

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PVDF TİPİ SAYDAM PİEZOELEKTRİK EYLEYİCİLER ile
DOKUNSA GERİBİLDİRİMLİ EKRAN TASARIMI



ENES SELMAN EGE

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

MART 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PVDF TİPİ SAYDAM PİEZOELEKTRİK EYLEYİCİLER
ile DOKUNSAL GERİBİLDİRİMLİ EKRAN TASARIMI

ENES SELMAN EGE

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

MART 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

DESIGN of a HAPTIC DISPLAY with
TRANSPARENT PVDF PIEZOELECTRIC ACTUATORS

ENES SELMAN EGE

A THESIS OF DOCTORATE
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

ADVISOR: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

MARCH 2024



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 12/02/2024 tarih ve 2024/13 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11/03/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Enes Selman Ege'nin tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Abdulkadir Balıkçı

ÜYE

: Prof. Dr. M. Hakan Hoccoğlu

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Yakup Genç

ÜYE

: Doç. Dr. M. Tahir Güneşer

ÜYE

: Doç. Dr. Uğur Hasırcı

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



***Aileme
ve
Biricik Eşime***

ÖZET

Bu çalışmada, poliviniliden florür (PVDF) tipi saydam piezoelektrik eyleyicilerin ekranlarda bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim üretmek için kullanılabileceği gösterilmiştir. Bunun için bir dokunmalı ekran arayüzü tasarlanmış ve hazırlanmıştır. Dokunum, birçok araştırma konusunun bulunduğu disiplinler arası bir alan olduğundan öncelikle bu konular hakkında genel bilgi verilmiştir. İnsan derisinin ve özellikle parmak ucunun dokunsal işaretleri nasıl algıladığından ve algılanan işaretlerin beyin tarafından nasıl yorumlandığını inceleyen psikofizik biliminden bahsedilmiştir. Tasarlanan arayüz karakterize edilirken duysal mutlak eşik değeri belirlenmiş ve bunun için amaca uygun bir deney prosedürüne başvurulmuştur. Prosedür hakkında ön bilgi verilmiştir. Ayrıca PVDF eyleyicilerin sonlu elemanlar analiz programında nasıl modelleneceği anlatılmıştır. Son olarak konu ile ilgili günümüze kadar yapılmış bilimsel çalışmalar özetlenmiştir.

Yöntem bölümünde, dokunsal arayüz ve kontrol devresi anlatılmıştır. Bu kapsamda farklı eyleyici konfigürasyonuna sahip iki arayüz hazırlanmıştır. Eyleyicileri tasarlanan deney prosedürüne göre kontrollü olarak aktive etmek için bir mikrokontrolör, yükseltici ve çok kanallı anahtarlama modülünden oluşan bir düzenek kurulmuştur. Ayrıca iki arayüzün sonlu elemanlar programında yapılan serbest ve zorlanmış titreşim analizinin çıktıları verilmiştir. Elden edilen sonuçlar insan deneylerinde kullanılacak parametrelerin değerlerinin belirlenmesi için önemlidir. Kısaca, bu bölümde dokunsal arayüzlerin teknik özellikleri ve çalıştırılma şartları sonlu elemanlar analiziyle tespit edilmiştir.

Tasarlanan arayüzlerin, insanların kullanımına uygun olup olmadığının anlaşılabilmesi için psikofizik açıdan doğrulanması gerekmektedir. Bu amaçla iki farklı arayüzdeki deneylerde sabit uyarıtlı zorunlu seçim yöntemi uygulanmıştır. Birinci konfigürasyonda, PVDF eyleyicilerin insan algısı için en uygun olacak şekilde nasıl uyarılacaklarını tespit edilmiştir. İkinci konfigürasyonda ise hedef, yine aynı özellikteki PVDF eyleyicilerle dokunsal geribildirimlerin bölgeselleştirilebileceğini göstermektir.

Sonraki bölümde, elde edilen deney sonuçları 2-yönlü ANOVA yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Birinci arayüzde yapılan deneylerde eyleyicilerin uygun çalışma parametreleri şu ana kadar yapılan çalışmalarla uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. İkinci konfigürasyondaki deney sonuçları da ortaya koymuştur ki, tasarlanan arayüz ile bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirimler çok yüksek bir doğruluk oranıyla kullanıcıya verilebilir.

Sonuç bölümünde ise genel bir değerlendirme yapılmış ve PVDF eyleyicilerin gelecekteki potansiyel kullanım alanları öngörülme çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dokunsal Ekranlar, Dokunsal-Titreşimsel Geribildirim, Saydam PVDF Eyleyiciler, İnsan-Makine Arayüzü

ABSTRACT

In this study, it has been demonstrated that transparent polyvinylidene fluoride (PVDF) actuators can be utilized to generate localized haptic feedback on screens. For this purpose, a touchscreen interface has been designed and prepared. Since haptics is an interdisciplinary field that encompasses various research topics, general information about these subjects has been provided, first. Psychophysical science, which examines how the human skin, especially the fingertip, perceives tactile signals and how the perceived signals are interpreted by the brain, has been discussed. While characterizing the designed interface, the absolute detection thresholds value has been determined, and an appropriate experimental procedure has been applied for this purpose. Preliminary information about the procedure has been provided. Additionally, it has been explained how PVDF actuators can be modeled in finite element analysis software. Finally, scientific studies conducted on the subject until today have been summarized.

In the Method section, the haptic interface and control circuit have been described. In this context, two interfaces with different actuator configurations have been prepared. A set-up consisting of a microcontroller, an amplifier, and a multi-channel switching module has been established to activate and control the actuators according to the designed experimental procedure. Furthermore, the outputs of the free and forced vibration analyses conducted in the finite element software have been provided. The results obtained are important for determining the values of parameters to be used in human experiments. In short, in this section, the technical specifications and operating conditions of the designed haptic interfaces have been determined through finite element analysis.

To understand whether the designed interfaces are suitable for human use, they need to be validated psychophysically. For this purpose, forced-choice experiments with fixed stimuli have been conducted on two different interfaces. In the first configuration, it has been determined how the actuators should be stimulated to be most suitable for human perception. In the second configuration, the aim is to demonstrate that haptic cues can be localized with the PVDF actuators.

In the subsequent section, the obtained experimental results have been interpreted using 2-way ANOVA. In the experiments conducted on the first interface, appropriate operating parameters for the actuators have been determined to be compatible with previous studies. In addition, the results of the experiments in the second configuration have shown that with the designed interface, localized haptic cues can be provided to the user with very high accuracy.

Finally, a general evaluation has been made, and potential future applications of PVDF actuators have been predicted.

Keywords: Haptic Displays, Tactile Feedback, Transparent PVDF actuators, Human-Machine Interface

TEŞEKKÜR

Öncelikle, yıllar süren ciddi bir emek ve özverinin ürünü olan doktora tezimi başarıyla tamamlamayı bana nasip eden Rabbime şükürler olsun. O'nun lütuf ve yardımları olmadan bu çalışma gerçekleşmezdi.

Sonra, doktora öğrenimim sırasında benden desteğini esirgemeyen çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Abdulkadir Balıkçı'ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez izleme komitemdeki hocalarım Prof. Dr. Hakan Hocaoglu ve Doç. Dr. Yakup Genç'e de süreç boyunca sundukları değerli katkı ve ayırdıkları kıymetli vakitleri için teşekkür ederim.

Uzun öğrenim yıllarını da içeren tüm hayatım boyunca, her koşulda bana maddi-manevi dayanak olan kıymetli babama ve sevgili fedakâr anneme yürekten teşekkür ediyorum. Sevgili eşime de özellikle teşekkür ediyorum. Sancıli doktora sürecinde, benden anlayışını hiçbir zaman esirgemedi ve hep yanımda oldu.

Ayrıca, çalışma süresi boyunca bana her anlamda destek olan değerli kardeşlerime ve arkadaşlarıma da teşekkür ediyorum.

Bu kişilere ek olarak, sağladığı imkanlardan dolayı Türkiye'nin gözbebeği kurumumuz TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Konusu	2
1.2. Tezin Amacı ve Katkısı	4
1.3. Tezin İçeriği	6
2. KURAMSAL ÇERÇEVE	8
2.1. İnsanda Taktıl Titreşim Algısı	8
2.2. Dokunumda Psikofizik	11
2.3. PVDF Eyleyicilerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi	15
2.4. Literatür Araştırması	17
3. YÖNTEM	25
3.1. Donanım	25
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal Titreşim Analizi	29
3.2.1. Genel Bilgi	29
3.2.2. Sonlu Elemanlar Programı ile Serbest Titreşim ve Modal Analiz	30
3.2.3. Sonlu Elemanlar Programı ile Zorlanmış Titreşim Analizi	32
4. İNSAN DENEYLERİ	37
4.1. Genel Bilgi	37
4.2. Birinci Konfigürasyon	37
4.3. İkinci Konfigürasyon	40
5. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI	43
5.1. Birinci Deneyin Sonuçları	43
5.2. İkinci Deneyin Sonuçları	45
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	50
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	58
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYIN	59
EKLER	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1:	a) Parmakla yüzey arasında oluşan çekim ve tepki kuvvetleri, b) Elektrostatik dokunsal yöntemin çalışma ilkesi.	2
Şekil 1.2:	a) Pul tipi piezoelektrik eyleyiciler, b) Yığın tipi piezoelektrik eyleyiciler, c) Yassı titreşim motorları, d) Silindirik titreşim motorları, e) Lineer rezonant eyleyici, f) Lineer rezonant eyleyici.	3
Şekil 1.3:	Farklı cihaz ve şartların sürücülerin tepki süresine etkisi.	5
Şekil 2.1:	Tüysüz derideki almaç çeşitleri.	10
Şekil 2.2:	İnsan vücudunda bazı bölgelerde titreşim genliği-titreşim frekansı karakteristiği.	11
Şekil 2.3:	İdeal ve örnek psikometrik eğriler.	14
Şekil 2.4:	Piezoelektrik malzemelerde eksenlerin isimlendirmesi.	16
Şekil 2.5:	Akıllı telefonlarda kullanıcıların etkileşim performansını artırmak için kullanılan lineer rezonant eyleyiciler.	18
Şekil 2.6:	Eyleyici dizisiyle oluşturulmuş dokunsal bir arayüz.	19
Şekil 2.7:	T-PaD düzeneği ve farklı uyarı frekanslarında arayüzde oluşan titreşim desenleri.	20
Şekil 2.8:	Piezoelektrik eyleyiciler ile oluşturulmuş dokunsal bir ekran düzeneği.	21
Şekil 2.9:	Piezoelektrik eyleyiciler ile oluşturulmuş bir dokunsal ekran ve elden edilen bölgesel geribildirim.	22
Şekil 2.10:	Çok katmanlı dielektrik elastomer eyleyici.	23
Şekil 2.11:	Dielektrik ve grafen temelli eyleyiciler.	23
Şekil 3.1:	Birinci konfigürasyonda eyleyicilerin dizilimi.	25
Şekil 3.2:	İkinci konfigürasyonda eyleyicilerin dizilimi.	25
Şekil 3.3:	Tasarlanan saydam dokunsal plaka.	26
Şekil 3.4:	Düzeneği kontrol etmek için kurulan devre şeması.	27
Şekil 3.5:	Eyleyici filmlerin plakaya yapıştırılması.	28
Şekil 3.6:	Birinci konfigürasyondaki mod şekilleri.	32
Şekil 3.7:	İkinci konfigürasyondaki mod şekilleri.	32
Şekil 3.8:	Birinci konfigürasyonda 5 farklı frekansta yüzeydeki yer değiştirme genlikleri.	34
Şekil 3.9:	İkinci konfigürasyonda 230 Hz'te yüzeydeki yer değiştirme genlikleri.	35
Şekil 4.1:	Birinci deneyde kullanılan saydam dokunsal ekran arayüzü ve monitörde sunulmuş olan görsel.	39
Şekil 4.2:	Uyarma gerilimi-maksimum titreşim genliği grafiği.	42
Şekil 5.1:	Başarı oranının frekans ve uyarı seviyesine göre değişimi.	43
Şekil 5.2:	U-formunda frekans-algı eşiği grafiği.	45
Şekil 5.3:	Deneklerin dokunsal geribildirimleri bölgeselleştirmede başarı oranları	46
Şekil 5.4:	Başarı oranlarının gerilim seviyesine göre değişmesi.	47
Şekil 5.5:	Düşük gerilim seviyesinde konumlara bağlı doğruluk oranları.	48
Şekil 5.6:	Yüksek gerilim seviyesinde konumlara bağlı doğruluk oranları.	48

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Almaçların sınıflandırılması.	9
Tablo 2.2: Her uyarı şiddetinin 50 kez sunulduğu bir örnek.	13
Tablo 2.3: SEY analizinde kullanılan temel değişkenler.	17
Tablo 3.1: Dokunsal arayüzün ilk 6 doğal frekansı.	32
Tablo 4.1: Frekanslar arası kazanç katsayıları.	40
Tablo 5.1: Farklı frekanslarda mutlak algı eşiklerinin elde edilmesini sağlayan gerilim seviyeleri.	44



1. GİRİŞ

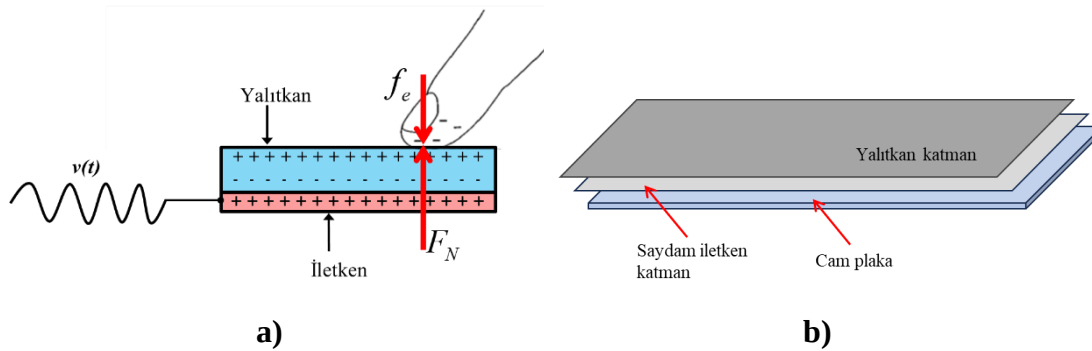
“Haptic” kelimesi Yunanca haptikos sözcüğünden türetilmiştir. Haptikos dokunma duyusuna ait olan, dokunulabilir, dokunarak algılanabilir gibi anlamlara gelmektedir [1]. Dokunmalı ekranların son yıllarda iyice yaygınlaşmasıyla yükselen bir bilim dalı haline gelen “haptics”ın Türkçedeki karşılığı “dokunum” olup dokunum kelimesinin sıfat hali ise “dokunsal”dır [2]. Teknik açıdan dokunum, insanların dokunma duyusuyla farklı arayüzler üzerinden deneyimleyebileceği mekanik ve elektriksel devinimler oluşturma, dolayısıyla insanların dokunsal olarak algılayacağı geribildirimleri bilgisayar ve makineler yardımıyla üretme ile ilgilenen bilim dalıdır. Dokunum, insanda algılanma şekli olarak ikiye ayrılmaktadır: a) Kinestetik dokunsal geribildirim ve b) Titreşimsel dokunsal geribildirim. Kinestetik dokunsal geribildirimler temel olarak insanın uzuvları, kas, kemik ve eklemleriyle ilgili geribildirimlerdir. Diğer bir deyişle kinestetik geribildirimler kuvvet olarak eklem ve kaslarda algılanmaktadır: ağır bir nesneyi itme-çekme, bir cismi kaldırarak ağırlığını tahmin etme, yüzeylerin sertlik ve yumuşaklığını algılama gibi. Titreşimsel dokunsal geribildirimler ise deri üzerinde oluşan bölgesel etkilerle ilgilidir. Yüzeylerin pürüzlülük, kayganlık, sivrilik gibi doku özellikleri, nesnelerin sıcaklığı ve bölgesel titreşimler bu gruba girmektedir. Dolayısıyla ekranlarda dokunum dendiğinde, özellikle dokunmalı ekranlarda kullanıcı deneyimlerinin iyileştirilmesinin amaçlandığı titreşimsel dokunsal geribildirimler ve bunların üretilmesi kastedilmektedir.

Son yıllarda çoklu ortam cihazlarında dokunmalı ekranların kullanımı çok yaygınlaşmıştır. Özellikle Amerikan Apple firmasının cazip kullanıcı arayüzü uygulamalarını öne çıkardığı dokunmalı ekrana sahip iPhone telefonunun lansmanını 2007 yılında yaptıktan sonra bu etkinin arttığı görülmektedir. Artık tablet bilgisayarlardan cep telefonlarına, araç içi bilgi-eğlence ekranlarından kiosklara kadar birçok akıllı sistemde insan-bilgisayar etkileşiminde baskın arayüz dokunmalı ekranlar olmaktadır [3]. Ancak gözlemlendiği kadarıyla, dokunmalı ekranların önemli bir dezavantajı bulunmaktadır: dokunmalı etkileşimin ekrana bakmadan çok zor olması. Gerçekten de kullanıcılar etkileşim esnasında parmağıyla ekranın hangi noktasına dokunduğunu belirleme ve dokunma eylemini başarıp başarmadığına dair bir

geribildirim alma ihtiyacı duymaktadır [4]. Bu ihtiyacı gidermeye yönelik çalışmaların artmasıyla ekranlarda dokunum, dünya çapında sıcak bir araştırma alanı haline gelmiştir. Ayrıca dokunmalı akıllı cihazların yaygınlığı göz önüne alınırsa yakın gelecekte dokunsal ekran pazarının 50 milyar dolar seviyesine ulaşması beklenmektedir [5].

1.1. Tezin Konusu

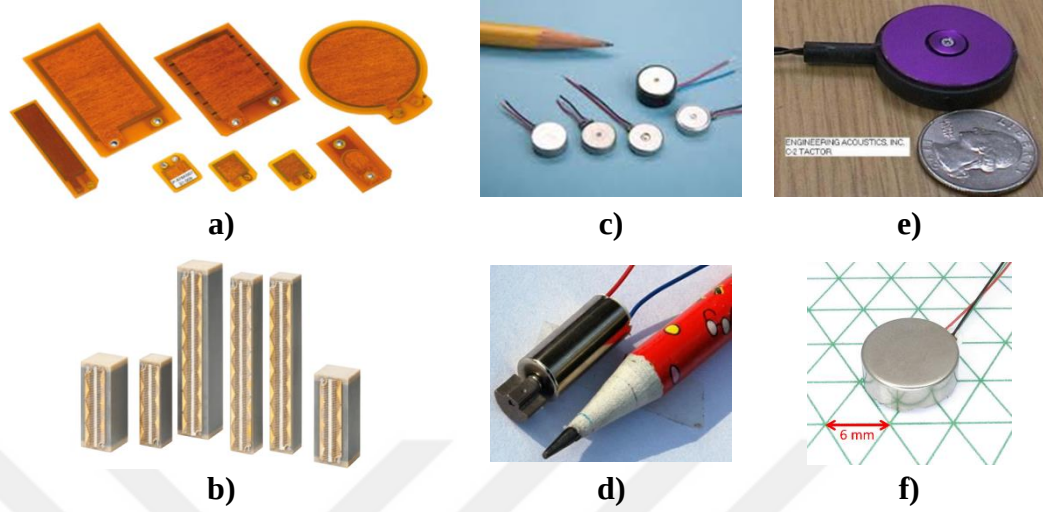
Çoklu ortam cihazlarının ekranlarında dokunsal geribildirim elde etmenin birkaç yöntemi vardır. Bunlar arasında en yaygınları, elektrostatik ve mekanik yöntemlerdir. Elektrostatik yöntemde, dokunmalı ekran yüzeyinin içinde gömülü olan saydam iletken katman zamana göre değişen bir gerilim işaretiyle uyarılır. Bu gerilim işareti, kullanıcının yüzey üzerinde hareket eden parmağında indüklenme yoluyla yük birikmesine sebep olur. Kapasitörlerin çalışma ilkesini de açıklayan bu etkileşimin sonucunda parmakla yüzey arasında elektrostatik çekim kuvveti oluşur (**Şekil 1.1a**). Bu kuvvet, kendisini oluşturan gerilim işareti gibi zaman göre değişkendir ve hareketli parmak ile yüzey arasında gerçekleşen sürtünme kuvvetine eklenerek parmağa etki eden toplam kuvvetin de zamana göre değişmesine sebep olur (**Şekil 1.1b**). Sonuç olarak kullanıcı, yüzeyde herhangi bir titreşim olmamasına rağmen parmağına etki eden bu kuvveti titreşim olarak algılar.



