ve kaynak ışık şiddetine bağlı, görüntü işleme ile ölçülen parlaklık seviyesinden yer değişme bilgisini hesaplayan genel bir formül ortaya konulmuştur.
- Silikon peddeki yer değiştirme bilgisinden, uygulanan kuvveti hesaplayan ve silikon pedin elastik modülüne ve sönüm katsayısına bağlı matematiksel bir model elde edilmiştir.
- 1 mm geometrik çözünürlüğü ve 0.34 N kuvvet ölçüm çözünürlüğüne sahip dokunma hissi algılayıcısı geliştirme düzeneği tasarlanıp, üretilmiştir. Bunun için gerekli malzeme analizleri ve tercihleri yapılmıştır.
- Yapılan bu tez, ileriki çalışmalar için istenilen çözünürlükte ve istenilen geometrik boyutlarda bir dokunma hissi algılayıcısının da kullanılacak silikon pedin, ışık kaynağının ve yansıtıcı yüzeyin özelliklerine karar verilebilmesine ışık tutmaktadır.

10.1 Gelecek Çalışmalar

Bu tez çalışmasında üretilen dokunma hissi algılayıcısı üzerinde rahatça deneyler yapılabilmesi ve farklı malzemelerin denenebilmesi için modüler bir yapıdadır. Bu tez çalışması ile algılayıcıda kullanılacak malzemeler için yapılan araştırma ve deneyler sonrasında hangi malzemelerin daha uygun olduğuna karar verildiği için, ilerleyen çalışmalarda yeni ve esnek yapıda bir dokunma hissi algılayıcısı tasarlanması ve üretilmesi düşünülmektedir.

Yapılacak yeni tasarımda hem geometrik hem de kuvvet algılama çözünürlüğünün artırılması için çalışmalar yapılması düşünülmektedir. Bunun için profesyonel imalat araçlarının kullanılması planlanmaktadır.

Işık parlaklık şiddetinden yer değiştirmeyi hesaplayan matematiksel model ile yer değiştirmeden kuvveti hesaplayan matematiksel modellerin iyileştirilmesi ve ölçümdeki en kötü senaryoda gerçekleşen toplam hata olan %22 değerinin düşürülmesi de

hedeflenmektedir. Bunun için imalattan kaynaklı bozucu etkenlerin aşılması için de çalışmalar yapılacaktır.

Gelecek çalışmalarda üretilmesi düşünülen esnek dokunma hissi algılayıcısının robotik bir sisteme entegre edilerek geri besleme olarak robot kontrolünde kullanılması da düşünülmektedir. Bunun içinde algılayıcının yazılım kısmının bir bilgisayar ile değil bir mikro denetleyici ile çalışması için gerekli devre, dönüşüm ve donanım tasarımı ve seçimlerinin yapılması planlanmaktadır.

- [1] Loomis, J. M. ve Lederman, S. J., (1986), *Cognitive Processes Performances in Tactual Perceptio*, 2, Wiley, New York.
- [2] Graziano, M. S. A., ve Botvinick, M. M., (2002), *How the brain represents the body: Insights from neurophysiology and psychology*, in *Common Mechanisms in Perception and Action: Attention and Performance*, U.K. Oxford Univ. Press, London.
- [3] Johansson, R. S., ve Westling, G., (1984), “Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects”, *Experimental brain research*, 56(3): 550-564.
- [4] Kandel, E. R. , Schwartz, J. H., ve T. M. Jessell, (2000), *Principles of Neural Science*, 4, New York: McGraw-Hill Medical, New York.
- [5] Klatzky, R. L., ve Lederman, S. J., (2003), *Touch in Experimental Psychology (Handbook of Psychology Series)*, New York: Wiley, 4: 147–176, New York.
- [6] Clark, F. J., ve Horch, K. W., (1986), *Kinesthesia in Handbook of Perception and Human Performance*, 1:1–62, Wiley, New York.
- [7] Birznieks, I., Jenmalm, P., Goodwin, A. W., ve Johansson, R. S., (2001), “Encoding of direction of fingertip forces by human tactile afferents”, *The Journal of Neuroscience*, 21(20): 8222-8237.
- [8] Johansson, R. S., ve Vallbo, Å. B., (1979), “Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin”, *The Journal of physiology*, 286(1): 283-300.
- [9] Johnson, K. O., ve Phillips, J. R., (1981), “Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition”, *Journal of Neurophysiology*, 46(6): 1177-1192.
- [10] Lee, M. H., ve Nicholls, H. R., (1999), “Review Article Tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey”, *Mechatronics*, 9(1): 1-31.
- [11] Lee, M. H., (2000), “Tactile sensing: new directions, new challenges”, *The International Journal of Robotics Research*, 19(7): 636-643.