Şekil 1.1: a) Parmakla yüzey arasında oluşan çekim ve tepki kuvvetleri, b) Elektrostatik dokunsal yöntemin çalışma ilkesi [6].

Mekanik yöntemde ise piezoelektrik eyleyiciler, titreşim motorları ve lineer rezonant eyleyiciler gibi birtakım eyleyicilerin ürettikleri titreşimi yapılandırıldıkları dokunmalı ekran yüzeyine doğrudan aktarmaları suretiyle dokunsal geribildirim oluşturulur

(Şekil 1.2). Yani kullanıcı, yüzeyle herhangi bir dokunsal etkileşime girmese bile ekranda titreşime bağlı yer değiştirme hareketi gözlemlenebilir.



Şekil 1.2: a) Pul tipi piezoelektrik eyleyiciler (Physik Instrumente), b) Yığın tipi piezoelektrik eyleyiciler (Physik Instrumente), c) Yassı titreşim motorları, d) Silindirik titreşim motorları, e) Lineer rezonant eyleyici (Tactor, Engineering Acoustics), f) Lineer rezonant eyleyici (Precision Microdrives).

İki yöntemin de artıları ve eksileri bulunmakla birlikte, bu tezde piezoelektrik eyleyiciler ile dokunsal geribildirim elde edileceği mekanik yöntem konu edilecektir. Pek tabii ki bu seçimin sebepleri vardır. Öncelikle, elektrostatik yöntemde kullanıcı parmağının sürekli hareket halinde olması gerektiği halde, mekanik yöntemde parmak hızından bağımsız olarak dokunsal geribildirim elde edilebilir. Eyleyiciler kendi hareketlerini yüzeye mekanik temas ile doğrudan ilettikleri için ekran fiziksel olarak titreşir. Oysa elektrostatik yöntemde ekran hareket etmez, bilakis üzerine etki eden kuvvetler zamanla değiştiği için sadece parmak titreşime maruz kalır. Dolayısıyla mekanik yöntemle elde edilebilecek dokunsal efekt yelpazesi diğer yönteme kıyasla daha geniştir. Mekanik yöntemin elde edilmesi için piezoelektrik eyleyicilerin seçilmesinin sebebi ise, piezoelektrik malzemelerin bir uyarıya verdikleri cevabın süresinin diğer eyleyicilere göre çok daha kısa (milisaniye mertebesinde) olması ve böylece çok daha hassas kontrol edilebilmeleridir [7]. Dokunsal geribildirimi oluşturan eyleyicilerin cevap süresinin kısa olması insan parmağının ekran yüzeyindeki hızı ve geribildirim çözünürlüğü gibi parametreler göz önüne alındığında elzemdir.

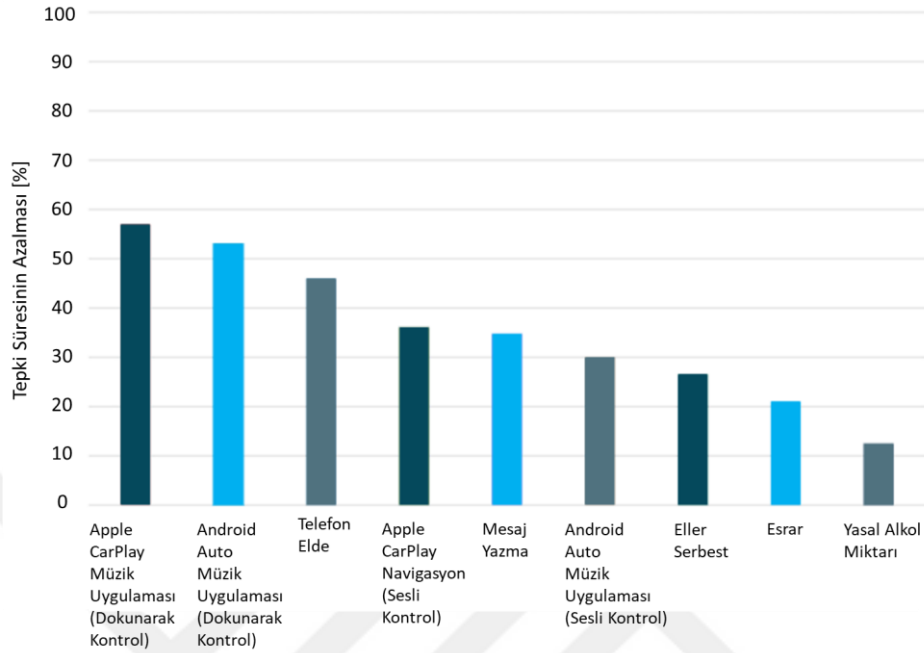
Öte yandan, piezoelektrik eyleyicilerin önemli dezavantajları da vardır. Eyleyiciler, ekranın sağladığı görsellerin engellenmemesi için doğal olarak ekran çerçevesine yerleştirilmek zorundadırlar ve böylece üretilen dokunsal titreşimi kullanıcı parmağının ekran üzerindeki konumuna göre sürekli güncelleyerek odaklama ihtiyacı doğmaktadır. Her ne kadar rezonans frekanslarının ve çeşitli işaret işleme tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar yapılmış olsa da özellikle çok dokunuşlu ekranlarda zorluklar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca anlık olarak yoğun işaret işleme yükü güç tüketimini artırmaktadır [8].

PVDF malzemeler de piezoelektrik davranış sergilediği için son yıllardaki bazı araştırmalarda ekranlarda dokunsal geribildirim elde etmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle saydam PVDF filmler, yine saydam olan ITO (indiyum kalay oksit) elektrotlar ile kaplanarak uygun eyleyici seçeneklerinden biri olmuştur. Bu tezde, saydam PVDF eyleyicilerin ekranlarda dokunum alanında en önemli teknik zorluklardan biri olan dokunsal geribildirim bölgeselleştirilmesinde nasıl kullanılabileceği anlatılmış ve bunun gösterildiği bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

1.2. Tezin Amacı ve Katkısı

Ekranlarda dokunsal geribildirim genel olarak kullanıcıların deneyimlerini iyileştirmeye ve etkileşim performanslarını artırmaya yarar. Dokunmalı ekranlar yaygınlaşmaya başlamadan önce kullanıcıların cihazlarla etkileşime girdikleri arayüzlerde mekanik bileşenler (tuş, düğme, anahtar, kaydırma tekerleği, vb.) yer almaktaydı. Kullanıcılar bu bileşenler ile cihaza bir girdi sağladıklarında, girdi sağladıklarını eşzamanlı olarak biliyorlardı. Çünkü bileşen üzerinden dokunsal olarak bir geribildirim alınmaktaydı. Böylece bazı işlemler görsel olarak kontrol etmeden ve el yordamıyla yapılabilmekteydi. Ancak günümüzdeki dokunmalı ekranlar bu temel özellikten yoksundur. Kullanıcıların cihaza bakmadan akıllı telefonlarını kullanmaları çok zordur. Nitekim insan, parmağının doğru yere temas edip etmediğini görmeden bilemez. Bu durum da özellikle bilişsel yükün fazla olduğu görevlerde etkileşim performansını olumsuz etkiler. Çünkü insanın duyu kanallarının veri işleme kapasitesi sınırlıdır [9], [10]. Çoğu zaman sonuç, sadece etkileşim performansının kötüleşmesiyle sınırlı kalmaz, asıl görev performansı da kötüleşir. Ve bu da istenmeyen gelişmelere sebep olur. Örneğin araç sürücülerinin için izin verilen alkol miktarı, sürücülerin tepki süresini %12 oranında artırırken, cep telefonunda mesaj

yazmak %35 ve araç içi bilgi-eğlence ekranlarını kullanmak en az %53 oranında artırmaktadır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3: Farklı cihaz ve şartların sürücülerin tepki süresine etkisi [11].

Ekranlarda dokunsal geribildirim burada devreye girer ve sürücülerin ekranlarla etkileşime girdiklerinde dikkatlerinin daha az dağılmasını sağlar. Araç içi dokunsal arayüzlerin sürücülerin performansına katkısını vurgulayan başka bir çalışmada ise dokunsal direksiyonun navigasyon hatalarını 4 kata kadar azalttığı gösterilmiştir [12].

Bu sonuçlar ünlü psikolog Mayer'in bulgularıyla da örtüşmektedir. Bilişsel çok kipli öğrenme teorisine göre, öğrenme teorisinde görsel ve işitsel duyu kanalları birlikte rol alır ve bu kanalların veri işleme kapasiteleri sınırlıdır [13], [14]. O halde kişi öğrenme süreci içindeyse veya herhangi bir iş ile meşgulse yeni bir bilginin görme ve işitme duyuları vasıtasıyla değil de görece boş olan dokunsal kanal üzerinden verilmesi, kişiye ek bilişsel yük yüklememiş olur. Dolayısıyla yeni bilginin işlenmesi ve yorumlanması kolaylaşır. Sonuç olarak iş görme veya öğrenme performansı iyileşmiş olur [15], [16].

Dokunsal geribildirim diğer bir önemli özelliği ise kullanıcıyı sürece angaje etmesidir. Özellikle sanal gerçeklik uygulamalarında ve oyun/eğlence alanında ek bir duyu kipi olarak ilgi görür ve kullanıcıyı etkinliğin içine çeker. Nitekim dijital bir süreç etkileşimi gerçeğe ne kadar yakınsa o kadar dikkat çeker. Ayrıca dokunsal geribildirim

görsel ve işitsel uyarıların aksine ortama yayılmaz, kişiye özeldir. Dokunsal etkileri sadece etkileşime giren kişi algılar.

Görüldüğü gibi ekranlarda dokunum, oldukça bakir bir alan olmasıyla birlikte, kullanıcıların etkileşim performanslarının iyileşmesi açısından önemli bir potansiyel barındırır. Öte yandan bu alanda araştırmacıların aşmaya çalıştığı bazı önemli zorluklar bulunmaktadır. Dokunsal geribildirim bölgeselleştirilmesi bunlardan biridir. Nitekim günümüzdeki cihazlarda çoklu dokunma gerçekleşiyor olsa bile üretilen dokunsal etkiler bölgeselleştirilemeden çoklu dokunsal algılama mümkün olmaz. Kullanıcının, ekrana dokunduğu iki parmağında iki farklı dokunsal geribildirim alabilmesinin yolu hissiyatın bölgeselleştirilmesinden geçer.

Çoklu ortam cihazlarının ekranlarında dokunsal geribildirim elde etmenin iki temel yöntemi olduğundan yukarıda bahsedilmişti. Birtakım üstünlükleri sebebiyle tez konusu olarak seçilen mekanik yöntemde de en büyük zorluklardan biri dokunsal geribildirim, dolayısıyla titreşimin bölgesel olarak sınırlandırılmasıdır. Çünkü eyleyici çeşidinden bağımsız olarak, üretilen titreşim tüm katı ortamlarda yayıldığı gibi ekranlarda da arayüzün tamamına yayılır. Oysa sadece parmağın ekranla temas yüzeyi kadar bir alandaki dokunsal geribildirim, kullanıcı etkileşiminin doğruluğunu ve etkinliğini artırır. Örneğin ekran üzerindeki bir dokunsal klavye uygulamasında, sadece basılan karakterin olduğu bölgenin geribildirim vermesi yazmayı kolaylaştırır ve hızlandırır. Ayrıca yüzeye dokunan her parmağa farklı geribildirimlerin verilebilmesi arayüzdeki dokunsal deneyimin zenginleşmesini sağlar.

Bu çalışmanın temel amacı, saydam PVDF eyleyicilerin dokunmalı ekranlarda bölgesel dokunsal geribildirim elde etmek için kullanılabileceğini göstermektir. Yakın gelecekte bu eyleyiciler kullanılarak daha yüksek çözünürlüklü dokunsal geribildirimlerin üretilbildiği ekranların geliştirileceğine inanılmaktadır.

1.3. Tezin İçeriği

Tezde giriş bölümünden sonra gelen ikinci bölümde kuramsal çerçeve hakkında bilgi verilmiştir. Yani insanlarda, özellikle parmak ucu bölgesindeki derinin dokunsal uyarıları nasıl algıladıkları biyolojik yapıya değinilerek anlatılmış, daha sonra tez çalışmasında sonuçların doğrulanması için ilham alınan psikofizik bilimi hakkında bilgi verilmiştir. Ek olarak kurgulanan tasarımın analizi için faydalanan bilgisayar

destekli yöntemden bahsedilmiştir. Son olarak tez konusu ile ilgili literatürdeki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölüm yöntemi, yani sistemin donanım ve yazılım açısından nasıl tasarlandığını ve hangi tekniklerden istifade edildiğini ayrıntılı olarak anlatmaktadır. Dördüncü bölümde, hazırlanan dokunsal arayüzün insan deneyleri ile psikofizik doğrulanması yapılmıştır. Beşinci bölümde ise elden edilen bütün sonuçlar bir başlık altında değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Son bölüm, çalışmanın sonuç bölümüdür. Genel bir değerlendirme ve tez konusunun potansiyel geleceği hakkında öngörülerde bulunulmuştur.



2. KURAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde saydam piezoelektrik eyleyiciler ile dokunsal ekran tasarımı sürecinde istifade edilen bilimsel alan ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Dokunmalı ekranlar, insan parmaklarının temasını herhangi bir şekilde (kapasitif, kızılötesi, rezistif vb. tekniklerle) algılayabilen, bu sayede parmakların ekran üzerindeki konumlarını belirleyebilen ve bu girdilere görsel olarak yanıt verebilen veya arayüz olarak görevlendirildiği daha büyük bir makinenin yanıt vermesini sağlayan ekranlardır. Bu yüzden aslında bir insan-makine arayüzü oldukları için insan biyolojisinin de tasarım aşamasında dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla dokunsal geribildirim tasarımı, birkaç mühendislik ve bilim dalının birlikte yorumlandığı disiplinler arası bir alandır. Kullanılan eyleyicilerin uygun koşullarda enerjilendirilmesi ve uyarılmasına ek olarak, insanın parmak ucundaki dokunsal almaçların (dokunsal reseptörler) karakterleri, alınan dokunsal geribildirimlerin beyin tarafından nasıl yorumlandığı, bu yorumların ne gibi tepkilere sebep olduğu ve tepkilerin insan deneyleri ile nasıl ölçülüp değerlendirileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Tezin bu bölümünde öncelikle yüzeylerdeki titreşimin insan parmağı tarafından nasıl algılandığı hakkında bilgi verilecektir. Sonrasında ise psikofizik biliminin dokunum alanında kullanımından ve dokunsal eşikleri belirlemek için başvuru yöntemlerden kısaca bahsedilecektir. Son kısımda ise tez çalışmasının literatürdeki konumu ve önemi açıklanacaktır.

2.1. İnsanda Taktıl Titreşim Algısı

Taktıl, deri üzerinde gerçekleşen haptik etkiler için kullanılan bir ifadedir. Bu bağlamda bir masayı kaldırmak ve kaldırırken onun boyutunu ve ağırlığını algılamak kinestetik haptik bir olayken, insan parmak ucu gibi derinin bir alanında titreşim, pürüz, sıcaklık, vs. hissetmek hem haptik hem taktıl bir olaydır. Dolayısıyla derideki almaçlar vasıtasıyla gerçekleşen haptik olaylara “taktıl algı” denebilir.

İnsan derisi genişliği kişilere bağlı olarak değişmekle birlikte 1,5–2 m² arasında bir yüzey alanına sahiptir [1]. Bu anlamda en büyük organ olarak kabul edilir. Dışarıdan içe doğru sırasıyla epidermis, dermis ve hipodermis katmanlarından oluşur. Bu katmanların kalınlığı ve katmanlardaki almaç yoğunluğu vücutta bulunduğu konuma

göre değişebilir. Dokunma, sıcaklık, basınç gibi mekanik duyuların algılanmasından sorumlu almaçlar dermis katmanında yer alır [17].

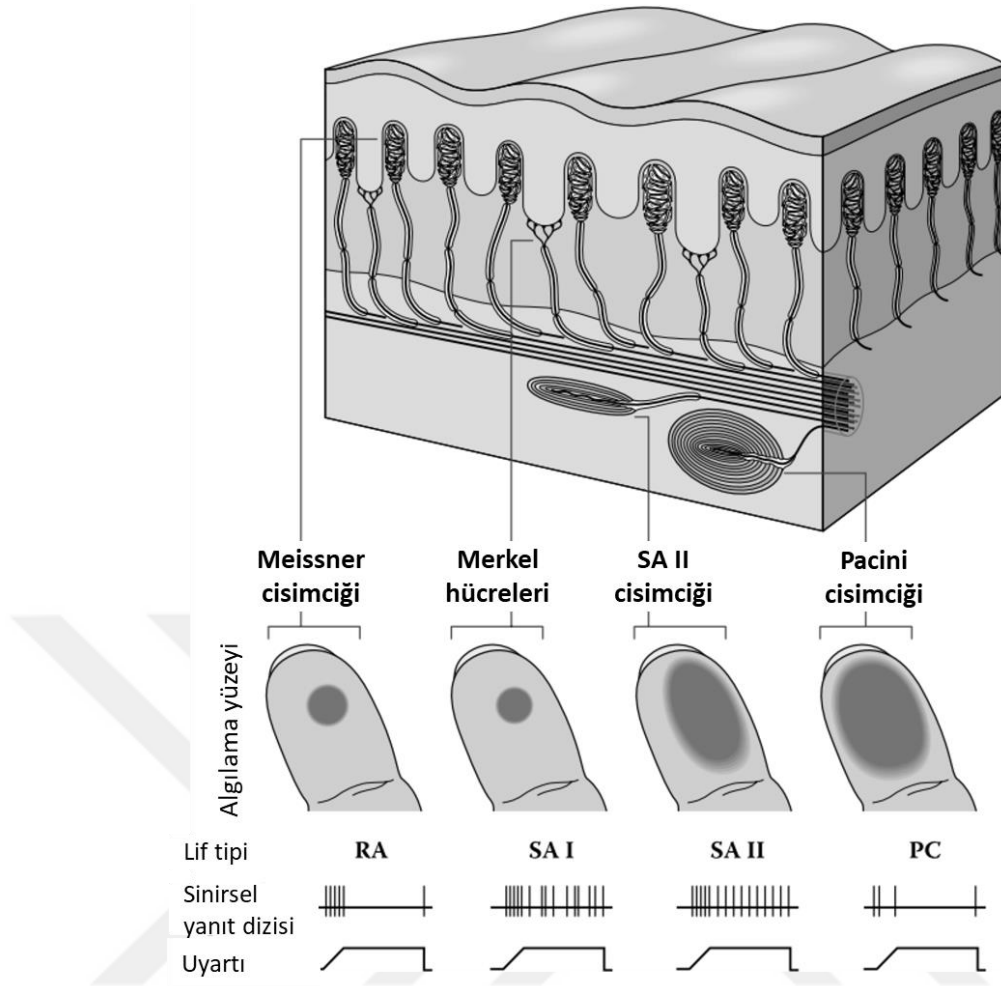
İnsan derisinde taktıl algıdan sorumlu olan temel olarak 4 çeşit almaç bulunur. Bunlar Pacini cisimciği, Meissner cisimciği, Merkel disk hücreleri ve Ruffini cisimciğidir [17]. Ancak son yıllarda, Ruffini cisimciklerinin daha çok tüylü deride bulunduğu ve tüysüz deride bulunduğu sanılan Ruffini cisimciklerinin aslında Pacini cisimciğine benzemekle birlikte daha küçük ve basit yapıda olan sonlanmalar olduğu ortaya koyulmuştur [18]. İnsan derisinin büyük bölümü tüylü deri olup el ayası, ayak tabanı ve parmakların iç yüzeyleri gibi bazı bölgeler tüysüzdür. Dokunmalı ekranlarda parmak uçları kullanıldığından bu çalışmada da tüysüz deri yapısı konu edilecektir.