- [12] Rocha, J. G., ve Lanceros-Mendez, S., (2008), "Sensors, Focus on Tactile", Force and Stress Sensors.
- [13] Dahiya, R. S., Metta, G., Valle, M., ve Sandini, G., (2010), "Tactile sensing—from humans to humanoids", *Robotics, IEEE Transactions on*, 26(1): 1-20.
- [14] Tiwana, M. I., Redmond, S. J., ve Lovell, N. H., (2012), "A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering", *Sensors and Actuators A: Physical*, 179:17-31.
- [15] Silvera-Tawil, D., Rye, D., ve Velonaki, M., (2015). "Artificial skin and tactile sensing for socially interactive robots: A review", *Robotics and Autonomous Systems*, 63:230-243.
- [16] Almassri, A. M., Wan Hasan, W. Z., Ahmad, S. A., Ishak, A. J., Ghazali, A. M., Talib, D. N., ve Wada, C., (2015), "Pressure Sensor: State of the Art, Design, and Application for Robotic Hand", *Journal of Sensors*.
- [17] Yousef, H., Boukallel, M., ve Althoefer, K., (2011), "Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics—A review", *Sensors and Actuators A: physical*, 167(2): 171-187.
- [18] Howe, R. D., (1993), "Tactile sensing and control of robotic manipulation", *Advanced Robotics*, 8(3): 245-261.
- [19] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., ve Takenaka, T., (1998), "The development of Honda humanoid robot. In *Robotics and Automation*", *IEEE International Conference on*, Mayıs 1998 , 2:1321-1326.
- [20] Kawasaki, H., Komatsu, T., ve Uchiyama, K., (2002), "Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II", *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Eylül 2002, 7(3): 296-303.
- [21] Edsinger-Gonzales, A., ve Weber, J., (2004), "Domo: a force sensing humanoid robot for manipulation research", In *Humanoid Robots*, 4th *IEEE/RAS International Conference on*, Kasım 2004, 273-291.
- [22] Asfour, T., Regenstein, K., Azad, P., Schroder, J., Bierbaum, A., Vahrenkamp, N., ve Dillmann, R., (2006), "ARMAR-III: An integrated humanoid platform for sensory-motor control", In *Humanoid Robots*, 6th *IEEE-RAS International Conference on*, Aralık 2006, Genova, 169-175.
- [23] Harada, K., Kajita, S., Kanehiro, F., Fujiwara, K., Kaneko, K., Yokoi, K., ve Hirukawa, H., (2007), "Real-time planning of humanoid robot's gait for force-controlled manipulation" *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 12(1): 53-62.
- [24] Nozawa, S., Kakiuchi, Y., Okada, K., ve Inaba, M., (2012), "Controlling the planar motion of a heavy object by pushing with a humanoid robot using dual-arm force control", In *Robotics and Automation (ICRA)*, *IEEE International Conference on*, Mayıs 2012, Minnesota, 1428-1435.
- [25] Schürmann, C., (2013), "A high speed sensor system for tactile interaction research", *Doktora Tezi, Technische Fakultät, Universität Bielefeld, Bielefeld*.

- [26] Lovchik, C. S., ve Diftler, M. A., (1999), " The robonaut hand: A dexterous robot hand for space", In Robotics and Automation, IEEE International Conference on, 1999, Kyongju, 2: 907-912.
- [27] Ambrose, R. O., Aldridge, H., Askew, R. S., Burridge, R. R., Bluethmann, W., Diftler, M., Lovchik, M., Magruder, C., ve Rehnmark, F., (2000), "Robonaut: NASA's space humanoid", IEEE Intelligent Systems, 15(4): 57-63.
- [28] Interlink Electronics Inc., (2002), Force Sensing Resister, Data Sheet
- [29] Martin, T. B., Ambrose, R. O., Diftler, M. A., Platt Jr, R., ve Butzer, M. J., (2004), "Tactile gloves for autonomous grasping with the NASA/DARPA Robonaut", In Robotics and Automation, ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on Nisan 2004, Barcelona, 2: 1713-1718.
- [30] Jacobsen, S. C., Iversen, E. K., Knutti, D., Johnson, R., ve Biggers, K., (1986), "Design of the Utah/MIT dextrous hand", In Robotics and Automation, IEEE International Conference on, Nisan 1986, 3: 1520-1532.
- [31] Johnston, D., Zhang, P., Hollerbach, J., ve Jacobsen, S., (1996), "A full tactile sensing suite for dextrous robot hands and use in contact force control", In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nisan 1996, Osaka, 3222-3227.
- [32] Schmitz, A., Maiolino, P., Maggiali, M., Natale, L., Cannata, G., ve Metta, G., (2011), "Methods and technologies for the implementation of large-scale robot tactile sensors", Robotics, IEEE Transactions on, 27(3): 389-400.
- [33] Lee, H. K., Chang, S. I., ve Yoon, E., (2006), "A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment", Microelectromechanical Systems, Journal of, 15(6): 1681-1686.
- [34] Mittendorfer, P., ve Cheng, G., (2012), "Integrating discrete force cells into multi-modal artificial skin", In Humanoid Robots (Humanoids), 12th IEEE-RAS International Conference on, Kasim 2012, Osaka, 847-852.
- [35] Wong, R. D. P., Posner, J. D., ve Santos, V. J., (2012), "Flexible microfluidic normal force sensor skin for tactile feedback", Sensors and Actuators A: Physical, 179: 62-69.
- [36] Gautschi, G., ve Sensorics, P., (2002), "Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors", Materials and Amplifiers.
- [37] Holler, F. J., Skoog, D. A., Crouch, S. R., (2007), Chapter 1 Principles of Instrumental Analysis, 6, Cengage Learning, Boston.
- [38] Martin, T. B., Ambrose, R. O., Diftler, M. A., Platt Jr, R., ve Butzer, M. J., (2004), "Tactile gloves for autonomous grasping with the NASA/DARPA Robonaut", In Robotics and Automation, ICRA'04 IEEE International Conference on, Nisan 2004, Barcelona, 2: 1713-1718.
- [39] Pyo, S., Lee, J. I., Kim, M. O., Chung, T., Oh, Y., Lim, S. C., Park, J. ve Kim, J., (2014), "Development of a flexible three-axis tactile sensor based on screen-

printed carbon nanotube-polymer composite”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24.7.

- [40] Hu, H., Han, Y., Song, A., Chen, S., Wang, C., ve Wang, Z., (2014), “A Finger-Shaped Tactile Sensor for Fabric Surfaces Evaluation by 2-Dimensional Active Sliding Touch”, *Sensors*, 14(3): 4899-4913.
- [41] Weiss, K., ve Woern, H., (2004), “Tactile sensor system for an anthropomorphic robotic hand”, In *Proceedings of IEEE International Conference on Manipulation and Grasping*, Mayıs 2004, Kobe, 12-17.
- [42] Kane, B. J., Cutkosky, M. R., ve Kovacs, G. T., (2000), A traction stress sensor array for use in high-resolution robotic tactile imaging, *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 9(4): 425-434.
- [43] Cannata, G., ve Maggiali, M., (2008), *Design of a tactile sensor for robot hands*, INTECH Open Access Publisher, Rijeka.
- [44] Shimojo, M., Namiki, A., Ishikawa, M., Makino, R., & Mabuchi, K., (2004), “A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method”, *Sensors Journal, IEEE*, 4(5): 589-596.
- [45] Kerpa, O., Weiss, K., & Worn, H., (2003), “Development of a flexible tactile sensor system for a humanoid robot”, In *Intelligent Robots and Systems, 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, Ekim 2003, Las Vegas, 1-6.
- [46] Choi, E., Sul, O., Hwang, S., Cho, J., Chun, H., Kim, H., ve Lee, S. B., (2014), “Spatially digitized tactile pressure sensors with tunable sensitivity and sensing range”, *Nanotechnology*, 25(42).
- [47] Lee, H. K., Chang, S. I., ve Yoon, E., (2006), “A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment”, *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 15(6): 1681-1686.
- [48] Hammond III, F. L., Kramer, R. K., Wan, Q., Howe, R. D., ve Wood, R. J., (2014), “Soft tactile sensor arrays for force feedback in micromanipulation”, *IEEE Sensors Journal*, 14(5).
- [49] Ohka, M., Kobayashi, H., Takata, J., ve Mitsuya, Y., (2006), “Sensing precision of an optical three-axis tactile sensor for a robotic finger”, In *Robot and Human Interactive Communication, The 15th IEEE International Symposium on*, Eylül 2006, Hatfield, 214-219.
- [50] Yong, C. P., (2009), “Dynamic sensing in mimicking cutaneous mechanoreceptors-3D sensor applying reception by vision”, *IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques*, Mayıs 2009, Shenzhen, 17-21.
- [51] Ohka, M., Kobayashi, H., ve Mitsuya, Y., (2005), “Sensing characteristics of an optical three-axis tactile sensor mounted on a multi-fingered robotic hand”, In *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*, Ağustos 2005, Edmonton, 493-498.

- [52] Kamiyama, K., Kajimoto, H., Kawakami, N., ve Tachi, S., (2004), "Evaluation of a vision-based tactile sensor", In Robotics and Automation 2004 IEEE International Conference on, Nisan 2004, New Orleans, 2: 1542-1547.
- [53] Sato, K., Kamiyama, K., Nii, H., Kawakami, N., ve Tachi, S., (2008), "Measurement of force vector field of robotic finger using vision-based haptic sensor", In Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on, Eylül 2008, Nice, 488-493.
- [54] Heo, J. S., Kim, J. Y., ve Lee, J. J., (2008), "Tactile sensors using the distributed optical fiber sensors", In Sensing Technology, ICST 3rd International Conference on, Kasım 2008, Tainan, 486-490.
- [55] Hristu, D., Ferrier, N., ve Brockett, R. W., (2000), "The performance of a deformable-membrane tactile sensor: basic results on geometrically-defined tasks", In Robotics and Automation, ICRA'00. IEEE International Conference on, Nisan 2000, San Fransisco, 508-513.
- [56] Ito, Y., Kim, Y., ve Obinata, G., (2011), "Robust slippage degree estimation based on reference update of vision-based tactile sensor", Sensors Journal, IEEE, 11(9): 2037-2047.
- [57] Heo, J. S., Han, C. H., ve Lee, J. J., (2007), "System design and evaluation of the robot tactile sensor using the microbending fiber optic sensors" In Robot and Human interactive Communication, The 16th IEEE International Symposium on, Ağustos 2007, Jeju, 14-18.
- [58] Rossiter, J., ve Mukai, T., (2006), "An LED-based tactile sensor for multi-sensing over large areas", In Sensors, 5th IEEE Conference on, Ekim 2006, Daegu, 835-838.
- [59] Ataollahi, A., Polygerinos, P., Puangmali, P., Seneviratne, L. D., ve Althoefer, K., (2010), "Tactile sensor array using prismatic-tip optical fibers for dexterous robotic hands", In Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on, Ekim 2010, Taipei, 910-915.
- [60] Massaro, A., Spano, F., Cazzato, P., La Tegola, C., Cingolani, R., ve Athanassiou, A., (2013), "Robot tactile sensing: Gold nanocomposites as highly sensitive real-time optical pressure sensors", Robotics & Automation Magazine, IEEE, 20(2): 82-90.
- [61] Yamada, Y., Morizono, T., Umetani, Y., ve Takahashi, H., (2005), Highly soft viscoelastic robot skin with a contact object-location-sensing capability, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 52(4): 960-968.
- [62] Rossiter, J., ve Mukai, T., (2005), "A novel tactile sensor using a matrix of LEDs operating in both photoemitter and photodetector modes", In Sensors, IEEE.
- [63] Büyükşahin, U. ve Kırılı, A., (2014), "Multi Point, High Sensitive Tactile Sensing Module for Robots and Devices", IEEE Sensors Conference, Kasım 2014, Valencia.
- [64] Kırılı, A. ve Büyükşahin, U., (2014), "Fuzzy Logic Modeling of Transparent and Elastic Silicone Pad for a New and Novel Optic Based Tactile Sensor", 14th

International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, Kasım 2014, Dubai.