Bu yapıda, taktıl algıdan sorumlu olan 4 çeşit almanın bağlı olduğu sinir lifleri, derinin duyarlı olduğu alan büyüklüğüne ve uyum hızına göre sınıflandırılırlar (**Tablo 2.1**) [18].

Tablo 2.1: Almaçların sınıflandırılması.

		Duyarlı Alan Büyüklüğü	
		Dar	Geniş
Uyum Hızı	Yavaş	SA-I lifli Merkel hücreleri	SA-II lifli Ruffini cisimciği
	Hızlı	RA lifli Meissner cisimciği	PC lifli Pacini cisimciği

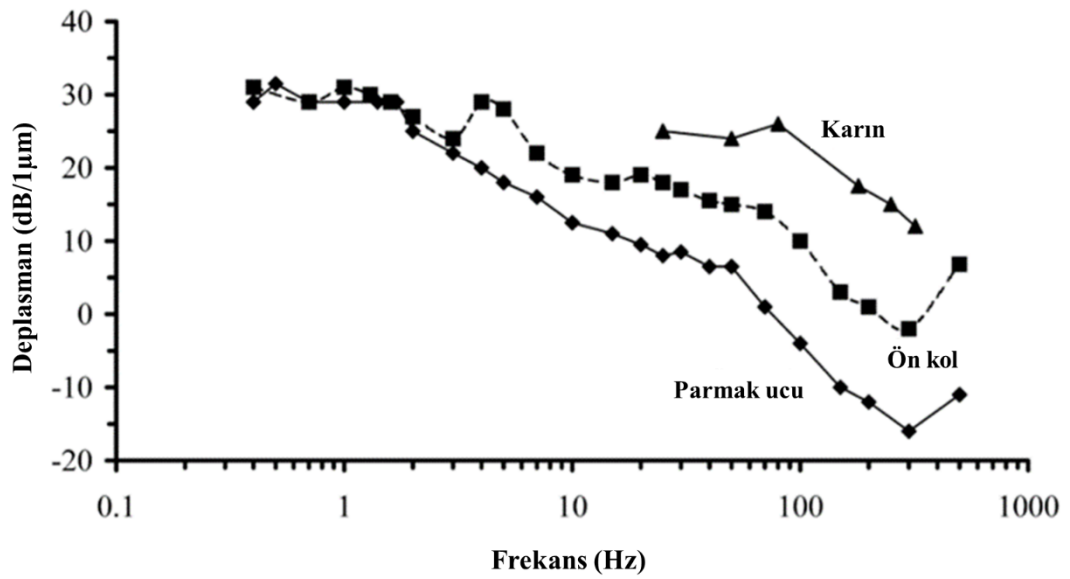
Tablodaki tip-I deri üzerindeki 2-8 mm çapındaki dar duyarlı bölgeyi, tip-II ise 10-100 mm çapındaki geniş duyarlı bölgeyi göstermektedir. SA (slowly adapting) yavaş uyumlu, RA (rapidly adapting) hızlı uyumlu anlamına gelmektedir. Hızlı uyumlu almaçlar uyartılara önce hızlıca uyumlanarak cevap verirler, ancak uyartı belli bir süre devam ettiğinde kalan sürede aktive olmazlar. Yavaş uyumlu almaçlar ise başlangıçta görece yoğun cevaplardan sonra azalarak da olsa, uyartının var olduğu sürenin tamamında aktif kalırlar (**Şekil 2.1**).



Şekil 2.1: Tüysüz derideki almaç çeşitleri [18].

Yukarıda verilen bilgilerin ışığında, insandaki taktıl algı mekanizmasını açıklamak için çok kanallı model teorisi geliştirilmiştir [19]. Bu modele göre, karmaşık bir dokunsal uyarının farklı bileşenleri, çeşitli almaçlar ve ilgili sinir liflerinden oluşan 4 ayrı duyu kanalı (P (Pacini), NP (non-Pacini) I, NP II ve NP III) tarafından birbirinden bağımsız olarak beyne iletilir. P kanalı, Pacini cisimciği ve PC liflerinden oluşan kanal hareket ve basınç değişikliklerini, ince yüzey dokularını algılar; 40–500 Hz aralığındaki titreşimlere duyarlıdır. NP I kanalı, Meissner cisimciği ve RA tipi liflerden oluşur; 3–40 Hz aralığındaki düşük frekanslara duyarlı olup hareket/basınç değişikliklerinin algılanması ve kavrama kontrolünden sorumludur. NP II kanalı, Pacini benzeri cisimciklerden ve SA II sinir liflerinden oluşur; gerilme ve yanal deformasyonları algılar ve 40–500 Hz arasında duyarlıdır. Son olarak NP III kanalında Merkel disk hücreleri ve SA I tipi sinir lifleri bulunur, ağırlıklı olarak basınç değişiklikleri ve 2–16 Hz arasındaki frekanslar için özelleşmiştir.

Anlaşılabileceği üzere dokunsal algılama karmaşık bir işlemdir ve tek bir uyarıda bile bütün almaçlar aynı anda ve farklı oranlarda görev alabilmektedir. Bu yüzden dokunsal bir arayüz tasarlarken göz önüne alınması gereken esas nokta frekans ve genlik gibi temel parametrelerle tanımlanan uyarıların kullanıcılar tarafından ne kadar iyi algılandığıdır. Yapılan kapsamlı insan deneyleri sonucunda parmak uçlarındaki derinin 0-800 Hz arasındaki titreşimleri algılayabildiği, ancak mutlak eşik değerinin en düşük olduğu frekans aralığının 250-300 Hz olduğu bulunmuştur [20]-[22]. Diğer bir deyişle 250-300 Hz aralığı parmak ucunun en hassas olduğu aralıktır (Şekil 2.2) [24].



Şekil 2.2: İnsan vücudunda bazı bölgelerde titreşim genliği-titreşim frekansı karakteristiği [24].

Yukarıdaki grafikten çıkartılabilecek diğer bir sonuç da titreşimsel bir uyarının mutlak eşik değerinin 0,1 µm dolaylarında olduğudur. Bu sonuç diğer çalışmalar tarafından da teyit edilmiştir [22], [25], [26].

2.2. Dokunumda Psikofizik

Psikofizik, fiziksel uyarılar ile bunların insanda oluşturduğu his ve algı arasındaki ilişkiyi inceleyen bilim dalıdır. Alman bilim adamı Gustav Theodor Fechner, psikofizik ismini ilk ortaya atan kişidir. Ayrıca hâlen kullanılan teknik ve teorilerin çoğunu 1860 yılında ilk kez formüle ettiği için bu bilimin kurucusu kabul edilir [27]. Psikofizik deneyler, her türlü insan-makine arayüzünün tasarımında olduğu gibi

dokunsal ekranları belirleyen özelliklerin tespiti için de elzemdir. Bu deneylerde dokunsal uyarılar, önceden belirlenmiş kurallara göre kontrollü olarak değiştirilir ve denekler tarafından nasıl algılandıkları incelenip raporlanmaya çalışılır.

Psikofizik deneylerin temelinde duyuşal eşik değeriinin tespiti vardır. Bu eşik değeri iki çeşittir: a) mutlak eşik ve b) ayrımsal eşik. Mutlak eşik, insan sinir sisteminde bir algının oluşması için gereken en düşük uyarı enerjisini ifade eder. Diğer bir deyişle, ancak-algılanabilir uyarı şiddetidir. Örneğin insan derisine tatbik edilen dokunsal bir uyarı için mutlak eşik değeri, uyarının uygulandığı yüzey alanına, derideki konumuna, uyarının süresine ve uyarının frekansına bağılıdır [18]. Ayrımsal eşik ise bir uyarının insanda ayırt edilebilir algısal fark oluşturabilmesi için referans uyarıya göre ne kadar değişmesi gerektiğini gösterir. İlk defa 1834 yılında Alman psikolog E. H. Weber tarafından tanımlanmıştır. Herhangi bir duyuşal uyarının şiddetine Φ denirse Weber oranı, algılanabilir şiddet farkının o uyarının şiddetine oranı olarak ifade edilir [28]:

$$c = \frac{\Delta\Phi}{\Phi} \quad (2.1)$$

Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde Weber oranının, insan derisine uygulanan titreşim işaretinin genliğinde ve frekansında %15-30 aralığında kümelendiği görülmüştür [25], [29]. Daha sonra bahsedilecek diğer parametreler de göz önüne alındığında, bu çalışma için Weber oranı %30 olarak kabul edilecektir.

Klasik psikofizik deney tasarımında mutlak ve ayrımsal eşik değerleri 3 yöntemle belirlenebilir:

- 1) Ayarlama yöntemi: Uyarıyı veya uyarılar arasındaki farkı, bir kontrol arayüzü ile denek bizzat ayarlar. Örneğin titreşimi algılamaya veya algılamamaya başladığı değerler hakkında kendisi karar verir. Şiddetlerin giderek arttığı veya azaldığı çoklu uyarı setlerinde bu değerler belirlenir ve daha sonra ortalamaları hesaplanır.
- 2) Limitler yöntemi: Bir uyarının şiddeti adım adım değiştirilir ve deneğin cevabı kaydedilir. Azalan uyarı şiddeti setinde son algılanan ve ilk algılanmayan uyarı şiddetinin ortalaması alınır. Artan şiddet setinde ise son algılanmayan ve ilk algılanan uyarı şiddetinin ortalaması alınarak geçiş değerleri bulunur. Bu setler

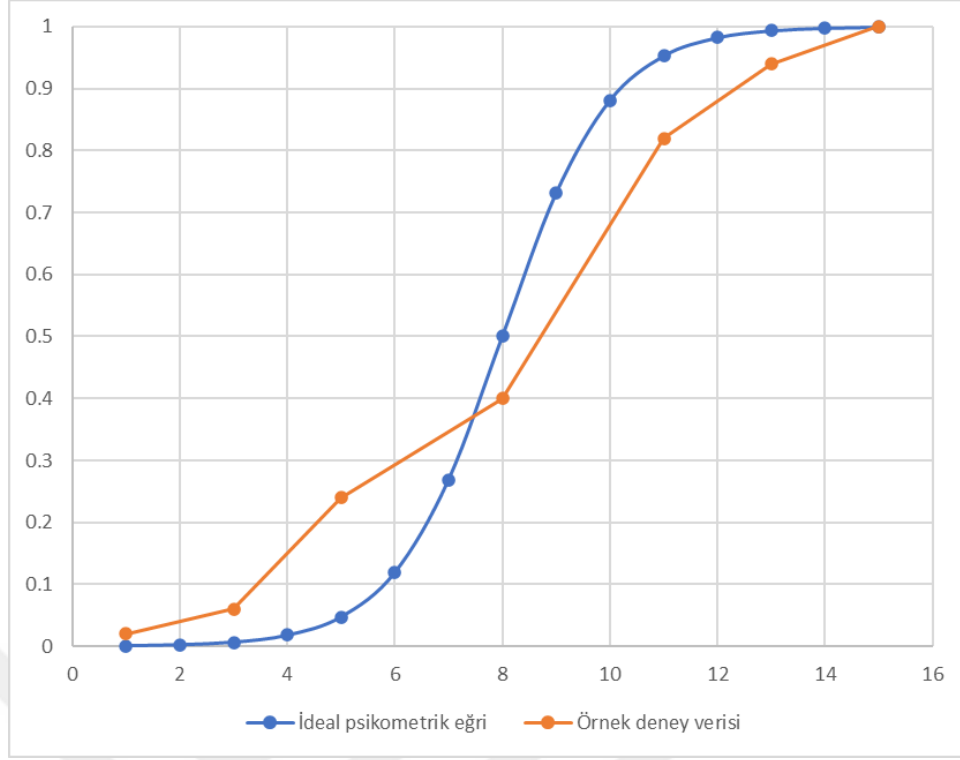
eşit sayıda ve birkaç kez tekrar edilir. Ortalama değerlerin ortalaması eşik değerini belirler.

- 3) Sabit uyartı yöntemi: Deneyci, eşik değeri olması kuvvetle muhtemel değerin (ayarlama yöntemiyle hızlıca tespit edilebilir) ortada kalacağı şekilde 5 ila 9 farklı değeri deneyden önce belirler. Denek, her biri eşit sayıda olacak şekilde rastgele bu kümedeki uyartılara maruz bırakılır ve her adımda uyartıyı algılayıp algılamadığını belirtir. Verilen yanıtlar deneyci tarafından bir tablo oluşturacak şekilde kaydedilir. Aşağıda sabit uyartı yöntemi için örnek bir yanıt tablosu verilmiştir (**Tablo 2.2**):

Tablo 2.2: Her uyartı şiddetinin 50 kez sunulduğu bir örnek.

Uyartı şiddetleri	1	2	3	4	5	6	7
Algılanan uyartı şiddetleri	1	3	12	20	41	47	50
Başarı oranı	%2	%6	%24	%40	%82	%94	%100

Bu 3 yöntemde deneklerin yanıtlarındaki başarı oranlarını kullanarak bir grafik elde edilir. Bu grafik sigmoid şeklinde olup psikometrik fonksiyon olarak adlandırılır. Aşağıdaki şekilde ideal psikometrik eğri ve tablodan alınan değerlerle çizilen eğri görülmektedir (**Şekil 2.3**). Açık ki, iyi tasarlanmış bir psikofizik deneyinde ne kadar çok uyartı seviyesi varsa ideal eğriye o kadar yaklaşılmış olur. Öte yandan zaman ve insan kaynağının fazla olmadığı durumlarda deneyin amacı dışında çok uzamasını engellemek adına uyartı çeşit sayısı sınırlanır. Bu yüzden genelde 9-11 uyartı seviyesi yeterli olmaktadır [30].



Şekil 2.3: İdeal ve örnek psikometrik eğriler.

Ancak zamanla klasik psikofizik yöntemlerin uygulanmasında bazı boşluklar fark edilmeye başlanmıştır. Örneğin, aynı uyarılara maruz kalmalarına rağmen bazı denekler karakterlerine veya deney esnasındaki duygu durumlarına göre yanlı ve önyargılı cevaplar verebilirler ve bu da deney sonuçlarına doğrudan etki ederek yanlış çıktılara sebep olur. Bunun önüne geçmek için 20. yy ortalarında çeşitli istatistiksel karar verme mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu mekanizmalar yardımıyla denneğin algılama süreci ile cevap verme süreci birbirinden ayrılmış olur. *Zorunlu seçim yöntemi* bunlardan biridir; deneyciye katılımcıların yanlı cevaplarını eleyerek nesnel ve bilimsel sonuçlar elde etme imkânı tanır [30]. Bu yöntemde katılımcıya aynı anda veya sırayla en az 2 farklı uyarı seviyesi sunulur. Bu seviyelerden bir tanesi asıl uyarı olup diğeri/diğerleri gürültü sinyalidir, yani deneyci tarafından sunulmayıp o an ortamda bir şekilde var olan ve giderilmesi mümkün olmayan uyarılardır. Denek hangi seçenekte uyarı olduğuna dair cevabını vermek zorundadır. Sonuç olarak her defada rastgele cevap vermiş olsa bile %50'lik başarı oranı elde edilir. Böylece katılımcıların cevap verme süreçlerinde karşılaşılması muhtemel belirsizlikler en aza indirilmiş olur ve uyarının algılanma performansı net olarak ortaya çıkar.

2.3. PVDF Eyleyicilerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi

Bilindiği üzere, geometrik yapının veya kullanılan malzemelerin karmaşık olduğu durumlarda mühendislik problemlerini çözmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Bu yöntemde yapı, fiziksel formüllerin kolayca çözülebileceği sonlu sayıda çok küçük elemanlara bölünür ve çözüm denklemleri büyük matrislerle ifade edilir. Büyük matrislerin çözümü, çeşitli sayısal yöntemlerle bilgisayarlar kullanılarak gerçekleştirilir. Eleman sayısı arttıkça gerçek probleme yakınsanmış olur.

Piezoelektrik malzemeler elektrik ve mekanik özelliklerini tanımlayan denklem takımlarıyla karakterize edilirler. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı gerinim-yük ilişkisini tanımlayan denklemlerdir. Direkt etkide piezoelektrik malzemeye uygulanan mekanik gerinimin sonucunda potansiyel fark üretilirken, indirekt etkide elektrik alana maruz bırakılan malzeme mekanik gerinim ve dolayısıyla titreşim üretir. Söz konusu denklemler aşağıda verilmiştir [31]:

Direkt etki (toplam elektriksel yer değiştirme):

$$D = d \cdot T + \varepsilon_T \cdot E \quad (2.2)$$

İndirekt etki (toplam mekanik gerinim):

$$S = s_E \cdot T + d' \cdot E \quad (2.3)$$

Bu denklemlerde; D [C/m^2], elektriksel akı yoğunluğu (elektriksel yer değiştirme); d [C/N], piezoelektrik yük sabiti; T [N/m^2], mekanik gerilme; ε_T [F/m], $T=0$ iken dielektrik geçirgenlik; E [V/m], elektrik alan; S [m/m], mekanik gerinim ve s_E [m^2/N], $E=0$ iken elastik uyumluluk sabiti olup T ve E alt indisleri de sırasıyla sabit mekanik gerilme ve sabit elektrik alan anlamına gelmektedir.

Piezoelektrik yük, elastik uyumluluk ve dielektrik sabiti matrisleri genel olarak, kristallerin özel simetrik yapıları veya haddelendirme süreçleri gibi farklı etkenlere bağlıdır [32]. Örneğin tez çalışmasında kullanılan saydam PVDF malzeme ortotropiktir ki bu yapılar 3 farklı koordinat ekseninde farklı mekanik ve elektriksel özellik sergileyebilirler.

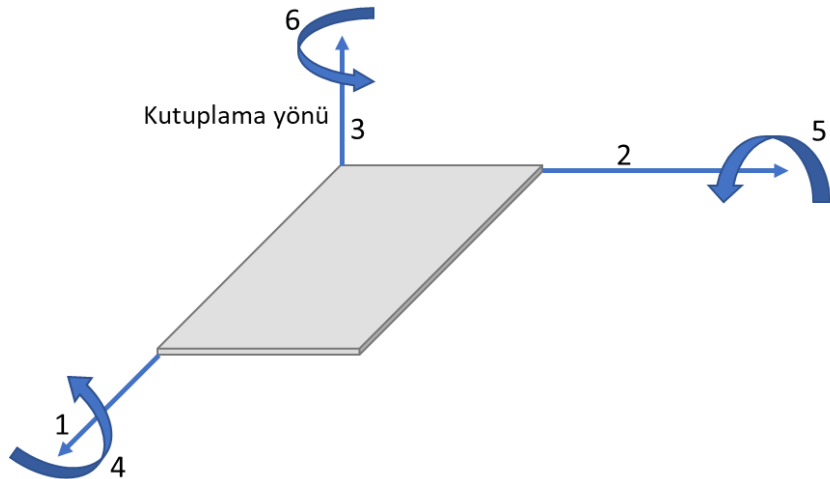
Temel piezoelektrik denklemlerin izotropik piezoelektrik malzemeler için geçerli olan ve matris formunda düzenlenmiş hali aşağıdaki gibidir [31], [33]:

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

Buradaki d_{ij} , i eksenini doğrultusundaki elektrik alanının j eksenini boyunca ürettiği gerinimi ifade etmektedir. PVDF gibi anizotropik piezoelektriklerde polarizasyon yönünde uygulanan elektrik alan 1 ve 2 doğrultularında farklı gerinim değerlerine sebep olur (**Şekil 2.4**). Ayrıca, kullanılan PVDF filmlerin kutuplanması 3 yönünde olduğundan d_{24} ve d_{15} ihmal edilir [34]-[36]. Böylece piezoelektrik yük sabiti matrisi şu hale indirgenmiş olur:

$$d_{PVDF} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$



Şekil 2.4: Piezoelektrik malzemelerde eksenlerin isimlendirmesi.

Elastik uyumluluk matrisindeki gerekli katsayılar, farklı deneysel çalışmalar yardımıyla tespit edilmiş olup kullanılan PVDF malzemesinin temel özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir [34], [37], [38]:

Tablo 2.3: SEY analizinde kullanılan temel değişkenler.

Parametre	Değer
Yoğunluk	1780 kg/m ³
Elastik modül (Young modülü)	2500 MPa
d ₃₁	~ 30 pC/N
d ₃₂	<5 pC/N
d ₃₃	~ -22 pC/N
Görelî dielektrik sabiti	$\epsilon_r = 13$

2.4. Literatür Araştırması

Daha önce de belirtildiği gibi son 20 yıldır özellikle dokunmalı çoklu ortam cihazlarının ekran yüzeylerinde gerçeğe yakın dokunsal geribildirim elde edebilmek ve bu anlamda özellikle dokunmalı telefonların eksikliklerini kapatmak için kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Klavye örneğinden yola çıkılacak olursa, dokunmalı telefonların klavyelerinde her tuşa basıldığında kullanıcıya görsel ve/veya işitsel geribildirim verilmektedir. Ancak bu geribildirimler, kullanıcının bir butona basmada başarılı olup olmadığı konusunda yeterli bilgiyi sağlamaz. Diğer bir deyişle kullanıcı, görsel butona basma eylemindeki başarısından emin olmak için sürekli ekrana bakmak zorunda kalır ve bu zorunluluk bilişsel yüke sebep olur. Tuşlu telefonlarda ise durum tam tersidir: mekanik bir arayüz söz konusu olduğu için dokunsal geribildirim doğrudan tuşların kendisinden gelmektedir.

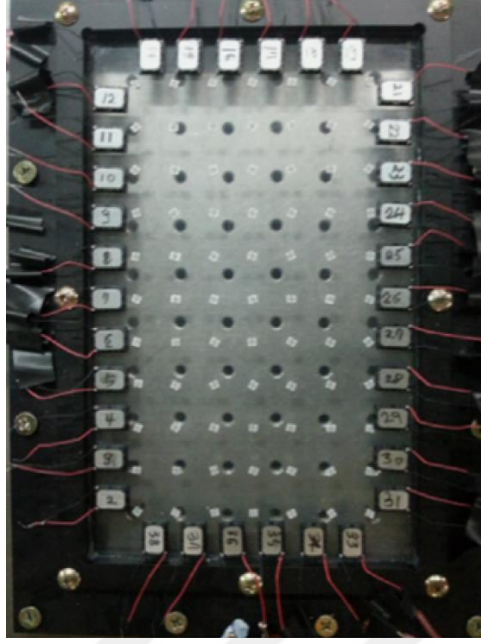
Dolayısıyla, dokunmalı telefonların bu dezavantajını gidermek ve kullanıcıyı cihazı kullanırken girdiği etkileşimler noktasında “rahat ve emin” hissettirmek için birtakım çalışmalar yapılmıştır [23], [40]. Bu çalışmalarda akıllı telefonların arkasına monte edilen özel yapıdaki titreşim motorları üzerinden kullanıcıya kontrollü dokunsal geribildirimler verilmiştir (Şekil 2.5). Örneğin klavyedeki tuşlara tam basıldığında 30 ms süren bir kısa titreşim işareti ve tuşlar üzerinde gezinme esnasında tuşları birbirinden ayıran sınırlardan geçerken 500 ms’lik daha uzun bir titreşim işareti gibi [41]. Daha sonra kullanıcıların dokunsal geribildirimli klavye, geribildirimsiz klavye

ve tuşlu klavyedeki performansları istatistiksel değerlendirmelerin yapıldığı psikofizik deneyleri ile ölçülmüştür.



Şekil 2.5: Akıllı telefonlarda kullanıcıların etkileşim performansını artırmak için kullanılan lineer rezonant eyleyiciler [39], [40].

Öte yandan sadece akıllı cep telefonları için değil, daha geniş dokunmalı yüzeyler için de elektromekanik geribildirim elde edildiği çalışmalar da mevcuttur. Bir tablet PC'nin arkasına monte edilmiş 2 ses bobini tipi eyleyicinin sırayla tahrik edilmesi ile dokunsal hareket etkisi oluşturulabilmektedir [42]. Bu etkinin bir benzeri sayılabilecek sahte dokunsal algının üretilebilmesine olanak sağlayan başka bir çalışma, bir dokunmalı telefona ve bir yüzüğe lineer rezonant eyleyiciler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve düzeneğin kullanıcı performansına katkısı incelenmiştir [43]. Woo ve Ih de bir tablet PC boyutlarındaki bir plakanın kenarlarına tutturulmuş çok sayıda bobinli eyleyicinin tahrik edilmesiyle üretilen farklı mod şekillerinin üst üste bindirilmesiyle ve titreşim dalgalarının kontrol edilmesiyle yerleştirilmiş dokunsal geribildirimler elde etmişlerdir [44] (Şekil 2.6). Seifert ve arkadaşları ise, kullanıcıların parmak pozisyonlarının ve hareketlerinin gömülü kızılötesi kameralarla takip edildiği bir dokunmalı akıllı masanın köşelerine 4 adet ses bobini yerleştirmiş ve kullanıcının bileğine de içinde bir titreşim motoru olan bir bileklik giydirmişlerdir [45]. Tasarladıkları 3 farklı uygulama ile dokunsal geribildirim deneklerin performanslarına etkisini incelemişlerdir. Çeşitli elektromekanik eyleyicilerin (titreşim motorları, ses bobinleri, lineer rezonant eyleyiciler, vb.) ekranlarda dokunsal geribildirimler üretmek için kullanılmalarına dair kılavuz bilgiler Choi ve Kuchenbecker tarafından özetlenmiştir [22].



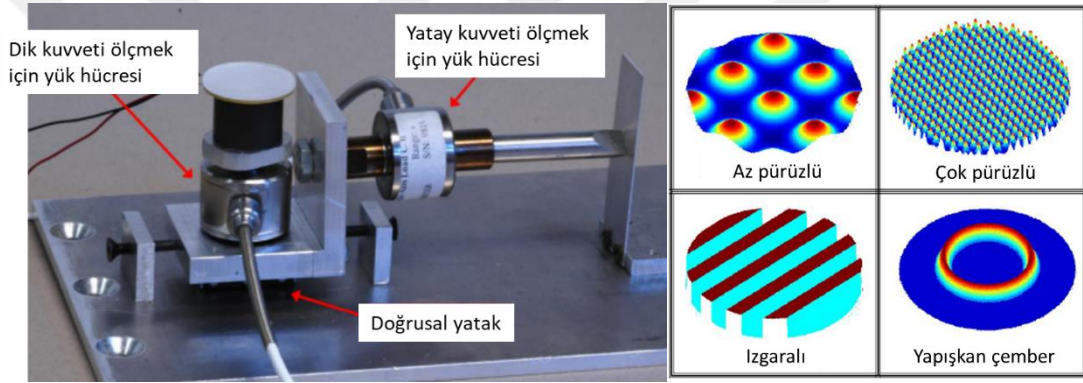
Şekil 2.6: Eyleyici dizisiyle oluşturulmuş dokunsal bir arayüz [44].

Yukarıda bahsedilen önemli çalışmaların varlığına rağmen, ekranlarda mekanik dokunsal geribildirim elde etmek için genelde tercih edilen yöntem piezoelektrik eyleyicilerin kullanımıdır. Bu konuda bilinen ilk çalışmalardan birinde, ince plakalar üzerinde titreşim elde etmek için piezoelektrik eyleyicileri kullanılmıştır [45]. Araştırmacılar, eyleyicilerin geometrik yapısının titreşim kiplerinin dağılımını doğrudan etkilediğini ve böylece bazı kiplerin güçlendirilmesine veya baskılanmasına olanak sağladığını tespit etmişlerdir.

Sarı v.d. kapasitif dokunmalı ekranı 8 adet piezoelektrik eyleyici ile uyarmış ve yüzeyde oluşan titreşim haritasını deneysel olarak ölçmek suretiyle çıkarmıştır [47]. Ek olarak eyleyici uyarı gerilim seviyesinin, frekansının ve eyleyici pozisyonlarının bu harita üzerine etkilerini inlemişlerdir. Yine aynı araştırmacı grubu benzer çalışmayı bir sonlu elemanlar analizi programını (COMSOL Multiphysics) kullanarak gerçekleştirmişlerdir [48]. Bu çalışmada dokunmalı ekran için birkaç malzemenin kıyaslanması yapılmıştır. Ancak iki çalışma arasında deneysel ve analitik sonuçlar karşılaştırılmamıştır.

Ayrıca günlük hayatta kullanılan çeşitli butonlarla etkileşime girildiğinde algılanan dokunsal geribildirimi dokunmalı ekranlar üzerinde sanal olarak oluşturmaya yönelik bir çalışma [49] ve yine günlük hayatta karşılaşılan yüzey özelliklerinden olan kayganlık/yapışkanlık algısını dokunmalı ekranlar üzerinde sanal olarak oluşturan bir çalışma da mevcuttur [50].

Piezoelektrik eyleyiciler kullanarak sürtünme katsayısını değiştirmek suretiyle dokunsal geribildirim oluşturmaya yönelik ilk çalışmalardan biri ise, yazarların T-PaD ismini verdiği dokunsal arayüzdür [51]. T-PaD arayüzü 25 mm çapında ince bir cam katmandan ve bu katmanın altına yapıştırılmış aynı çap uzunluğuna sahip bir piezoelektrik eyleyiciden oluşmaktadır (Şekil 2.7). Çalışma ilkesi, biri cam yüzey diğeri kullanıcının parmağı olan iki yüzey arasında sıkışmış olan hava katmanının hava yastığı gibi davranmaya başlamasına ve buradaki sürtünme katsayısının küçülmesine dayanır. Ayrıca uyarı frekansı değiştikçe, bütünsel yapının mekanik özelliklerine bağlı olarak yüzeyde farklı titreşim biçimleri elde etmek de mümkündür. Böylece sürtünme katsayısının ve titreşim biçimlerinin kontrol edilebildiği ve dolayısıyla çeşitli dokunsal geribildirimlerin elde edilebildiği bir arayüz tasarlanmış olur.



Şekil 2.7: T-PaD düzeneği ve farklı uyarı frekanslarında arayüzde oluşan titreşim desenleri [51].

Aynı araştırma grubu, yukarıdaki çalışmadan elde ettikleri deneyimi kullanarak Amazon firmasının bir tablet bilgisayarı olan Kindle Fire ürününü modifiye etmişler ve dokunsal geribildirimli bir prototip ortaya koymuşlardır [52]. Bu prototip bir piezoelektrik eyleyici dizisinden, T-PaD yüzeyinden, bir kontrol devresinden ve bir güç kaynağından oluşmaktadır. Bu çalışmada tuşa basma efektlerinin dokunsal geribildirim olarak verilebildiği gösterilmiştir.

Giraud v.d. ise piezoelektrik eyleyicileri, saydam cam plakalar üzerinde titreşim oluşturmak için ve hava yastığı etkisiyle sürtünme katsayısını değiştirmek için kullanmışlardır (Şekil 2.8). Bu anlamda, çalışmaları T-PaD Fire araştırmasıyla paralellikler taşımaktadır [53]. Ayrıca diğer bir çalışmalarında daha yüksek frekanslarda (66 ve 225 kHz) çalışılırsa sürtünme katsayısını değiştirmek için daha düşük genlikli titreşim üretmenin yeterli olacağını bulmuşlardır [54].

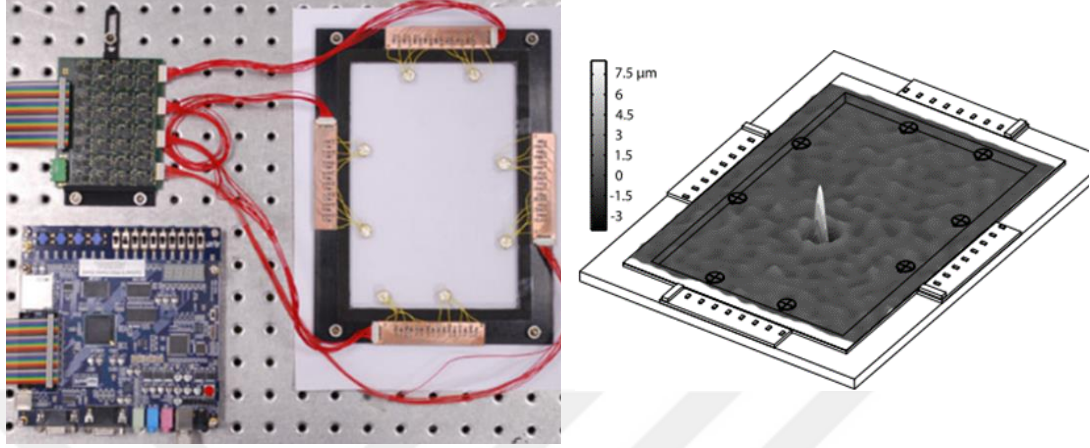


Şekil 2.8: Piezoelektrik eyleyiciler ile oluşturulmuş dokunsal bir ekran düzeneği [53].

Ekranlarda gerçeğe yakın dokunsal geribildirim elde ederken ihmal edilmemesi gereken en önemli özelliklerden biri ise üretilen etkilerin bölgeselleştirilmiş olması gerektiğidir. Çünkü şu anda günlük hayatta kullandığımız dokunmalı ekranların çoğu çok dokunuşludur (2 veya daha fazla parmağın aynı anda yüzeye dokunması algılanabilir) ve dolayısıyla bilim adamları, etkileşimdeki her parmağa farklı dokunsal geribildirim verebilmeyi hedeflemişlerdir. Ancak mekanik yöntemde eyleyiciler üzerinden ekrana aktarılan titreşimin doğası gereği katı ortam içinde yayılması ve bu yayılımın izole edilememesi hedefe ulaşmayı zorlaştırmaktadır.

Piezoelektrik eyleyiciler kullanarak ekranlarda bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim elde etmenin basit ama etkili bir yöntemini Hudin [55] ve Dhiab [56] önermişlerdir. Akustik ve optik biliminde de kullanılan bu zaman çevrimi tekniği, yüzey kenarlarına yapıştırılan piezoelektrik eyleyiciler yardımıyla üretilen titreşimin aynı yüzeydeki belli noktalarda ölçülmesi ve ölçülen cevabın zaman tanım bölgesinde ters çevrildikten sonra örneklenerek yeni bir gerilim işaretinin üretilmesi yöntemine dayanır (**Şekil 2.9**). Bu işlem yüzeydeki birçok nokta için yapılır ve her nokta için gereken işaret tespit edilir. Kullanıcının parmağı yüzeyde hareket ederken karakteristiği bilinen noktaların üzerine geldiğinde eyleyiciler kaydedilmiş olan gerilim işaretleri ile uyarılırsa söz konusu noktalarda görece daha yüksek titreşim genlikli tepciler oluşturulmuş olur. Fakat bu yöntemin bazı dezavantajları vardır. Bunların en büyükleri büyüyen ekran boyutlarına da bağlı olarak önceden ölçüm alınması gereken nokta sayısının çok artması ki, -bu sayı bir tablet bilgisayar ekranı

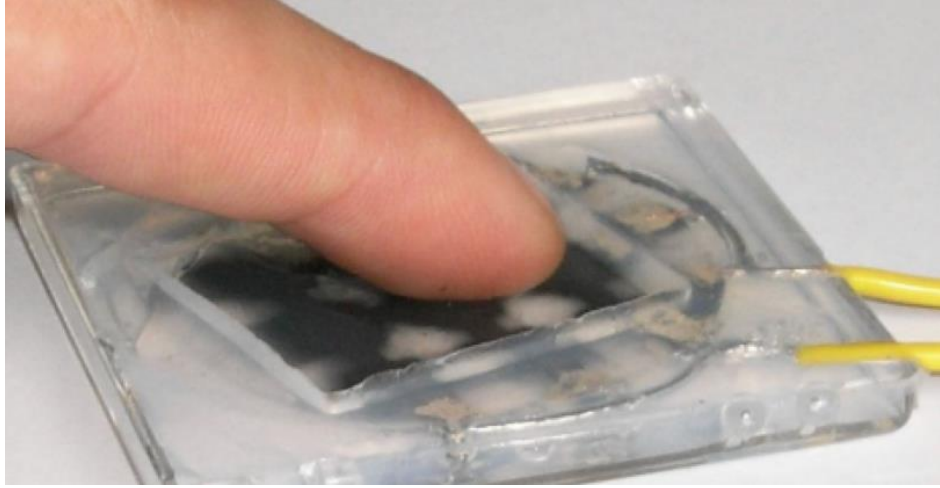
boyutları için birkaç bini geçebilir- ve odaklanan noktanın yakın çevresinde görece küçük olsa bile azımsanmayacak büyüklükte genliğe sahip titreşimler oluşmasına yol açmasıdır.



Şekil 2.9: Piezoelektrik eyleyiciler ile oluşturulmuş bir dokunsal ekran ve elden edilen bölgesel geribildirim [55].

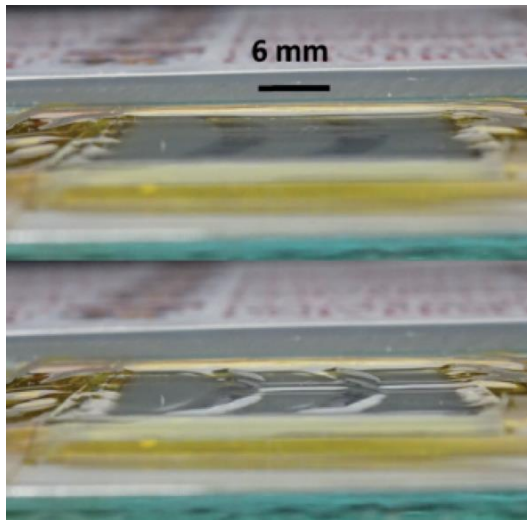
Enferad v.d. bu dezavantajları ortadan kaldırabilecek bir yöntem önermişlerdir [57]: düz bir bant üzerinde konumlandırılan piezoelektrik eyleyicilerle yüzey üzerinde oluşturulacak titreşim kipi biçimleri girişime sokularak kullanıcı parmağının hareket ettiği şerit boyunca bölgesel tepecikler oluşturabilmektedirler.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim elde etmenin en etkili yöntemlerinden biri saydam eyleyicilerin kullanılmasıdır. Literatürde bu konu hakkında birtakım çalışmalar bulunmaktadır. Matysek v.d. 3x3'lük dizilişe sahip çok katmanlı dielektrik elastomer eyleyiciler üretmişlerdir [58] (Şekil 2.10). Başka bir çalışmada Stubning v.d. PVDF temelli elektroaktif polimer tipi yığın eyleyicilerin üretimi için bir tasarım yöntemi tanıtmışlardır [59]. Ancak bu iki çalışmada da ekran arayüzlerinden bahsedilmemiştir ve çok katmanlı yapıdan dolayı görünür ışık geçirgenliği yetersizdir.

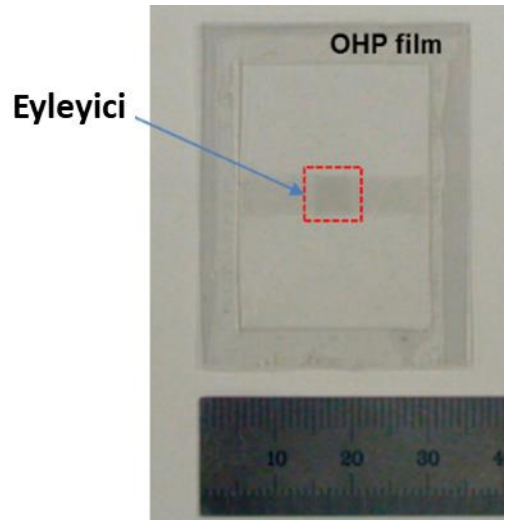


Şekil 2.10: Çok katmanlı dielektrik elastomer eyleyici [58].