- [65] Büyükşahin, U., (2014), "Webcam: A Multi-Function Sensor", Comprehensive Materials Processing, Chapter 13. Sensor Materials and Technologies, Elsevier.
- [66] Büyükşahin, U., (2012), Cihaz Ve Robotlara Çok Noktali, Yüksek Hassasiyetli Dokunma Hissi Sağlayan Modul, Turkish National Patent, TPE2012/08054.
- [67] Büyükşahin, U., (2014), Multi Point, High Sensitive Tactile Sensing Module For Robots And Devices, International Patent, WO/2014/011126.
- [68] Schmitz, A., Maiolino, P., Maggiali, M., Natale, L., Cannata, G., ve Metta, G., (2011), "Methods and technologies for the implementation of large-scale robot tactile sensors", Robotics, IEEE Transactions on, 27(3): 389-400.
- [69] Iwata, H., ve Sugano, S., (2009), "Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE", In Robotics and Automation, ICRA'09 IEEE International Conference on, Mayıs 2009, Kobe, 580-586.
- [70] Pressure profile systems inc., <http://www.pressureprofile.com/products.php>, 30 Ocak 2014
- [71] Saen, M., Ito, K., ve Osada, K., (2014), "Action-Intention-Based Grasp Control With Fine Finger-Force Adjustment Using Combined Optical-Mechanical Tactile Sensor", Sensors Journal, IEEE, 14(11): 4026-4033.
- [72] Yun, S., Park, S., Park, B., Kim, Y., Park, S. K., Nam, S., ve Kyung, K. U., (2014), "Polymer-Waveguide-Based Flexible Tactile Sensor Array for Dynamic Response", Advanced Materials, 26: 4474-4480.
- [73] Xie, H., Jiang, A., Wurdemann, H. A., Liu, H., Seneviratne, L. D., ve Althoefer, K., (2014), "Magnetic resonance-compatible tactile force sensor using fiber optics and vision sensor", Sensors Journal, IEEE, 14(3): 829-838.
- [74] Kaltenbrunner, M., Sekitani, T., Reeder, J., Yokota, T., Kuribara, K., Tokuhara, T., ... ve Someya, T., (2013), "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics", Nature, 499(7459): 458-463.
- [75] Wu, W., Wen, X., ve Wang, Z. L., (2013), "Taxel-addressable matrix of vertical-nanowire piezotronic transistors for active and adaptive tactile imaging", Science, 340(6135): 952-957.
- [76] Mannsfeld, S. C., Tee, B. C., Stoltenberg, R. M., Chen, C. V. H., Barman, S., Muir, B. V., ... ve Bao, Z., (2010), "Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers", Nature materials, 9(10): 859-864.
- [77] Wettels, N., Fishel, J. A., Su, Z., Lin, C. H., ve Loeb, G. E., (2009), "Multi-modal synergistic tactile sensing", In Tactile sensing in humanoids—Tactile sensors and beyond workshop, 9th IEEE-RAS international conference on humanoid robots, Aralık 2009, Paris.
- [78] Wettels, N., & Loeb, G. E., (2011), "Haptic feature extraction from a biomimetic tactile sensor: force, contact location and curvature", In Robotics

- and Biomimetics (ROBIO), IEEE International Conference on, Aralık 2011, Phuket, 2471-2478
- [79] Fishel, J., Lin, G. ve Loeb, G., BioTac® Product Manual – v15, <http://www.syntouchllc.com/Products/>, 26 Kasım 2012.
 - [80] Fishel, J. A., ve Loeb, G. E., (2012), "Sensing tactile microvibrations with the BioTac—Comparison with human sensitivity", In Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on, Haziran 2012, Roma, 1122-1127.
 - [81] Persichetti, A., Vecchi, F., Vitiello, N., Lenzi, T., ve Carrozza, M. C., (2009), "Skilsens: Conformant and robust sensing skin", In Proceedings of The IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Workshop on Tactile Sensing in Humanoids—Tactile Sensors and Beyond, Aralık 2009, Paris.
 - [82] Donati, M., Vitiello, N., De Rossi, S. M. M., Lenzi, T., Crea, S., Persichetti, A., ve Carrozza, M. C., (2013), "A flexible sensor technology for the distributed measurement of interaction pressure", *Sensors*, 13(1): 1021-1045.
 - [83] Persichetti, A., Vecchi, F., ve Carrozza, M. C., (2009), Conformant and flexible tactile sensor and method therefore International Patent, WO2009013599.
 - [84] De Rossi, S. M. M., Vitiello, N., Lenzi, T., Ronsse, R., Koopman, B., Persichetti, A., ve Carrozza, M. C., (2010), "Soft artificial tactile sensors for the measurement of human-robot interaction in the rehabilitation of the lower limb", In Proceedings of International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Ağustos 2010, Buenos Aires.
 - [85] Schurmann, C., Koiva, R., Haschke, R., ve Ritter, H., (2011), "A modular high-speed tactile sensor for human manipulation research", In World Haptics Conference (WHC), Haziran 2011, İstanbul, 339-344.
 - [86] Ohmura, Y., Kuniyoshi, Y., & Nagakubo, A., (2006), "Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces", In Robotics and Automation, ICRA 06 IEEE International Conference on, Mayıs 2006, Orlando, 1348-1353.
 - [87] Kampmann, P., ve Kirchner, F., (2014), "Integration of Fiber-Optic Sensor Arrays into a Multi-Modal Tactile Sensor Processing System for Robotic End-Effectors", *Sensors*, 14(4).
 - [88] Pelzers, K., (2014), "Optical Measurement of Foam Deformation", *Mikroniek*, 5: 26-30.
 - [89] Ueda, J., Ishida, Y., Kondo, M., ve Ogasawara, T., (2005), "Development of the NAIST-Hand with vision-based tactile fingertip sensor", In Robotics and Automation, ICRA 2005 Proceedings of the IEEE International Conference on, Nisan 2005, Barcelona, 2332-2337.
 - [90] Ito, Y., Kim, Y., ve Obinata, G., (2011), "Robust slippage degree estimation based on reference update of vision-based tactile sensor", *Sensors Journal*, 11(9): 2037-2047.