Ankit v.d. ekranlarda bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirimde kullanılmak üzere dielektrik elastomer eyleyiciler ise isterlere göre tasarlanmaktadır ve sadece önceden tanımlı etkiler üretme yetisine sahiptir (**Şekil 2.11a**) [60]. Kim v.d. dokunsal ekranlar için saydam ve esneyebilen grafen temelli bir eyleyiciyi tanıtmışlardır fakat insanların kullanabileceği bir arayüze uygulamamışlar ve psikofiziksel olarak karakterize etmemişlerdir (**Şekil 2.11b**) [61]. Choi v.d. bu tez çalışmasında olduğu gibi PVDF eyleyiciler kullanmış ama bölgeselleştirme üzerinde durmamış ve yine arayüzü karakterize etmemişlerdir [62].



a) [60]



b) [61]

Şekil 2.11: Dielektrik ve grafen temelli eyleyiciler.

Özetle, bilindiği kadarıyla saydam eyleyicilerle dokunsal arayüz tasarımı konusunda bir önceki paragrafta bahsedilen birkaç örnek haricinde kayda değer bir çalışma

bulunmamaktadır. Bu çalışmalarda ise bazı açıklar tespit edilmiştir. Sonuç olarak tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen ITO kaplı saydam PVDF tipi piezoelektrik eyleyicili dokunsal ekranın, geliştirilen arayüzün psikofizik olarak karakterizasyonu ve dokunsal geribildirimlerin bölgeselleştirilerek yeni efektlerin üretilmesi noktalarında literatürdeki önemli bir boşluğu doldurması amaçlanmaktadır.

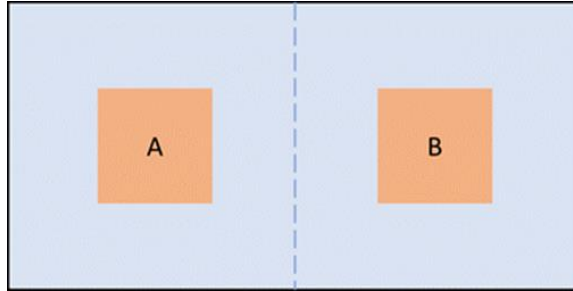


3. YÖNTEM

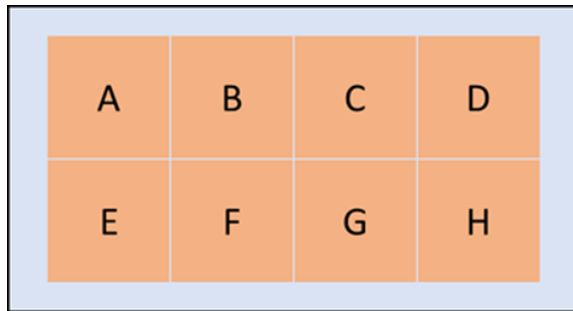
Saydam PVDF eyleyicilerin ekranlarda dokunsal geribildirim üretmek için kullanılabileceğini göstermek amacıyla iki farklı insan-makine arayüzü tasarlanmış ve hazırlanmıştır. Bu arayüz düzenekleri, saydam PVC plakalardan ve farklı sayıda saydam PVDF eyleyicilerden oluşmaktadır. Birinci dizilimde iki eyleyici kullanılmış ve insan psikofiziği ile ilgili olan gerekli parametreleri belirlemek amacıyla modal analiz sonuçları da göz önüne alınarak insan deneyleri yapılmıştır. Daha sonra bu kısımda elde edilen sonuçlar, ikinci dizilimde deneklerin bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirimi algılama ve konumlandırma performanslarını değerlendirmek için kullanılmıştır.

3.1. Donanım

Kullanılan saydam PVDF filmlerin (PolyK Technologies, LLC) kalınlığı 50 μm 'dir ve optik geçirgenliği 300-1000 nm dalga boyuna sahip ışık (gün ışığı) altında %90'dan büyüktür [63]. Birinci dizilimde plakanın sol ve sağ ortasına birer adet, ikinci dizilimde ise 2x4'lük matris düzeninde 8 adet PVDF eyleyici kullanılmıştır (Şekil 3.1 ve 3.2). İki dizilim geometrisi de yüzeyin orta noktasına göre simetriktr.



Şekil 3.1: Birinci konfigürasyonda eyleyicilerin dizilimi.



Şekil 3.2: İkinci konfigürasyonda eyleyicilerin dizilimi.

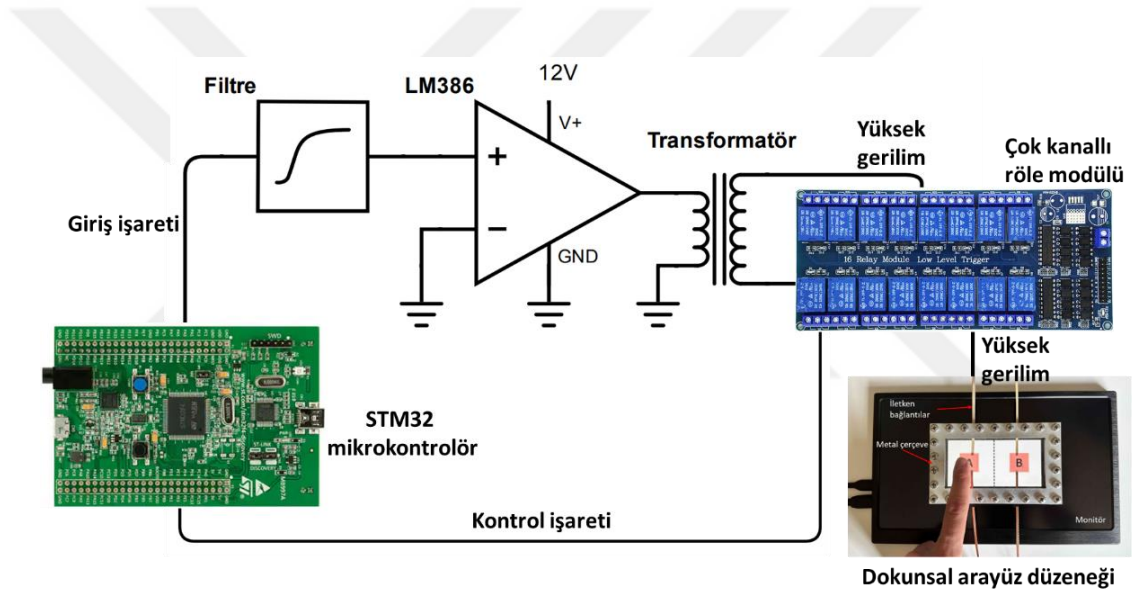
Filmlerin iki yüzeyi de elektrot olarak ITO kaplama ile kaplıdır. ITO (indiyum kalay oksit) başta dokunmalı ekranlar olmak üzere saydamlık ve elektriksel iletkenlik gerektiren uygulamaların çoğunda kullanılmaktadır. Kaplamaların yüzey direnci $200 \Omega/\square$ (ohm/kare) olduğundan kaplama kalınlığı yaklaşık 5 nm kabul edilebilir (ITO öz direnci $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ alınmıştır). PVDF filminden 20x20 mm'lik kare şeklinde parçalar kesilmiş ve bu parçalar yine saydam bir PVC plastik plakanın (100x50x0.6 mm) altına ince ve saydam bir epoksi yapıştırıcı ile pozitif elektrot yüzeyinin tamamı boyunca yapıştırılmıştır. Yani eyleyiciler plakaya 400 mm²'lik pozitif elektrot yüzeyleri ile sabitlenmiştir. Böylece eyleyicide oluşan gerininin sabitlendikleri plakaya deplasman hareketi olarak aktarılması sağlanmıştır.

Plastik plakalar, ankastre sınır koşullarını sağlamak amacıyla birbirine vidalanmış iki metal çerçeve ile dört kenarı boyunca sabitlenmiştir (**Şekil 3.3**). Yani sınır koşulu olarak plakanın deplasman hareketi dört kenar boyunca sıfırdır.



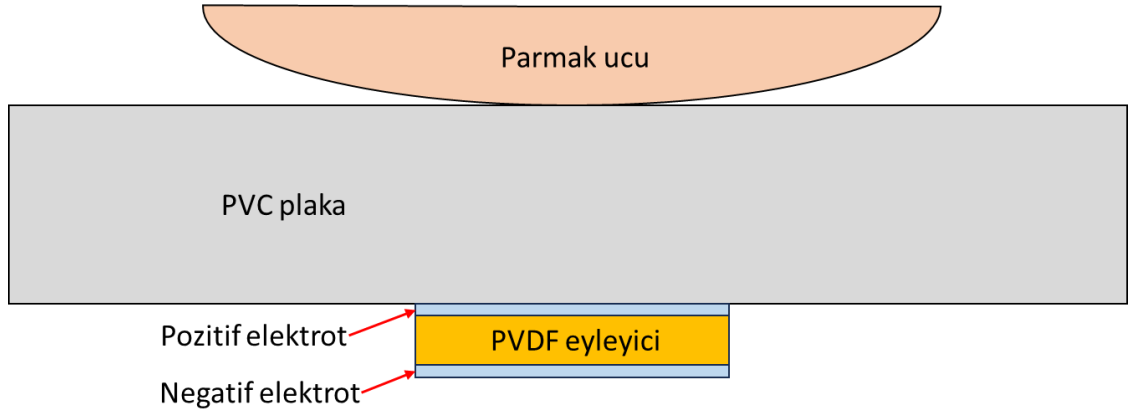
Şekil 3.3: Tasarlanan saydam dokunsal plaka.

ITO elektrotları uyarmak için kullanılan iletken bağlantılar (Marka/model: 3M 1245) iletken yapıştırıcıya sahiptir. Yapıştırıcının zamanla işlevini kaybetmesinin önüne geçmek amacıyla elektrot ile olan bağlantı noktasında epoksi gümüş yapıştırıcı da (Marka/model: Arctic Silver) kullanılmıştır. Eyleyicileri sürmek için gereken analog işaretler bir mikrokontrolör (STM32F407G) ile oluşturulmuştur. Mikrokontrolörde en fazla 3 V_{pp} genliğinde tek kutuplu olarak üretilebilen işaretler yüksek geçirgen bir filtre ile DC bileşenlerinden arındırılmış ve ayarlanabilir kazançlı bir yükseltici ile yükseltilmiştir. Böylece yükselticinin çıkışında saf sinüs dalgası formunda yüksek gerilim işaretleri (en fazla 250 V_{pp}) elde edilmiştir. Son olarak çıkış geriliminin istenen sıra ve düzende farklı eyleyicilere yönlendirilmesi için çok kanallı bir röle modülü kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Düzeneği kontrol etmek için kurulan devre şeması.

Öte yandan düzenekte 250 V_{pp} gerilim seviyeleri söz konusu olduğundan dokunsal arayüzün insan kullanımı için uygun olup olmadığı tespit edilmelidir. Bu amaçla yaklaşık elektriksel delinme gerilimi hesabı yapılmıştır; çünkü PVDF eyleyiciler, pozitif elektrotları plastik plakanın altına denk gelecek şekilde yapıştırılmışlardır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Eyleyici filmlerin plakaya yapıştırılması.

PVC plastiğin dielektrik dayanımı 25 kV/mm alınırsa [64]:

$$\text{Delinme gerilimi} = \text{dielektrik dayanım} * \text{kalınlık} = 25 \text{ kV/mm} * 0.6 \text{ mm} = 15 \text{ kV}$$

Eyleyicinin pozitif elektrodu ile plastik plaka arasında epoksi yapıştırıcının da olduğu göz önüne alındığında gelinme geriliminin 15 kV'tan büyük olduğu rahatlıkla kabul edilebilir. Eyleyiciye uygulanan gerilimler en fazla 250 V_{pp} olduğundan dokunsal arayüz düzeneği insanların kullanımı için güvenlidir.

Bunlara ek olarak dokunsal arayüz düzeneğinin güç tüketimi de önem arz etmektedir. Sistemin çektiği akımı ölçebilmek için ikinci konfigürasyon kullanılmış ve devreye çözünürlüğü 1 mA olan bir ampermetre bağlanmıştır. Sekiz eyleyicinin tamamına 230 Hz'lik 70 V_{rms} genliğinde gerilim uygulanmış olmasına rağmen ampermetre tutarlı bir şekilde sürekli 0 mA ölçmüştür. Şayet 0,5 mA çekilseydi, cihaz bu değeri 1 mA olarak gösterebilirdi. Buradan çıkartılabilecek sonuca göre, her bir eyleyicinin çektiği akım 0,063 mA'den küçük olmalıdır. Demek ki her eyleyici için güç tüketimi 4,4 mW'tan küçüktür. Yapılan bu kestirim 50 µm kalınlığındaki ve 62x13 mm ölçülerindeki bir PVDF eyleyiciye 15 MV/m (f = 0,1 Hz) büyüklüğünde bir elektrik alanının uygulanmasından bahseden çalışmadaki sonuçla da örtüşmektedir [65]. O araştırmacılar maksimum 2,5 µA genliğinde bir çekilen akım ölçmüşlerdir. Bu da 1,88mW'lık bir güç tüketimi anlamına gelmektedir.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal Titreşim Analizi

3.2.1. Genel Bilgi

Eyleyicilerin piezoelektrik davranışları daha önce iki temel denklem ile formüle edilmişti.

Direkt etki (toplam elektriksel yer değiştirme):

$$D = d \cdot T + \varepsilon_T \cdot E \quad (3.1)$$

İndirekt etki (toplam mekanik gerinim):

$$S = s_E \cdot T + d' \cdot E \quad (3.2)$$

Piezoelektrik malzemenin bir cisme sabitlenmiş olduğu yapıda, eyleyicilerin uyarılmasıyla üretilen gerinim cisme aktarılır. Dolayısıyla sistemin gerilim işareti girişine mekanik bir cevabı söz konusudur. Bu ilişki sonlu eleman denklemleri ile şöyle ifade edilebilir [32], [66]:

$$m_{uu} \cdot \ddot{u} + k_{uu} \cdot u + k_{u\Phi} \cdot \Phi = F \quad (3.3)$$

$$k_{\Phi u} \cdot u + k_{\Phi\Phi} \cdot \Phi = Q \quad (3.4)$$

Burada m_{uu} cismin kütlesi, u yer değiştirme vektörü, Φ elektrik alan vektörü, F cisme uygulanan kuvvet, k_{uu} katılık matrisi, $k_{\Phi\Phi}$ dielektrik matrisi, $k_{u\Phi}$ piezoelektrik eşleşme matrisi ve Q da uygulanan toplam elektriksel yüküdür. Sisteme dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmadığı için $F=0$ 'dır. Birinci denklemdeki Φ yalnız bırakıldığında;

$$\Phi = -k_{u\Phi}^{-1} \cdot (m_{uu} \cdot \ddot{u} + k_{uu} \cdot u) \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu elektrik alan vektörü ikinci denklemde yerine koyulduğunda;

$$k_{\Phi u} \cdot u - k_{\Phi\Phi} \cdot k_{u\Phi}^{-1} \cdot (m_{uu} \cdot \ddot{u} + k_{uu} \cdot u) = Q \quad (3.6)$$

Bu ifade düzenlendiğinde;

$$m_{uu} \cdot \ddot{u} + [k_{uu} - k_{\phi u} \cdot k_{u\phi} \cdot k_{\phi\phi}^{-1}]u + [k_{u\phi} \cdot k_{\phi\phi}^{-1}] \cdot Q = 0 \quad (3.7)$$

denkleminde ulaşılır. Bu denklem, PVDF eyleyiciye uygulanan elektriksel yük ile eyleyicinin bağlı olduğu PVC plakanın yer değiştirme hareketi arasındaki ilişkiyi tarif eder. Açıktır ki, uygulanan elektriksel yük veya diğer bir deyişle uyarma gerilimi sinüzoidal ise plakanın yer değiştirme hareketi de benzer dalga şeklinde (sinüzoidal olarak) gerçekleşecektir.

3.2.2. Sonlu Elemanlar Programı ile Serbest Titreşim ve Modal Analiz

Modal analiz, fiziksel bir yapının doğal frekanslarını ve mod şekillerini serbest titreşimde inceleyen bir analiz yöntemidir. Yapıların dinamik davranışını anlamak, onları titreşimsel olarak karakterize etmek ve tasarımları optimize etmek için gereklidir. Özellikle titreşime maruz bırakılan dokunsal arayüzlerde, yapının davranışı modal analiz yöntemine başvurmadan öngörülemez. Bu yöntemde yapılar kütle-yay-sönüm elemanı modeline indirgenerek basitleştirilir ve yapıların davranışları diferansiyel denklemlerle ifade edilir [67]. Sönümlü serbest titreşimde tek serbestlik dereceli yer değiştirme denklemi aşağıdaki gibidir:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3.8)$$

Burada m kütleyi, u yer değiştirmeyi, c sönüm katsayısını ve k da katılık katsayısını gösterir. Serbest titreşim söz konusu olduğu için yapıya etki eden kuvvet 0'dır. Eğer sönüm katsayısı belli bir değerden küçükse sistem az sönümlüdür. Yani belli bir süre geçtikten sonra titreşim hareketi duracaktır. Az sönümlü serbest titreşimlerde yukarıdaki denklemin çözümü aşağıdaki gibidir:

$$u(t) = U \cdot e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n \cdot t), \quad u(0) = U \quad (3.9)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.10)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n \quad (3.11)$$

Bu denklemlerde ζ sönüm oranı olarak tanımlanır. f_n ise doğal frekans veya rezonans frekansıdır.

Temel serbest titreşim prensibine göre, şekli ve malzemesi farklı her yapının kendine has doğal frekansları vardır. Yukarıdaki tek serbestlik dereceli yer değiştirme denklemi, sönümün ihmal edildiği ve yine serbest titreşimdeki çok serbestlik dereceli bir modele ait denklem sistemine evrilirse şu yazılabilir:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (3.12)$$

$\{x\} = \{X\}e^{i\omega t}$ ifadesi yerine koyulursa çözüm kümesi elde edilir:

$$[-\omega^2[M] + [K]]\{X\}e^{i\omega t} = 0 \quad (3.13)$$

$$[-\omega^2[M] + [K]]\{X\} = 0 \quad (3.14)$$

$$[-\omega^2[M][M]^{-1} + [K][M]^{-1}]\{X\} = 0 \quad (3.15)$$

$[A] = [M]^{-1}[K]$ ve $\lambda = \omega^2$ olarak yazılırsa,

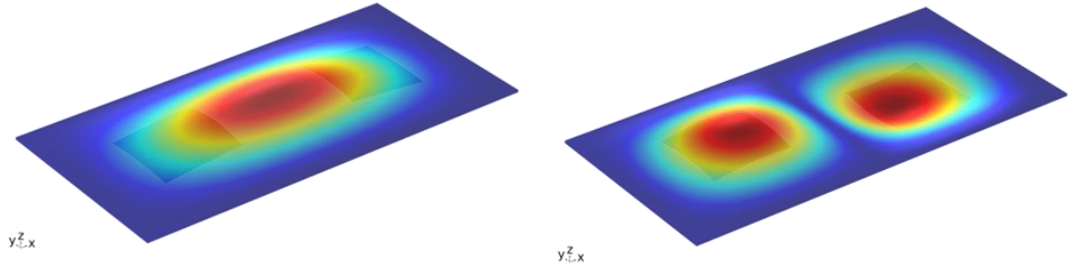
$$[[A] - \lambda[I]]\{X\} = 0 \quad (3.16)$$

Bu denklemde λ , N elemanlı özdeğerler vektörüdür ve N değeri yapının serbestlik derecesini belirtir. Özdeğerler vektörü denklem 3.12'de yerine konursa N özvektöründen oluşan $[X]$ özvektör matrisi elde edilmiş olur:

$$[X] = [\{x_1\}\{x_2\} \dots \{x_N\}] \quad (3.17)$$

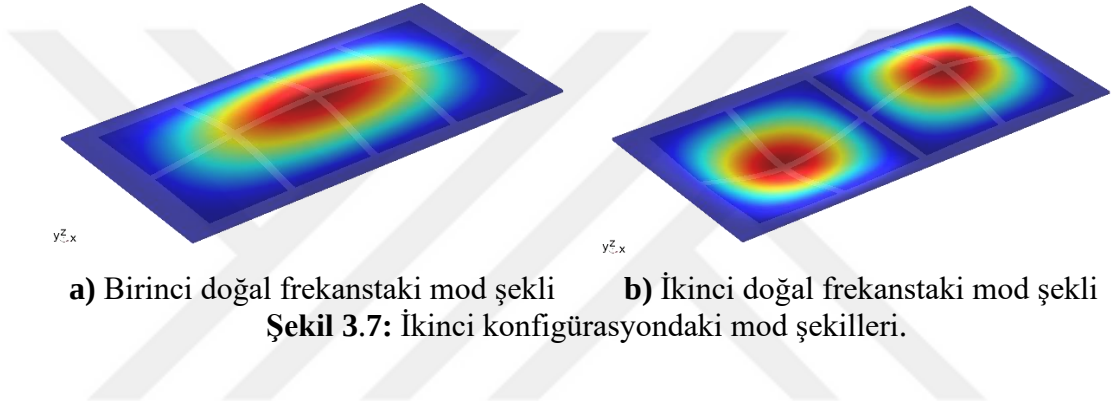
Özvektörler, o doğal frekans değerindeki mod şekli hakkında fikir verir. Ancak mutlak hareket değerini ifade etmez, bilakis sadece hareket yönünü verir ve hareket miktarını da oransal olarak belirtir. Her doğal frekansta frekansın derecesine göre farklı mod şekilleri ortaya çıkar. Örneğin plakalarda birinci doğal frekansta 1 tepe, ikinci doğal frekansta birbirine zıt yönde 2 tepe oluşur. Doğal frekanslar yapıların malzeme ve geometrik özelliklerinin yanında sınır koşullarına da bağlıdır. Tez çalışmasında kullanılan iki farklı konfigürasyon için bu özellikler tanımlanarak bir sonlu elemanlar programı olan COMSOL Multiphysics ile serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen ilk 2 doğal frekans ve bu değerlere karşılık gelen mod şekilleri aşağıda verilmiştir (**Şekil 3.6 ve Şekil 3.7**). Görüldüğü gibi 8 eyleyicili

konfigürasyonda toplam kütle arttığı için doğal frekans değerleri az da olsa büyümüştür.



a) Birinci doğal frekanstaki mod şekli b) İkinci doğal frekanstaki mod şekli

Şekil 3.6: Birinci konfigürasyondaki mod şekilleri.



a) Birinci doğal frekanstaki mod şekli b) İkinci doğal frekanstaki mod şekli

Şekil 3.7: İkinci konfigürasyondaki mod şekilleri.

Sonlu elemanlar programında serbest titreşim analizinde 2 farklı konfigürasyon için elde edilen ilk 6 doğal frekans aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1: Dokunsal arayüzün ilk 6 doğal frekansı.

Doğal frekanslar	f_{n1}	f_{n2}	f_{n3}	f_{n4}	f_{n5}	f_{n6}
Birinci konfigürasyon	451,2	584,2	824,4	1165,5	1179,6	1311,4
İkinci konfigürasyon	454,2	590,7	834,5	1186,5	1193,0	1325,5

3.2.3. Sonlu Elemanlar Programı ile Zorlanmış Titreşim Analizi

Yapıya herhangi bir fiziksel etki uygulanması durumuna zorlanmış titreşim denir. Bu fiziksel etki kuvvet, yük veya hız olabilir. Çalışma kapsamında zorlanmış titreşime sebep olan fiziksel etki, PVDF eyleyicilerde üretilen gerinim sonucu oluşan harmonik bir F kuvvetidir. O halde yukarıdaki hareket denklemine kuvvet ifadesi de eklenirse,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(2\pi ft) \quad (3.18)$$

elde edilir. Bu denklemin çözümü kararlı durumda şudur:

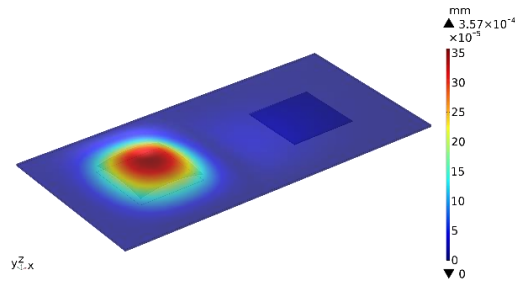
$$x(t) = X \sin(2\pi ft + \varphi), \quad x(0) = X \quad (3.19)$$

Görüldüğü gibi yapı F kuvvetiyle aynı frekansta, fakat φ faz farkıyla titreşim hareketi sergilemektedir. Sonuç olarak sisteme uygulanan doğal frekanstaki kuvvet yine aynı frekansta titreşime sebep olmakta ve buna bağlı olarak belirli mod şekilleri ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı kontrollü ve bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim elde etmek olduğundan mod şekillerinden kaçınmak gerekir. Dolayısıyla zorlanmış titreşim durumunda seçilecek çalışma frekanslarının doğal frekans değerlerinin civarında olmamasına dikkat edilmelidir.

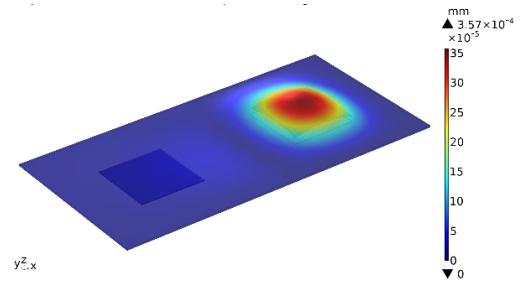
Daha önce de bahsedildiği üzere insanın parmak ucunun dokunsal işaretleri algılama frekansı 0-800 Hz arasında olup 250-300 Hz aralığı en hassas olduğu bölgedir. Birinci doğal frekansın 450 Hz dolaylarında olduğu göz önüne alındığında dokunsal geribildirimli ekran tasarımının doğrulanması için gerçekleştirilecek olan psikofizik insan deneylerindeki işaretlerin frekans kümesi şu şekilde seçilmiştir: $f = \{137 \text{ Hz}, 178 \text{ Hz}, 230 \text{ Hz}, 300 \text{ Hz}, 390 \text{ Hz}\}$. İşaretler arasındaki fark belirlenirken Weber oranı %30 olarak kabul edilmiştir. Ayrıca psikofizik deneyde sabit uyarı yönteminden faydalanılacağından 5 farklı frekans değerinin seçilmesi uygun görülmüştür.

Birinci Konfigürasyon

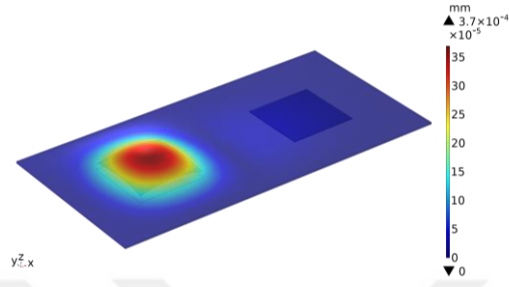
Plakanın altında 2 adet PVDF eyleyicinin yer aldığı birinci konfigürasyonda iki eyleyici de sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak 5 farklı frekans değerinde $v = 50 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ gerilim işaretiyle sırasıyla uyarılmıştır. Elde edilen yer değiştirme desenleri aşağıdaki şekilde verilmiştir (**Şekil 3.8**). Sistemin simetrik yapısından dolayı aynı frekans değerinde eşit yükseklikte tepeler oluşmuştur. Görüldüğü gibi 5 frekans değerinde de bölgesel titreşim haritaları ortaya çıkmıştır. 390 Hz’te oluşan desenin, birinci doğal frekans olan 451 Hz’e göreli yakın olduğundan plakanın orta noktasına doğru yayılmaya başladığı görülmektedir. Açıktır ki, doğal frekans değerine ulaştığında modal analiz sonuçlarında olduğu gibi plakanın ortasında bir tepe oluşacaktır.



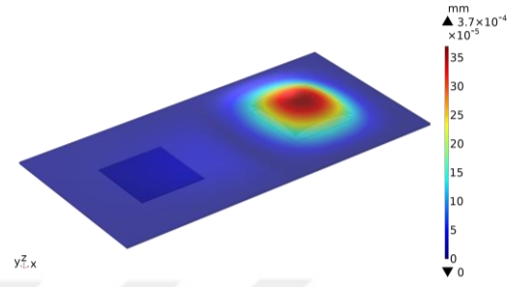
a) 137 Hz'te eyleyici-A



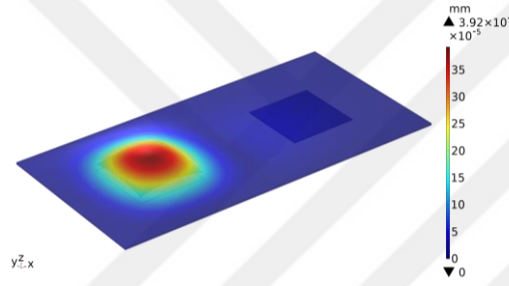
b) 137 Hz'te eyleyici-B



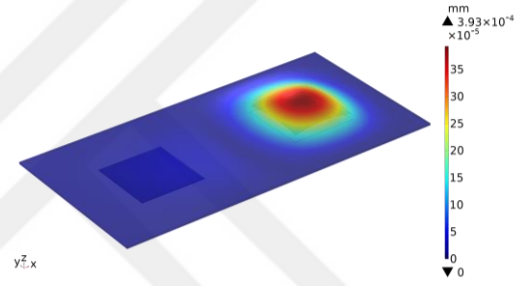
c) 178 Hz'te eyleyici-A



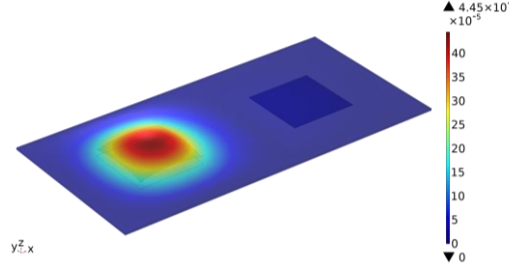
ç) 178 Hz'te eyleyici-B



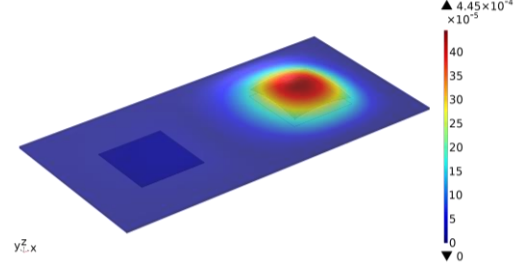
d) 230 Hz'te eyleyici-A



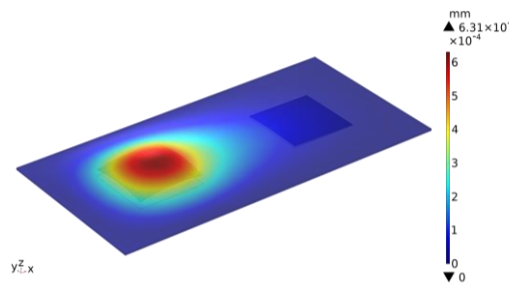
e) 230 Hz'te eyleyici-B



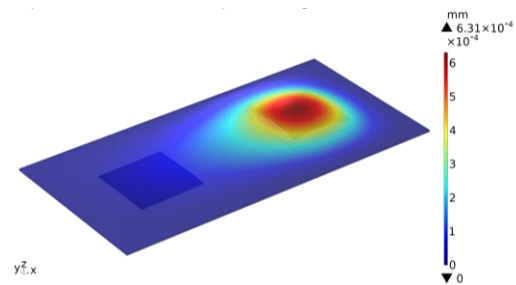
f) 300 Hz'te eyleyici-A



g) 300 Hz'te eyleyici-B



ğ) 390 Hz'te eyleyici-A

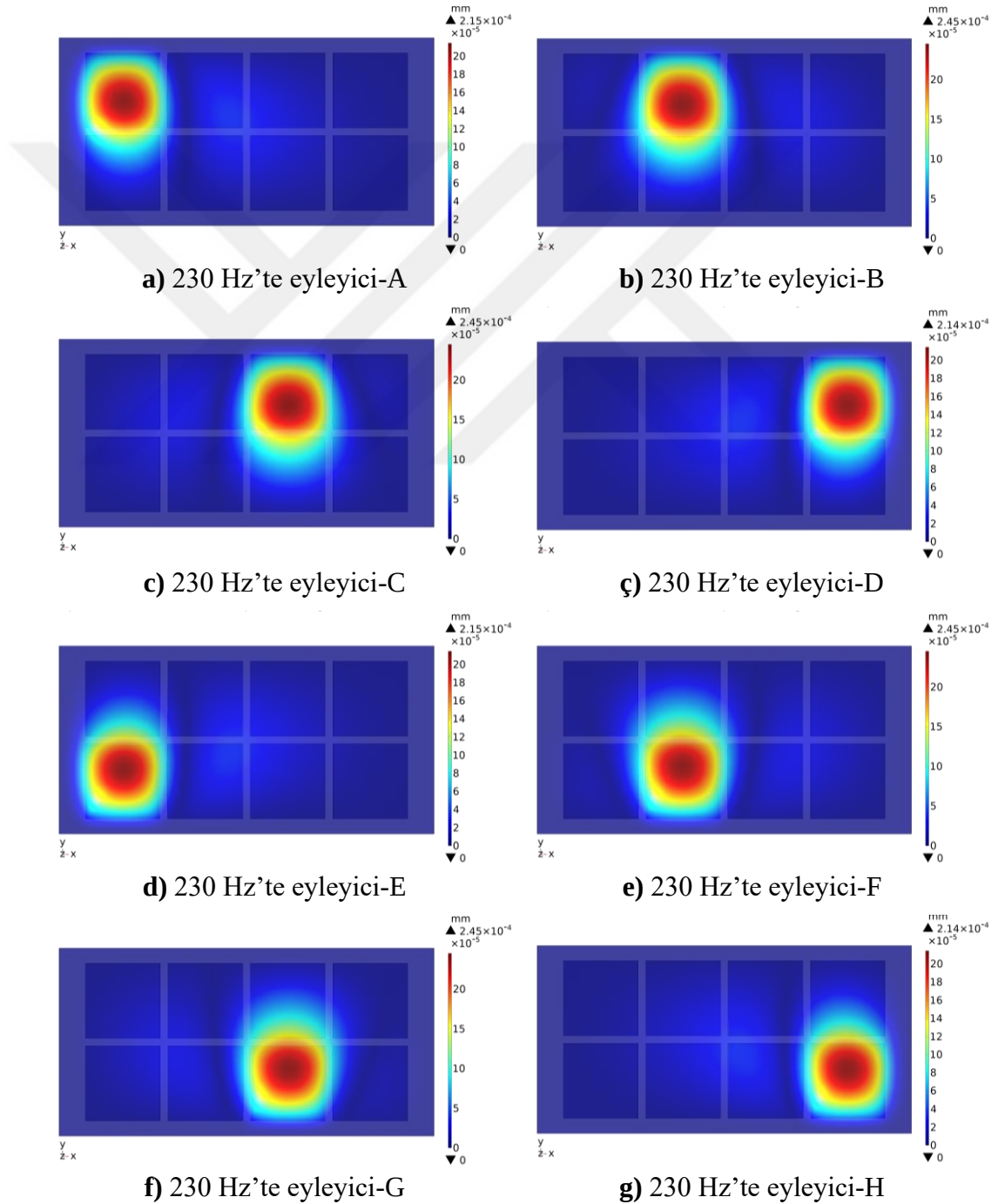


h) 390 Hz'te eyleyici-B

Şekil 3.8: Birinci konfigürasyonda 5 farklı frekansta yüzeydeki yer değiştirme genlikleri.

İkinci Konfigürasyon

İkinci konfigürasyon 8 adet eyleyicinin (A, B, C, D, E, F, G, H eyleyicileri) 2x4'lük matris düzeninde dizilmesiyle oluşturulmuştur. Burada, ikinci dokunsal arayüz, her bir PVDF eyleyici ile 230 Hz frekansında zorlanmış titreşime maruz bırakılacaktır. Uygulanan gerilim işareti şöyledir: $v(t) = 50 \cdot \sin(2\pi \cdot 230 \cdot t)$. 230 Hz değeri birinci dokunsal arayüzde yapılan insan deneylerinin sonucunda bulunmuştur. Ayrıntılara sonraki bölümde girilecektir. Analiz sonuçları aşağıdaki şekilde verilmiştir:



Şekil 3.9: İkinci konfigürasyonda 230 Hz'te yüzeydeki yer değiştirme genlikleri.

Beklendiği gibi arayüzün köşelerinde konumlandırılmış olan A, D, E ve H eyleyicilerinin tek başlarına uyarılmasıyla elde edilen titreşim desenleri yer değiştirme değerleri neredeyse eşittir. Benzer durum ortadaki B, C, F, G eyleyicileri için de geçerlidir. Bu eşitliklerin sebebi yapısal simetridir. Ayrıca bir eyleyici, yapının hareketi engellenmiş kenarlarına yaklaştıkça üretebildiği titreşim genliği de azalır.

Sonlu elemanlar programında yapılan zorlanmış titreşim analizinde eyleyicilerin bireysel olarak uyarılmalarıyla elde edilen titreşim haritaları, dokunsal geribildirim bölgeselleştirilebildiğini göstermektedir.



4. İNSAN DENEYLERİ

4.1. Genel Bilgi

Dokunum biliminde teknik açıdan temel amaç dokunsal geribildirimlerin makine veya bilgisayarlar tarafından üretilmesi olmakla birlikte, tasarımı yapılan düzenekler sonuçta insanların kullanımına sunulacağından onların insan deneyleriyle doğrulanması büyük önem arz etmektedir. Sonlu elemanlar programıyla simüle edilen senaryolar çeşitli ölçüm prosedürleriyle desteklense bile mutlaka psikofizik bilimi devreye girmeli ve üretilen geribildirimlere kullanıcıların nasıl tepki verdikleri raporlanmalıdır. Tez çalışması kapsamında yapılan insan deneylerin uygunluğu Gebze Teknik Üniversitesi Etik Kurulu tarafından onaylanmıştır.

4.2. Birinci Konfigürasyon

İlk psikofizik deneyin hedefi dokunsal arayüz tasarımındaki en temel parametreler olan uyarma frekansı ve algılama eşiğini tespit etmektir. Bu amaçla Fechner tarafından önerilen klasik psikofizik yöntemlerden biri kullanılacaktır: tekrarlanan ölçümlü ve denek-içi desenli sabit uyartı yöntemi. Yöntemi kullanırken ise olabildiğince nesnel sonuçlara ulaşabilmek için 1-aralıklı, 2-seçenekli zorunlu seçim tekniğinden istifade edilecektir. Bu seçim tekniği dokunsal psikofizikte yaygındır ve önemli kaynaklarda ayrıntılı olarak verilmiştir [29], [30], [68], [70]. Aralık sayısının 1 olması deneklere, yanıt vermeleri istenen her denemede 1 adet uyartı sunulması anlamına gelir. Diğer bir deyişle, her denemede gürültü işaretiyle beraber 2 seçenek birden sunulmaktadır. Burada gürültü, daha önce de bahsedildiği gibi uyartının sunulmadığı seçenek anlamındadır. Denek, bu seçeneklerden birini (algılanabilir uyartının var olduğuna inandığı seçeneği) seçmek zorundadır. Tekrarlanan ölçüm, deneydeki bir değişkenin birden çok denemede sunularak birçok kez ölçülmesinin amaçlandığı durumu anlatır. Denek-içi desen ise deneydeki farklı koşulların bütün deneklere sunulmasını ifade eder ve genellikle denek sayısının çok fazla olmadığı durumlarda kullanılır.