- [91] Types of Optical Fiber, http://www.fiber-optics.info/articles/types_of_optical_fiber, 15 Aralık 2013.
- [92] The Engineering ToolBox, Poisson's ratio, <http://www.engineeringtoolbox.com/>, 11 Eylül 2014.
- [93] Ilg, J., Rupitsch, S. J., Sutor, A., ve Lerch, R., (2012), "Determination of dynamic material properties of silicone rubber using one-point measurements and finite element simulations", Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 61(11): 3031-3038.
- [94] Hecht, E., (2002), Optics, Addison-Wesley, New York.
- [95] Taylor, A. E., (2000), Illumination fundamentals, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [96] Ryer, A. D., (1998), Light Measurement Handbook, International Light Inc.
- [97] Attwood, D., (1999), Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications, Cambridge university press, New York
- [98] Cecie S., (2007), Biology: Concepts and Applications, 7, Cengage Learning, Andover.
- [99] Pmoptics, Silicon, <http://www.pmoptics.com/>, 21 Ağustos 2014.
- [100] Johnson, K., (1987), Contact Mechanics, Cambridge university press, New York.
- [101] Popov, V., (2010), Contact mechanics and friction: physical principles and applications, Springer Science & Business Media, New York.
- [102] Shigley, J.E. ve Mischke, C.R., (1989), Mechanical Engineering Design, 5, Chapter 2, McGraw-Hill, New York .
- [103] Boresi, A. P., Schmidt R. J. ve Omar M. S., (1993), Advanced mechanics of materials, Wiley, New York.
- [104] Goryacheva, I. G., (1998), Contact mechanics in tribology, Springer Science & Business Media, New York.
- [105] Nave, R., Bulk Elastic Properties, Georgia State University, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/>, 21 Ağustos 2014.
- [106] Moretto, H. H., Schulze, M., Wagner, G., (2005), Silicones, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim.
- [107] Popov, V. L., (2013), "Method of reduction of dimensionality in contact and friction mechanics: A linkage between micro and macro scales", Friction, 1: 41-62.
- [108] Sneddon, I. N., (1965), "The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile", International Journal of Engineering Science, 3(1): 47-57.

- [109] Heß, M., (2012), "On the reduction method of dimensionality: The exact mapping of axisymmetric contact problems with and without adhesion", *Physical Mesomechanics*, 15: 264-269.
- [110] The Engineering ToolBox, Elastic Properties and Young Modulus for some Materials, <http://www.engineeringtoolbox.com/>, 11 Eylül 2014.
- [111] Popov, V. L. ve Psakhie, S. G., (2007), "Numerical simulation methods in tribology", *Tribology International*, 40(6): 916-923.
- [112] Geike, T. ve Popov, V. L., (2007), "Reduction of three-dimensional contact problems to one-dimensional ones", *Tribology international*, 40(6): 924-929.
- [113] Geike, T. ve Popov, V. L., (2007), "Mapping of three-dimensional contact problems into one dimension", *Physical Review E*, 76.3.
- [114] Hertz, H. R., (1895), "Ueber die Beruehrung elastischer Koerper (On Contact Between Elastic Bodies)", *Gesammelte Werke (Collected Works)*, Leipzig.
- [115] Deem, D. E., (1988), *Rheology of Dispersed Systems, Pharmaceutical Dosage Forms, Disperse Systems*, Marcel Dekker, New York.
- [116] Briceno, M. I., (2000), *Rheology of Suspensions and Emulsion, Pharmaceutical Emulsions and Suspensions*, Marcel Dekker, New York
- [117] Acartürk, F., Ağabeyoğlu, İ., Çelebi, N., Değim, T. Değim, Z., Doğanay, T., Takka, S. ve Tırnaksız, F., (2007), *Modern Farmasötik Teknoloji*, Fersa Matbaacılık Ltd. Şti., Ankara
- [118] Meyers M. A. ve Chawla, K. K., (2009), *Mechanical Behavior of Materials*, 2, Cambridge university press, New York.
- [119] Martin, A, (1993), *Rheology, Physical Pharmacy*, 4, Lea&Febiger, Philadelphia.
- [120] Junisbekov, T, M., Kestel'man, V. N, Malinin N. I., (2003), *Stress Relaxation in Viscoelastic Materials*, Science Publishers, Los Angeles
- [121] Roylance, D., (2001), *Engineering Viscoelasticity*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
- [122] Ferry, J. D., (1970), *Visco-elastic Properties of Polymers*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [123] Fung, Y.C., (1977), *A First Course in Continuum Mechanics*, Prentice-Hall Inc., New York.
- [124] De Haan, Y. M., ve Sluimers, G. M., (2001), "Standard linear solid model for dynamic and time dependent behaviour of building materials", *HERON*, 46(1).
- [125] Coefficient of Variation, http://www.ats.ucla.edu/stat/mult_pkg/faq/general/coefficient_of_variation.htm, 15 Ocak 2015.

MATLAB GRAFİK ARAYÜZ KODU

```

function varargout = gui_bilgi_oku_plot_01(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @gui_bilgi_oku_plot_01_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @gui_bilgi_oku_plot_01_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% BAŞLANGIÇ FREKANSININ AYARLANMASI
global fs10;
fs10=10;
% --- Executes just before gui_bilgi_oku_plot_01 is made visible.
function gui_bilgi_oku_plot_01_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
handles.output = hObject;
% clc
% clear
% close all
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
function varargout = gui_bilgi_oku_plot_01_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

```

```

% --- Executes on button press in solve.
function solve_Callback(hObject, eventdata, handles)
    guidata(hObject, handles);
% --- Executes when selected object is changed in uipanel1.
function uipanel1_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
% START / STOP BUTONUNA BASILINCA ÇALIŞCAK KOD
function start_stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
% START / STOP Butonun Ayarları
% Durum 1
% Ölçüm Yapılmıyorsa Butonun Görüntüsü
if (get(handles.start_stop,'Value')==0)
    set(handles.start_stop,'String','START');
set(handles.start_stop,'BackgroundColor',[0 1 0])
set(handles.start_stop,'ForegroundColor',[0 0 0])
else
    while (get(handles.start_stop,'Value')==1)
% Durum 2
% Ölçüm Yapılıyorsa Butonun Görüntüsü
set(handles.start_stop,'String','STOP');
set(handles.start_stop,'BackgroundColor',[1 0 0])
set(handles.start_stop,'ForegroundColor',[0 0 0])
% Kodun çalışma Frekansının Belirlenmesi

fs1=get(handles.fs1,'Value');
fs5=get(handles.fs5,'Value');
fs10=get(handles.fs10,'Value');
fs20=get(handles.fs20,'Value');
fs30=get(handles.fs30,'Value');
if fs1==1
    fs=1;
elseif fs5==1
    fs=5;
elseif fs10==1
    fs=10;
elseif fs20==1
    fs=20;
elseif fs30==1
    fs=30;
end
% Fs = fs                % fs [Hz] kodun çalışma frekansı
timeinterval=1/fs;        % zaman aralığı
% FREKANS - Döngünün Çalışma Frekansı
c=clock;                  % windows zamanı
saat=c(4);                % windows saati
dakika=c(5);              % windows dakika

```

```

saniye=c(6); % windows saniye
ti=mod(saniye,timeinterval); % geçen sürenin hesabı
% eğer geçen süre yukarıda belirlenen timeinterval'a ulaşıy orsa döğünün
% çalışmasına izin ver (Kod Döngü Frekansının Ayarlanması)

if ti==0
% Veri Aktarma Döngüsü
dosya=fopen('C:\File\ahmet.txt','r'); % dosyayı okuma modunda aç.
bilgi=char(fread(dosya)); % dosyadan okunan değerleri karaktere çevir.
bilgi=(str2num(bilgi)); % karakterleri sayıya çevir.
fclose('all'); % dosyayı kapa.
status = fclose('all'); % dosyanın kapanma durumu
satir=18; % matristeki satır sayısı
sutun=24; % length(bilgi)/satir;
deger=1; % sabit

if length(bilgi)==satir*sutun % matrise txt dosyasından veri aktarımının kontrolü

% Text Dosyasında İçer Aktarılan Verinin Matrise Satır ve Sutun Olarak
% Yerleştirilmesi
for i=1:satir
    for j=1:sutun
        bilgi_son(bilgi_son,i,j)=bilgi((i-1)*sutun+j); %değerleri ilgili (satır,sutun) yaz.
    end
end
bilgi_son=deger*bilgi_son;
end
% MATRİSTEKİ VERİNİN İŞLENMESİ

% Basit Matris İşlemleri
C=bilgi_son; % Matris verisinin Başka Bir Matrise Aktarılması
C1= flipud(C); % Matrisin Baş Aşağı Simetrik Olarak Döndürülmesi

% Matematiksel İşlemler
% Ölçüm Yüzeyinde Tahrik Edilen Noktalar - FİLTRELENMEMİŞ
inunfil=C1;
% Ölçüm Yüzeyinde Tahrik Edilen Noktalar - FİLTRELENMEMİŞ
hsize=[4 4]; % İki Boyutlu Low Pass Filtrenin Hassaslık Özelliği
sigma=1; % İki Boyutlu Low Pass Filtrenin Hassaslık Özelliği
h=fspecial('gaussian', hsize, sigma); % İki Boyutlu Low Pass Filtre
infil=conv2(C1,h,'same'); % Verinin Filtreden Geçirilmesi

% Ölçüm Yüzeyinde Tahrik Noktalarının Gri Ton Kodu
dl=infil; % Ölçüm Yüzeyindeki Parlaklık

% PLOT