Birinci konfigürasyondaki insan deneylerine yaş ortalaması 28,9 olan 8 denek (4 kadın, 4 erkek) katılmıştır. Deneklerin tamamı günlük hayatta baskın olarak sağ ellerini kullanmaktadır ve deneyde de dokunsal arayüz üzerinde sağ ellerinin işaret

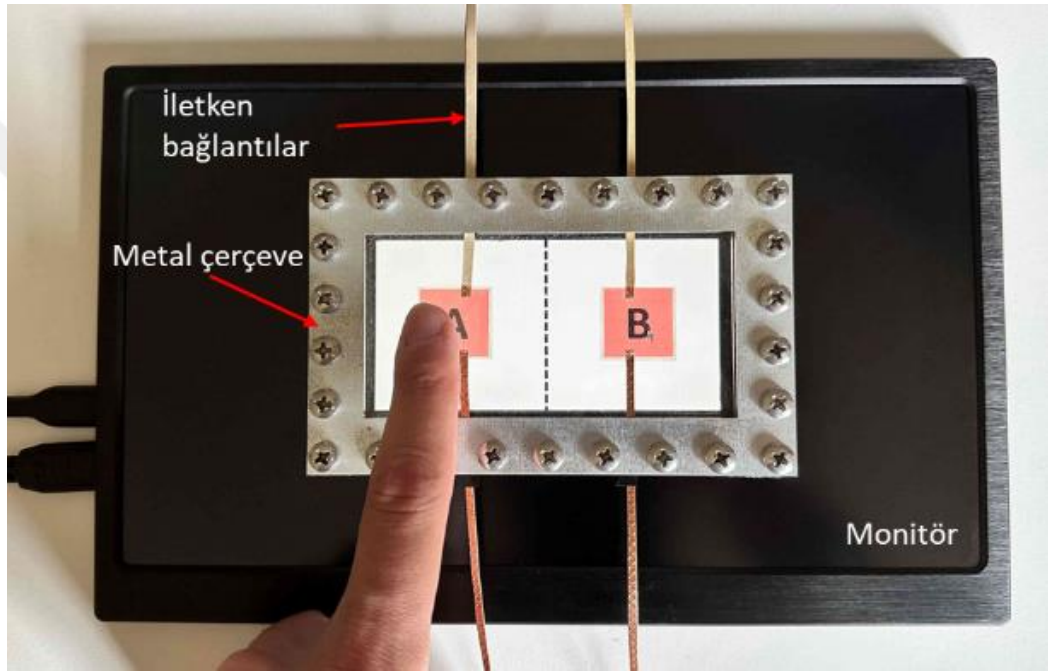
parmaklarını kullanmışlardır. Hiçbirinin duyu ve motor fonksiyonlarında herhangi bir engel bulunmamaktadır. Görevleri hangi bölgede (A veya B) bir dokunsal geribildirim algıladıklarını kestirmeye çalışıp buna cevap vermektir.

Düzenekte asıl deneylere geçmeden yapılan uyarma geriliminin değiştirildiği birkaç deneme sonrasında 230 Hz’te yaklaşık 50 V_{pp}’lik işaretlerin mutlak algı eşiğindeki dokunsal geribildirimleri oluşturmak için yetebileceği öngörülmüştür. 50 V orta değer kabul edilerek logaritmik ölçekte aralarında eşit fark bulunan 9 farklı gerilim genliği belirlenmiştir: $v = \{17 \text{ V}, 22 \text{ V}, 29 \text{ V}, 38 \text{ V}, 50 \text{ V}, 65 \text{ V}, 85 \text{ V}, 110 \text{ V}, 143 \text{ V}\}$. Weber oranı, frekans kümesindeki değerleri belirlerken olduğu gibi %30 olarak kabul edilmiştir.

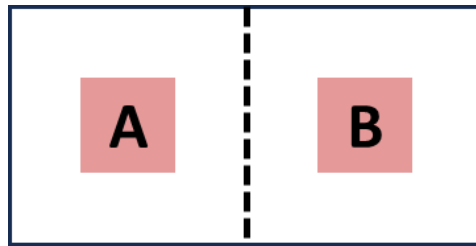
Tasarlanmış dokunsal arayüz dikdörtgen şeklindedir çünkü insan, gerçek hayatta bir yüzeyin dokusunu anlamaya çalışırken genelde parmağını yüzey üzerinde yanal doğrultuda sağa-sola hareket ettirmektedir [69]. Deneyden önce katılımcılar, görevleri hakkında kısaca bilgilendirilmiş ve dokunsal arayüze günlük hayatta dokunmalı ekranlarla etkileşime geçmelerine benzer bir şekilde dokunabilecekleri belirtilmiştir. Ayrıca katılımcılara dokunsal arayüze ve üzerindeki geribildirimlere alışmaları için deneyden önce yaklaşık 3 dakikalık bir süre tanınmıştır. Bu süre boyunca kendilerine 230 Hz’teki her çeşit uyartıdan 2’şer adet (A ve B tarafı için 1’er adet) sunulmuştur. Deney oturumunda katılımcılar her 5 farklı frekans değeri için 180’er adet olmak üzere toplam 900 adet deneme yapmışlardır. Yani 5 frekans değeri ve 9 genlik değeriyle oluşturulan 45 adet farklı işaret, deneklere A tarafında 10 defa ve B tarafında 10 defa olmak üzere toplam 20’şer defa uygulanmıştır. Deneklerin herhangi bir öğrenme veya şartlanma durumuyla karşılaşmasını engellemek için işaretler bir algoritma yardımıyla gruplanmış ve blok-içi rastgele olacak şekilde verilmiştir [68]. Yani bütün işaretler bir defa uygulanmadan hiçbir işaret ikinci kez verilmemiştir. Böylece deney verilerinin istatistiksel olarak daha sağlıklı toplanması amaçlanmıştır.

Katılımcıların görevi dokunsal geribildirim olduğunu inandıkları tarafı monitörün yanındaki bir bilgisayar faresiyle seçmektir (donanım bölümündeki şekil). Diğer bir deyişle deneycinin şu sorusuna cevap vermişlerdir: “Sizce dokunsal geribildirim A’da mı yoksa B’de mi?”. İnsan deneyleri için özel olarak hazırlanan yazılım, bir denemede yapılan seçimden sonra diğer denemeyi katılımcılara sunmuştur. Deney, bir katılımcı için ortalama 70 dakika sürmüştür.

Saydam dokunsal arayüz masanın üzerinde yatay olarak konumlandırılmış 10 inçlik ekran boyutuna sahip bir monitör üzerine yerleştirilmiştir. Ayrıca, farklı etkenlerden kaynaklanarak masa üzerinden arayüze iletilmesi muhtemel olan titreşimleri izole etmek için monitör ile dokunsal arayüz arasına 1 cm kalınlığında köpük çerçeve yerleştirilmiştir. Dokunsal arayüz saydamdır ve böylece monitördeki görselde kırmızı renkli A ve B bölgeleri açıkça görülebilmektedir. Aşağıdaki şekilde birinci konfigürasyon için hazırlanmış insan deneyinden bir sahne ve monitördeki resmin orijinali görülmektedir (Şekil 4.1).



a)



b)

Şekil 4.1: Birinci deneyde kullanılan saydam dokunsal ekran arayüzü ve monitörde sunulmuş olan görsel.

Deneylerde katılımcılara bir dokunsal arayüz üzerinde farklı genlik ve frekanstaki gerilim işaretleri tarafından uyarılan PVDF eyleyicilerin ürettiği dokunsal uyarılar sunulacaktır. Tabiidir ki, deneyleri tasarlarken önemli olan bu uyarıların insanlara tarafından nasıl algılandığını ortaya çıkarmaktır. Daha önce de değinildiği üzere işaret

genlikleri aynı olsa bile farklı frekanstaki gerilim dalgaları aynı konumlarda farklı genlikte titreşimlere sebep olabilir (**Şekil 3.8**). Bu yüzden gerilim işaretleri, frekans etkisi giderilerek 230 Hz referans değeri üzerinden normalize edilmiş ve üretilen titreşim genlikleri uygun kazanç katsayıları kullanılarak eşitlenmiştir (**Tablo 4.1**).

Tablo 4.1: Frekanslar arası kazanç katsayıları.

	$f_1=137$ Hz	$f_2=178$ Hz	$f_3=230$ Hz	$f_4=300$ Hz	$f_5=390$ Hz
100 V _{pp} 'deki maksimum titreşim genliği	0,36 μ m	0,37 μ m	0,39 μ m	0,45 μ m	0,63 μ m
Kazanç katsayıları	1,08	1,03	1	0,87	0,62

Tablodaki değerlerin kullanılarak bütün frekans değerleri için hesaplanan yeni gerilim işareti genlikleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
 v_{f1} &= 1,08 \cdot v = 1,08 \cdot \{17, 22, 29, 38, 50, 65, 85, 110, 143\} \\
 &= \{18, 24, 31, 41, 54, 70, 92, 119, 154\} \\
 v_{f2} &= 1,03 \cdot v = 1,03 \cdot \{17, 22, 29, 38, 50, 65, 85, 110, 143\} \\
 &= \{18, 23, 30, 39, 52, 67, 88, 113, 147\} \\
 v_{f3} &= 1 \cdot v = \{17, 22, 29, 38, 50, 65, 85, 110, 143\} \\
 v_{f4} &= 0,87 \cdot v = 0,87 \cdot \{17, 22, 29, 38, 50, 65, 85, 110, 143\} \\
 &= \{15, 19, 25, 33, 44, 57, 74, 96, 124\} \\
 v_{f5} &= 0,62 \cdot v = 0,62 \cdot \{17, 22, 29, 38, 50, 65, 85, 110, 143\} \\
 &= \{11, 14, 18, 24, 32, 41, 54, 69, 90\}
 \end{aligned}$$

PVDF eyleyicileri uyarmak için yeni genlik değerleri kullanılmıştır. Böylece farklı frekans değerlerinde aynı titreşim genliğinin elde edilmesi sağlanmıştır.

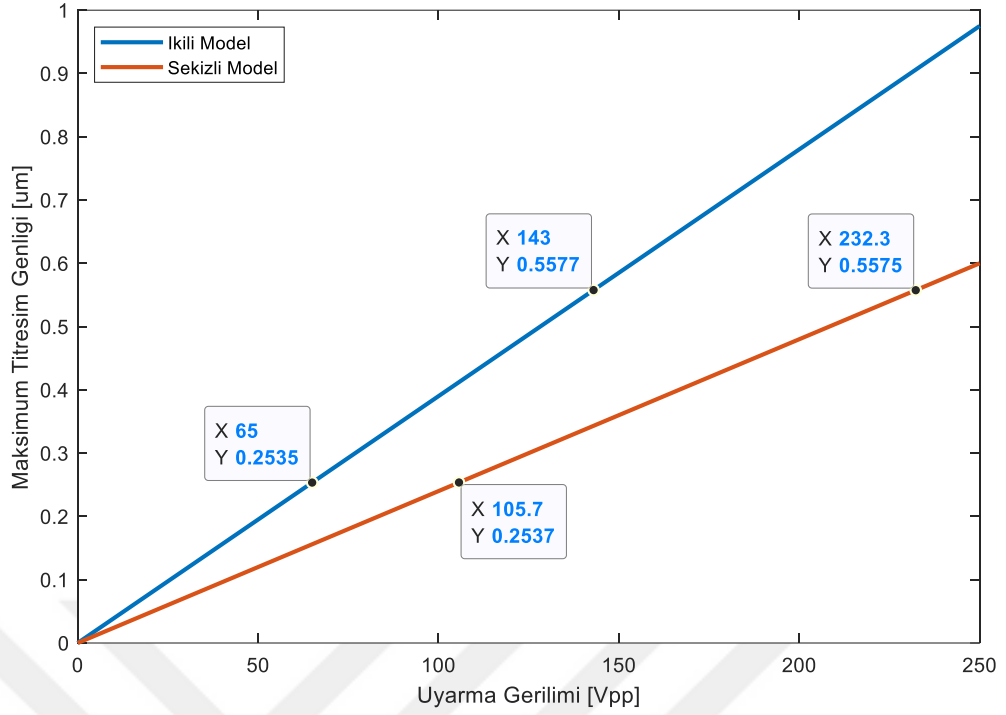
4.3. İkinci Konfigürasyon

Birinci konfigürasyondaki psikofizik deneyde amaç dokunsal arayüzü temel parametreler üzerinden karakterize etmektir. İkinci konfigürasyonda 8 adet eyleyici kullanılmıştır. Bu modelde yapılan deneyin amacı ise bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim verebildiği sonlu elemanlar programı ile gösterilmiş olan arayüzün bu yetkinliğini psikofizik bilimi açısından da ispatlamaktır. Bunun için 8 seçenekten oluşan bir çoklu seçim prosedürü kurgulanmıştır.

İlk deneyden elde edilen sonuçlara göre deneklerin dokunsal geribildirimlere en hassas olduğu frekansın 230 Hz olduğu teyit edilmiştir. Gerilim değerleri kümesinden, biri mutlak eşik değerini belirten 50 V_{pp}'tan bir büyük değer olan 65 V_{pp} ve diğeri en yüksek değer olan 143 V_{pp} olmak üzere iki farklı gerilim değeri seçilmiştir. İkinci deney 230 Hz frekansında ve 65 V_{pp} – 143 V_{pp} genliklerinde iki farklı gerilim işareti kullanarak yapılacaktır. Ancak bu deneyde yine bir normalizasyon işlemine ihtiyaç vardır. Çünkü bir önceki bölümdeki zorlanmış titreşim analizlerinden de görüleceği gibi ortadaki eyleyicilerin (B, C, F ve G) ürettiği titreşim genliği köşedeki eyleyicilere (A, D, E ve H) göre daha yüksektir. İkinci deneyde, konfigürasyonun dokunsal geribildirimleri bölgeselleştirme yetkinliği ölçüleceği için ve bu amaçla 8 konumda da üretilen titreşim genliklerini eşitlemek gerektiğinden köşedeki eyleyiciler için uyarma gerilimi aşağıda hesaplanan kazanç değeri ile çarpılacaktır.

$$2,45/2,15 = 1,13$$

İki farklı konfigürasyondaki eyleyici dizilim farklarından dolayı göz önüne alınması gereken bir durum daha vardır. İkili modeldeki deneyler için seçilen uyarma gerilimi seviyelerinin sekizli modelde sebep oldukları titreşim genlikleri ikili modeldekinden farklıdır. Bu yüzden aynı titreşimi elde etmek için gereken uyarma gerilimi değişir. Zorlanmış titreşim analizinden elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere uyarma gerilimi ile dokunsal arayüzde üretilen titreşim genliği arasında doğrusal fonksiyon olarak ifade edilebilen bir ilişki vardır. 100 V_{pp} gerilim seviyesi için ikili modelde üretilen maksimum titreşim genliği 0,392 µm, sekizli modelde ise 0,245 µm idi. Buradan yola çıkıldığında ikili modelde 65 V_{pp} ve 143 V_{pp} uyarma seviyelerinde sırasıyla 0,25 µm ve 0,56 µm genliklerinin ortaya çıkacağı anlaşılabılır. Bu genlikleri elde etmek için sekizli modelde sırasıyla 106 V_{pp} ve 232 V_{pp} gerilim değerleri kullanılmalıdır (**Şekil 4.1**).



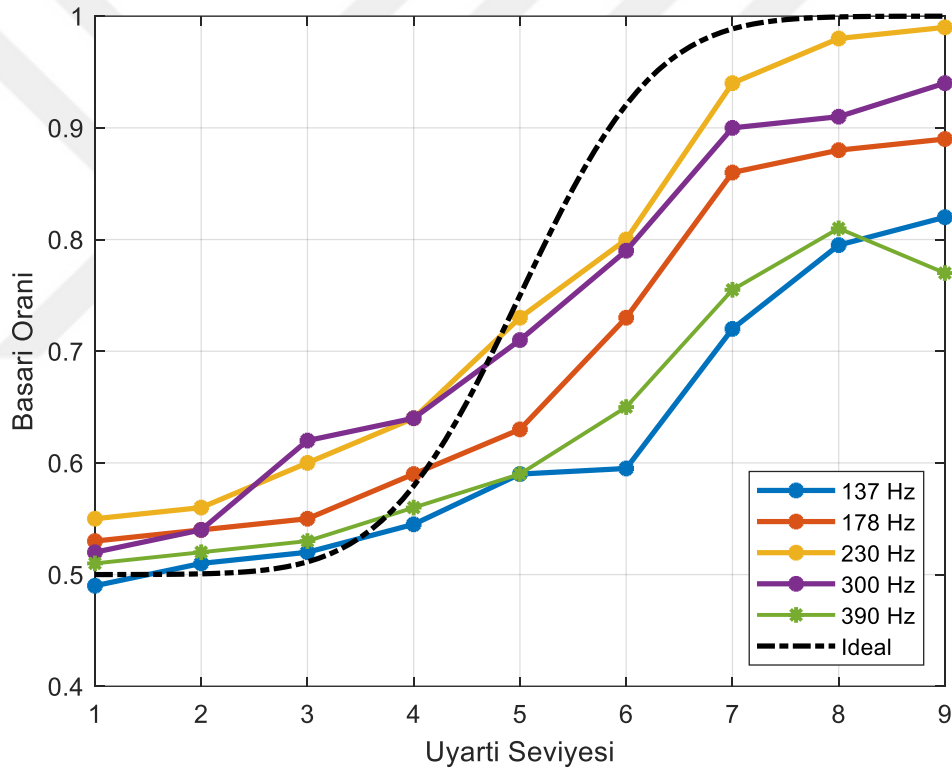
Şekil 4.2: Uyarma gerilimi-maksimum titreşim genliği grafiği.

İki oturum olarak hazırlanmış sekizli model deneyine yaş ortalaması 27,5 olan 6 denek katılmıştır. Deneye başlamadan önce 4 dakikalık alıştırma sürecine tâbi tutulmuşlardır. Alıştırma aşamasında 106 V ve 232 V'luk iki farklı işaret her konuma 2'şer kez verilmiştir. Deneklerden baskın olarak kullandıkları ellerinin işaret parmaklarını serbestçe dokunsal arayüzde gezdirmeleri ve titreşimsel geribildirim algıladıkları konumu tespit etmeleri istenmiştir. Deney oturumunda iki işaret de 8 farklı konumda 20'şer kez kullanılmıştır. Böylece her denek yaklaşık 40 dakika süren toplam 320 deneme gerçekleştirmiştir. Hazırlanan yazılım arayüzü üzerinden her denemeden sonra seçimler belirtilmiş olup seçimden hemen sonra sıradaki dokunsal geribildirim verilmiştir. Bir önceki deneyde olduğu gibi gerilim işaretleri 8 farklı konuma blok-içi rastgele düzende gönderilmiştir.

5. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI

5.1. Birinci Deneyin Sonuçları

Çalışmanın 2. bölümünde psikometrik eğriden ve zorunlu seçim prosedüründen bahsedilmiştir. Tez çalışmasında iki seçenekli zorunlu seçim tekniği kullanıldığından ideal psikometrik eğri 0,5'ten başlar ve böylece eşik değeri, başarı oranının %75 olduğu noktaya tekabül etmiş olur [30], [68]. Sekiz deneğin 9 farklı gerilim seviyesi için başarı oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler 5 farklı frekans grafiği olarak çizilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Başarı oranının frekans ve uyartı seviyesine göre değişimi.

Görüldüğü gibi deneklerin genel performansı uyartı seviyesi arttıkça iyileşmektedir. Bu iyileşme düşük ve yüksek frekanslarda daha yavaş, insan derisinin en hassas olduğu 200-300 Hz dolaylarında ise daha hızlıdır. 390 Hz eğrisinde en yüksek uyartıda beklenmeyen bir düşüklük görülse de bu, zorlanmalı titreşim çıktılarında da hatırlanacağı gibi arayüzün ortasına doğru yayılan titreşim haritasına bağlanabilir. Beklendiği gibi en iyi performans 230 ve 300 Hz eğrilerinde gözlemlenmektedir.