```

```

gr=50; % Gri Tonlamalı Plotun Çözünürlüğü
axes(handles.axes1);
colormap(gray(gr))
pcolor(inunfil)
grid on
ylabel('y eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
xlabel('x eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
title('Ölçüm Yüzeyi - Tahrik
Noktaları','FontWeight','bold','FontSize',18,'FontName','Times New Roman')
handle=gca;
set(handle,'FontWeight','bold','FontSize',12, 'FontName','Times New Roman')
xlim([0 25]) ;
ylim([0 18]) ;
axes(handles.axes2);
colormap(gray(gr))
pcolor(infil)
grid on
ylabel('y eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
xlabel('x eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
title('Ölçüm Yüzeyi - Tahrik Noktaları
(Filtrelenmiş)','FontWeight','bold','FontSize',18,'FontName','Times New Roman')
handle=gca;
set(handle,'FontWeight','bold','FontSize',12, 'FontName','Times New Roman')
xlim([0 25]) ;
ylim([0 18]) ;
axes(handles.axes3);
colormap(gray(gr))
surf(dl)
grid on
ylabel('y eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
xlabel('x eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
title('Gri Ton Renk Kodu','FontWeight','bold','FontSize',18,'FontName','Times New
Roman')
handle=gca;
set(handle,'FontWeight','bold','FontSize',12, 'FontName','Times New Roman')
xlim([0 25]) ;
ylim([0 18]) ;
zlim([0 260]) ;
axes(handles.axes4);
colormap(gray(gr))
surf(dh)
grid on
ylabel('y eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
xlabel('x eksenı','FontWeight','bold','FontSize',15, 'FontName','Times New Roman')
title('Batma Miktarı [mm]','FontWeight','bold','FontSize',18,'FontName','Times New
Roman')

```

```

handle=gca;
set(handle,'FontWeight','bold','FontSize',12, 'FontName','Times New Roman')
xlim([0 25]) ;
ylim([0 18]) ;
zlim([-12 0]) ;
end
end
end
guidata(hObject, handles);

% START / STOP BUTONUNUN SONU
function start_stop_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)

```

ÇİZELGELER

Çizelge B.1 Yük hücresi kalibrasyon katsayısı

No	Ağırlık [Gram]	Kuvvet [Newton]	Gerilim [Volt]	Katsayı (Volt değerinden Newton değerine)
1 -	21	0.20594	0.0379	5.43379
2 -	23	0.22555	0.0402	5.61079
3 -	42	0.41188	0.0753	5.46987
4 -	64	0.63743	0.1164	5.47625
5 -	84	0.82376	0.1515	5.43737
6 -	139	1.36313	0.2484	5.48764
7 -	257	2.52032	0.4556	5.53187
8 -	378	3.70693	0.6709	5.52531
9 -	507	4.97199	0.9025	5.50913
10 -	929	9.11042	1.6515	5.51645
11 -	2037	19.97624	3.616	5.52440
ORTALAMA KATSAYI:				5.50208

Çizelge B.2 Verimlilik ve seçim değerleri

Soğurma Katsayısı	Kaynak Işık Şiddeti [lüks]		
	$h_1 = 10 \text{ mm}$ $\Gamma_1 = 0.442 \text{ [mm]}$	$h_2 = 15 \text{ mm}$ $\Gamma_2 = 0.680 \text{ [mm]}$	$h_3 = 20 \text{ mm}$ $\Gamma_3 = 0.884 \text{ [mm]}$
$\Sigma_1 = 0.010$	$I_0 = 8.78$	$I_0 = 9.91$	$I_0 = 10.75$
$\Sigma_2 = 0.011$	$I_0 = 8.97$	$I_0 = 10.03$	$I_0 = 11.18$
$\Sigma_3 = 0.012$	$I_0 = 9.14$	$I_0 = 10.32$	$I_0 = 11.64$
$\Sigma_4 = 0.013$	$I_0 = 9.33$	$I_0 = 10.63$	$I_0 = 12.12$
$\Sigma_5 = 0.014$	$I_0 = 9.52$	$I_0 = 10.94$	$I_0 = 12.6$
$\Sigma_6 = 0.015$	$I_0 = 9.72$	$I_0 = 11.30$	$I_0 = 13.12$
$\Sigma_7 = 0.016$	$I_0 = 9.91$	$I_0 = 11.66$	$I_0 = 13.65$
$\Sigma_8 = 0.017$	$I_0 = 10.10$	$I_0 = 12$	$I_0 = 14.20$
$\Sigma_9 = 0.018$	$I_0 = 10.32$	$I_0 = 12.33$	$I_0 = 14.88$
$\Sigma_{10} = 0.019$	$I_0 = 10.53$	$I_0 = 12.74$	$I_0 = 15.38$
$\Sigma_{11} = 0.020$	$I_0 = 10.75$	$I_0 = 12.74$	$I_0 = 16.03$

Çizelge B.3 Silikon ped üretim deneyleri

BİLEŞEN ORANI	A Bileşeni	B Bileşeni	Silikon Yağı	Katılaşma Sıcaklığı	Katılaşma Süresi	Pedin Kalınlığı	Kalıp Yüzey Malzemesi
150%	100 gr	100 gr	150 gr	Ortam Sıcaklığı	1 gün	4.62 mm	Cam
	100 gr	100 gr	150 gr	Ortam Sıcaklığı	1 gün	6.82 mm	Cam
	100 gr	100 gr	150 gr	Ortam Sıcaklığı	1 gün	9.8 mm	Cam
	100 gr	100 gr	150 gr	50 C	20 dak	5.3 mm	Cam
	100 gr	100 gr	150 gr	50 C	20 dak	5 mm	Mum
	100 gr	100 gr	150 gr	50 C	20 dak	4.1 mm	Cam
	100 gr	100 gr	150 gr	100 C	10 dak	4.5 mm	Cam
	100 gr	100 gr	150 gr	100 C	10 dak	3.2 mm	Cam
	100 gr	100 gr	150 gr	100 C	10 dak	2.4 mm	Cam
200%	55 gr	45 gr	100 gr	50 C	10 dak	7.6 mm	Cam
	55 gr	45 gr	100 gr	50 C	10 dak	7.18 mm	Cam
	55 gr	45 gr	100 gr	50 C	10 dak	10.83 mm	Cam
	55 gr	45 gr	100 gr	50 C	10 dak	13.86 mm	Cam
200%	40 gr	40 gr	80 gr	50 C	30 dak	6.24 mm	Cam
	40 gr	40 gr	80 gr	50 C	30 dak	6.78 mm	Cam
	40 gr	40 gr	80 gr	50 C	30 dak	9.63 mm	Cam
	40 gr	40 gr	80 gr	50 C	30 dak	10.18 mm	Cam

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet KIRLI
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.07.1984 – İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ahmetkrl@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Sistem Dinamiği ve Kontrol	İstanbul Teknik Üniversitesi	2010
Lisans	Makine Müh.	Dumlupınar Üniversitesi	2008
Lise	Fen - Matematik	Hüseyin Avni Sözen Anadolu Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2009 - 2015	Yıldız Teknik Üniversitesi – Makine Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2012	University of Connecticut	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Ömürlü, V.E, Büyükşahin, U., Artar, R., Kırılı, A., ve Turgut, M. N., (2013), “An experimental stationary quadrotor with variable DOF”, *Sadhana*, 38(2): 247-264.
2. Büyükşahin, U. ve Kırılı, A., (2012), “A New Nondestructive Test Equipment Based On Image Processing and Magnetic Flux Analysis”, *Advanced Materials Research*, 445: 131-136.
3. Ömürlü, V. E., Kırılı, A., Büyükşahin, U., Engin, Ş. N. ve Kurtoğlu, S., (2011) “A stationary, variable DOF flight control system for an unmanned quadcopter” *Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.*, 19(5)

Bildiri

1. Büyükşahin, U ve Kırılı A., (2014), “Multi Point, High Sensitive Tactile Sensing Module for Robots and Devices”, *IEEE Sensors Conference*, Kasım 2014, Valencia
2. Kırılı, A. ve Büyükşahin, U, (2014), “Fuzzy Logic Modeling of Transparent and Elastic Silicone Pad for a New and Novel Optic Based Tactile Sensor”, *AMPT2014, Advances in Materials & Processing Technologies*, Kasım 2014, Dubai
3. Kırılı, A., Demir, M. H., Büyükşahin, U., Tüfekçi, C. S. ve Yiğit, F., (2013), “Dynamic Analysis and Control of a Double Inverted Pendulum (Pendubot) with Vision Based Feedback”, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Eylül 2013, Malatya, 662 – 668.
4. Bulut, S.N., Gul, M., Beker, C., Ipek, I.I., Koculu, O.E.C., Topaloglu, C., Dincer, N., Kirli, A., Ertugrul, H.F. ve Tufekci, C.S., (2013), “Model satellite design for CanSat Competition”, *In Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 6th International Conference on, Haziran 2013, İstanbul, 913-917.
5. Büyükşahin, U ve Kırılı, A., (2011), “A New Nondestructive Test Equipment Based On Image Processing and Magnetic Flux Analysis”, *11th International Conference On Advances In Materials & Processing Technologies*, Temmuz 2011, İstanbul.

6. Kırılı, A., Aydeniz, D. ve Ömürlü, V. E, (2011), "Modeling of an Accelerometer Based Inclinator by Artificial Neural Networks", Mechatronics, IEEE International Conference on , Nisan 2011, İstanbul, 785-790.
7. Kırılı, A., Ömürlü, V. E., Büyükşahin, U., Atar, R. ve Ortak, E., (2010), "Self-Tuning Fuzzy PD Application on TI TMS320F28335 for an Experimental Stationary Quadrotor", 4th European Education and Research Conference (EDERC), Aralık 2010, Nice, 42-46.
8. Ömürlü, V. E., Engin, Ş. N., Kırılı, A., Kurtoğlu, S. ve Büyükşahin, U., (2009), "Design of Ground Fixed Quadrotor Flight Control Test Bench for Unmanned Aerial Vehicles With Variable Degrees of Freedom", TOK'09 Automatic Control National Meeting, Ekim 2009, İstanbul, 27.
9. Şenel, M., Kırılı, A. ve Kurşun A., (2009), "Rebound Braking And Control System For Low Velocity Impact Test Machine", IATS 09 International Advanced Technologies Symposium, Haziran 2009, Karabük, 122.

Proje

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 20013-06-04-DOP01 Numaralı Projesi: Araştırmacı
2. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma TÜBİTAK 1512 - Proje no: 2130185 Danışman