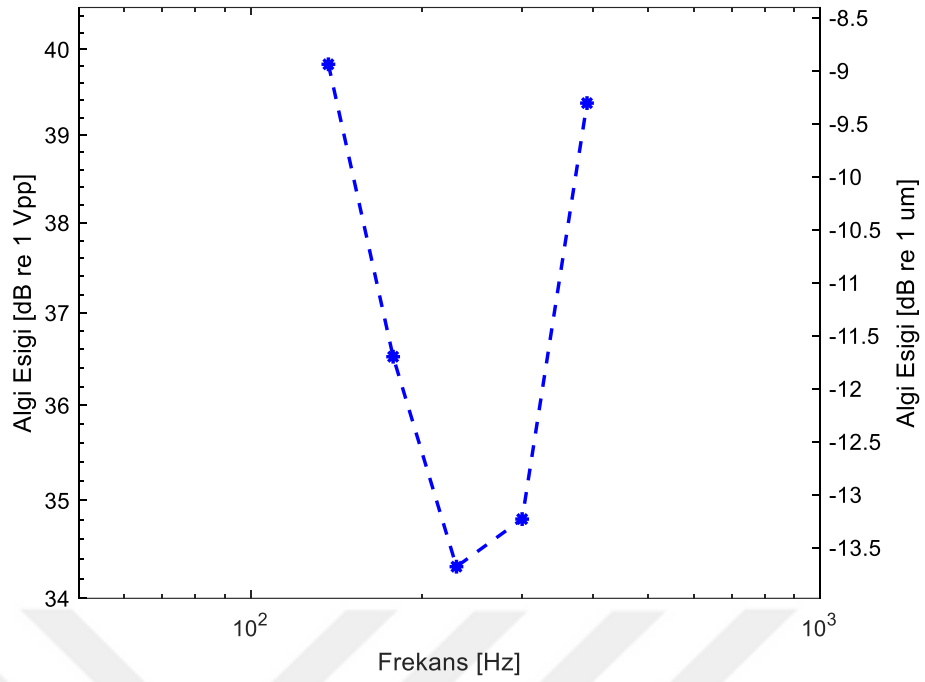
Mutlak algı eşiği sonuçları tekrarlı ölçümlerle 2-yönlü ANOVA (analysis of variance) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir [71]. Bağımsız değişkenler olan uyarı şiddeti ve frekansındaki değişikliklerin deneklerin algı performansına etki etmediğini ileri süren sıfır hipotezi, “p-değeri”nin $\alpha=0,01$ olarak kabul edilen anlamlılık seviyesinden düşük çıkmasıyla birlikte reddedilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, birbirinden bağımsız olarak iki değişken de deneklerin başarı oranları üzerinde önemli etkiye sahiptir ($p<0,01$). Buna ek olarak, iki değişken arasında da anlamlı bir etkileşim tespit edilmemiştir ($p>0,01$). Diğer bir deyişle, değişkenlerden birinin başarı üzerindeki etkisi diğer değişkenden bağımsızdır.

Yukarıdaki şekilde gösterilen başarı oranlarına sigma-eğrileri uydurulmuştur. Uydurulan eğrilerde %75’lik başarı oranının gerçekleştiği uyarı seviyeleri tespit edilmiştir. Eğer bu değer iki uyarı seviyesinin arasına denk gelirse, doğrusal enterpolasyon tekniğine başvurulmuştur. Beş farklı eğriye göre hesaplanan mutlak algı eşik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Tablo 5.1: Farklı frekanslarda mutlak algı eşiklerinin elde edilmesini sağlayan gerilim seviyeleri

Frekans Değeri	Gerilim Genliği
137 Hz	98 V _{pp}
178 Hz	67 V _{pp}
230 Hz	52 V _{pp}
300 Hz	55 V _{pp}
390 Hz	93 V _{pp}

Bu değerler bir grafik olarak gösterilirse literatürdeki birçok çalışmadaki bulgularla örtüşen U-şekilli eğriye ulaşılmış olur [6], [20], [21], [23], [28], [29], [72]. Elde edilen eğri aşağıda görülmektedir (Şekil 5.2).



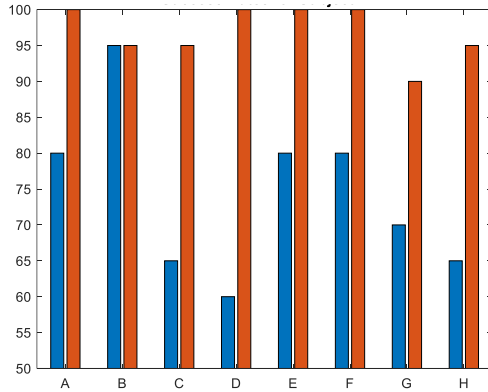
Şekil 5.2: U-formunda frekans-algı eşiği grafiği.

Grafikten de anlaşılacağı gibi insan parmak ucundaki derinin hassasiyeti yaklaşık 200 Hz'e kadar dokunsal geribildirim frekansı ile birlikte artmakta ve 300 Hz'ten sonra azalmaktadır. 5 farklı ve logaritmik eksen de eşit aralıklı frekans arasından 230 Hz'te dokunsal uyarılar için algı eşiğinin minimum olduğu gösterilmiştir. Bu değer ise yaklaşık olarak $0,2 \mu\text{m}$ 'ye tekabül eder.

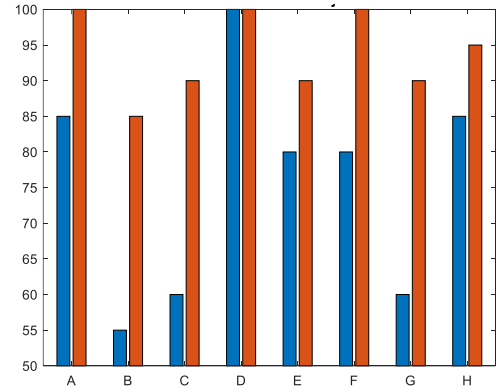
5.2. İkinci Deneyin Sonuçları

Dokunsal arayüzün ikinci konfigürasyonunda 6 deneye başarı oranı 2 farklı gerilim değeri için aşağıdaki sütun grafiklerinde gösterilmiştir (**Şekil 5.3**). Mavi sütunlar 106 V_{pp}, kırmızı sütunlar ise 232 V_{pp} temsil eder. Bütün denekler arasında en düşük performans %55 olduğundan (denek-2, B konumunda ve 106 V_{pp}'de) grafikler %50'den başlamaktadır. Görüldüğü gibi, yaklaşık $0,25 \mu\text{m}$ 'lik titreşim genliği bile dokunsal geribildirimler vermek için yeterli kabul edilebilir. Bu sonuç literatürdeki bilinen çalışmalar ile de uyumludur [21], [25], [68].

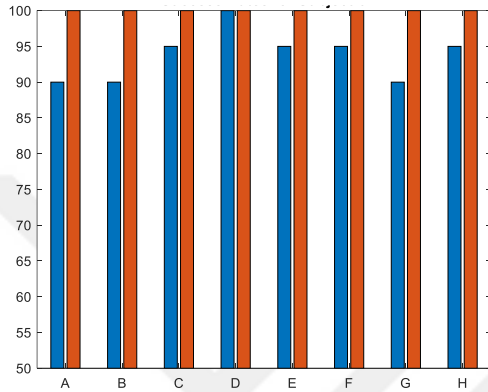
Ayrıca birkaç istisna hariç, deneklerin bütün konumlardaki performansları $0,56 \mu\text{m}$ titreşim genliğinde belirgin biçimde iyileşmiştir. Dahası, altı denekten ikisi yüksek olan titreşim genliklerinde bütün konumlarda %100 başarı oranı yakalamıştır.



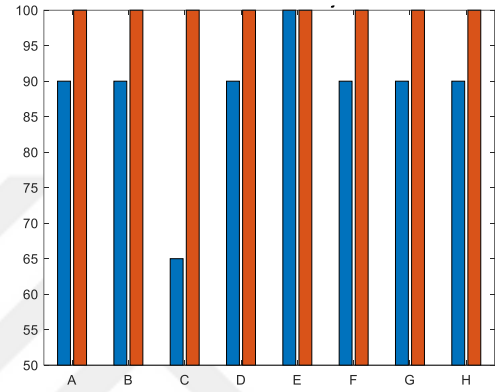
a) Denek-1



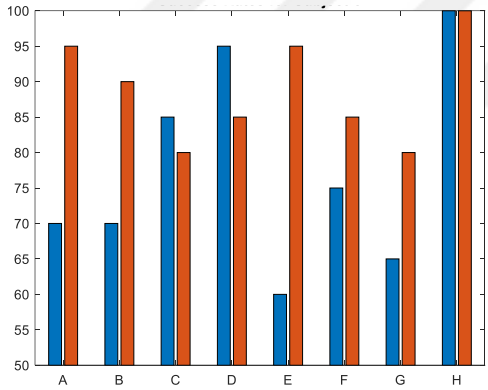
b) Denek-2



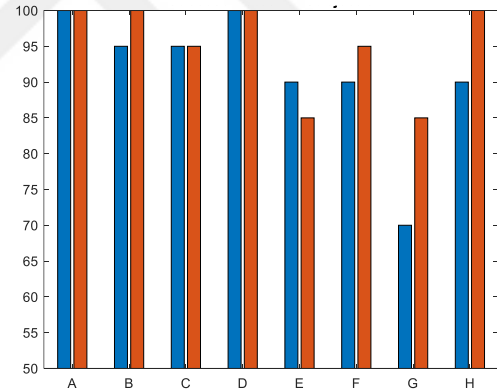
c) Denek-3



ç) Denek-4



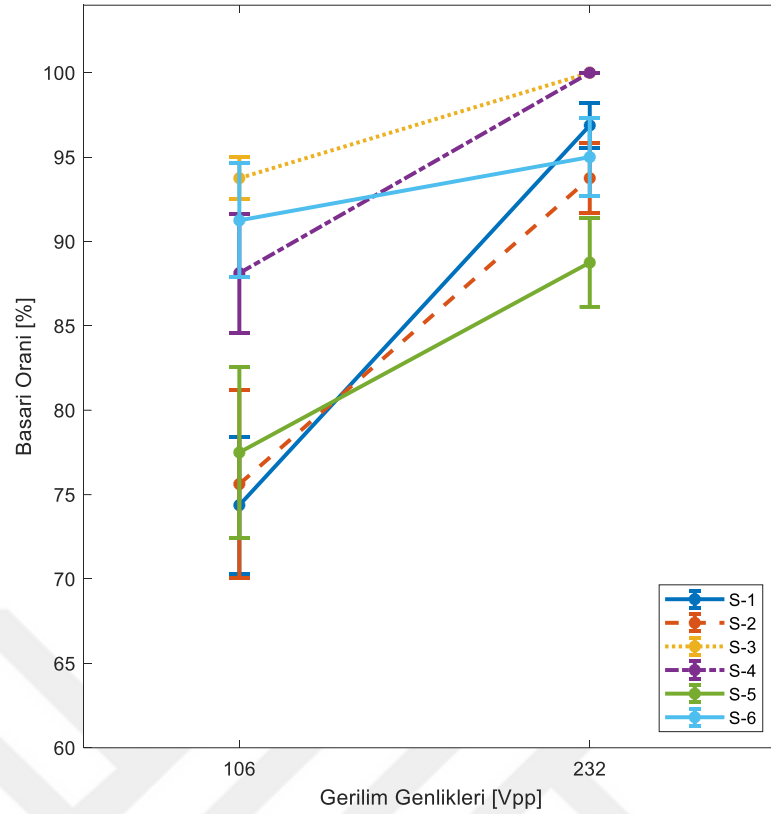
d) Denek-5



e) Denek-6

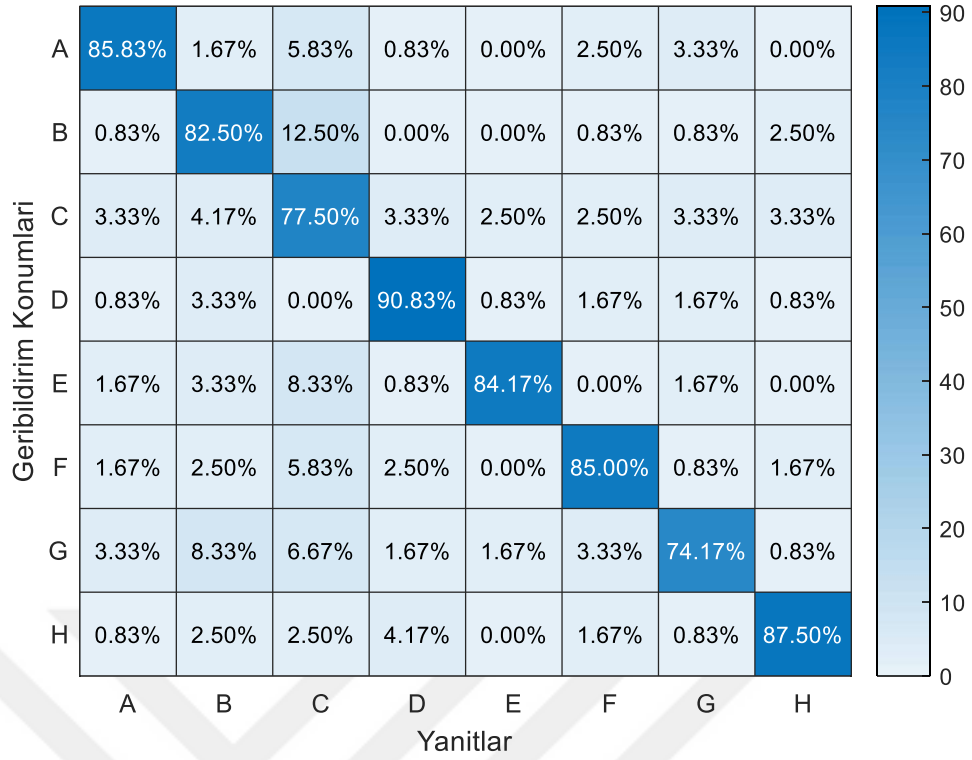
Şekil 5.3: Deneklerin dokunsal geribildirimleri bölgeselleştirmede başarı oranları.

Başarı oranları, dokunsal arayüz üzerindeki 8 konumdan bağımsız olarak denekler için ayrı ayrı değerlendirildiğinde her katılımcının, uyarma genliği arttığında ve sonuç olarak titreşim genliği yükseldiğinde daha başarılı oldukları gözlemlenmiştir (**Şekil 5.4**).

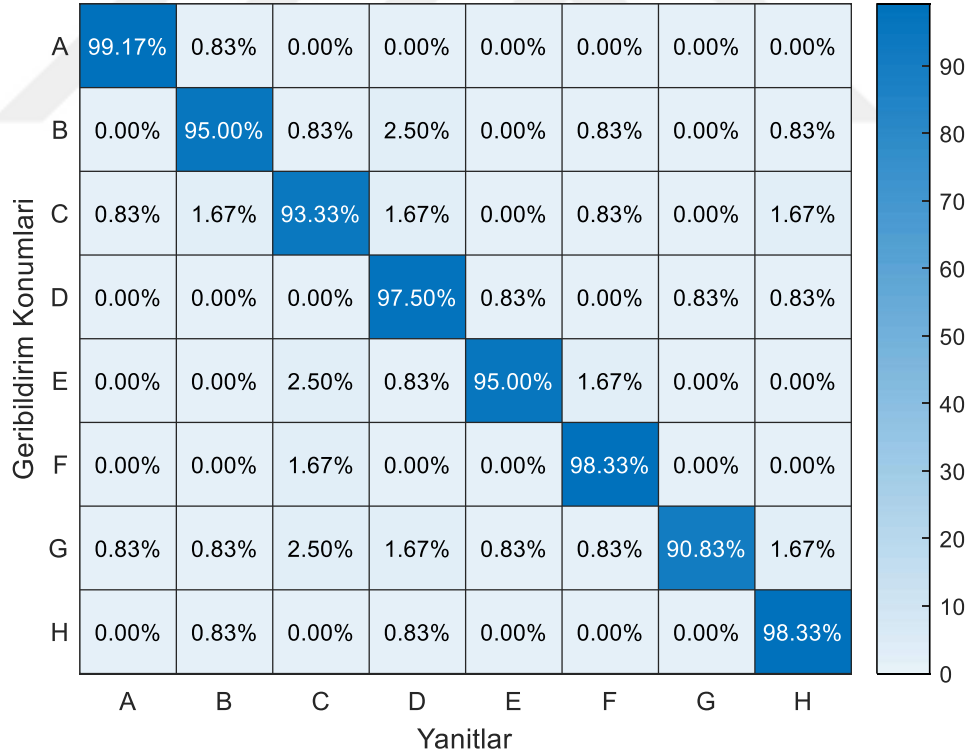


Şekil 5.4: Başarı oranlarının gerilim seviyesine göre değişmesi.

Bireylerin performans metriklerine ek olarak katılımcı yanıtlarının konum bazlı doğruluk oranı da önemlidir. Bu oranı açıkça değerlendirmek için düşük ve yüksek gerilim seviyeli durumlar için hata (karışıklık) matrisleri oluşturulmuştur (**Şekil 5.5**). Görüldüğü gibi, düşük gerilim seviyesinde deneklerin ortalama performansı %74'ün altına düşmemekte ve en kötü 2 performans dışarıda bırakıldığında %82'ye kadar çıkmaktadır. Daha yüksek gerilim seviyesinde ise ortalama performans genel anlamda net bir şekilde iyileşmekte ve en düşük değerinde (G konumu) bile %91 olmaktadır (**Şekil 5.6**). Esasında, yüksek gerilim durumunda dokunsal arayüzün tüm yüzeyinde doğruluk oranı ortalama olarak %95,8 gibi yüksek bir değerdir. İki gerilim seviyesinde de en düşük başarı oranı C ve G konumlarında görülmüştür, ki bunun sebebi eyleyicilerin yüzeye tamamen yapışmamış olması veya komşu eyleyicilerin titreşim haritasının o konumlara doğru yaklaşması olabilir.



Şekil 5.5: Düşük gerilim seviyesinde konumlara bağlı doğruluk oranları.



Şekil 5.6: Yüksek gerilim seviyesinde konumlara bağlı doğruluk oranları.

Bunlara ek olarak, köşe konumlardaki (A, D, E, H) ortalama başarı skorlarının iki gerilim seviyesi durumunda da tutarlı bir şekilde en yüksek 4-5 oran arasında olması

dikkat çekmektedir. Çünkü bu konumlardaki eyleyiciler orta konumlardaki eyleyicilere göre daha az sayıda komşu eyleyiciye sahiptirler ve böylece bunlardan gelecek titreşim etkilerine daha az maruz kalırlar. Sonuçta, ortalama olarak en kötü başarı oranlarının görüldüğü C ve G konumları dışarıda bırakılırsa doğruluk oranı her bir konumda en az %95 olmaktadır.



6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Son zamanlarda tamamen hayatımıza girmiş olan dokunmalı ekranlar ve hızla gelişmekte olan genişletilmiş gerçeklik uygulamalarıyla dokunum bilimi önem kazanmaktadır. Ancak halen kullanıcıların ekranlarla görsel etkileşimini kısıtlamadan yüzeyde dokunsal geribildirim oluşturabilme sorunu çözüme kavuşturulamamıştır. Bu doktora tezinde PVDF-tipi piezoelektrik eyleyicileri kullanarak saydam ve bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim elde edilebilen ekranların tasarlanabileceği gösterilmiştir.

Önce, kurgulanan dokunsal arayüzü karakterize etmek amacıyla birinci konfigürasyon yapısı hazırlanmıştır. İnce bir dikdörtgen PVC plakanın altına biri sağa diğeri sola olmak üzere 2 saydam PVDF eyleyici monte edilmiştir. Bu eyleyiciler özel olarak hazırlanan bir gömülü sistem kurulumu vasıtasıyla uyarılmıştır. Beş farklı frekans ve doku farklı gerilim genliği kullanılarak oluşturulan yüksek gerilim işaretleri kontrollü bir şekilde düzeneğe verilmiş ve arayüzün iki tarafında farklı dokunsal geribildirimler elde edilmiştir. Sekiz denek ile yürütülen iki seçenekli zorunlu seçim deneyi göstermiştir ki, insan parmak ucunun en hassas olduğu frekans değeri 230 Hz'tir. Deneyden elde edilen diğer bir önemli sonuç da insanın mutlak algı eşiğinin yaklaşık 0,2 μm 'lik bir titreşim genliğine (deplasman) tekabül etmesidir. Ulaşılan sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalar ile uyumludur [73], [74].

Daha sonra, düzeneğin bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim üretme yetkinliğini test etmek için ikinci konfigürasyon hazırlanmıştır. Birinci konfigürasyonda kullanılan eyleyicilerden 8 tane daha hazırlanmış ve diğeriyle özdeş başka bir PVC plakanın altına 2x4'lük matris düzeninde eşit aralıklarla yapıştırılmıştır. Önceki deneyde bulunan 230 Hz değerinde ve iki farklı seviyede (106 V_{pp} ve 232 V_{pp}) gerilim işaretleri oluşturulmuştur. Bu işaretler 6 katılımcıya belirli bir algorithmada ve seçilmiş katsayılarla normalize edilerek sunulmuştur. Deneklerin performansları farklı metrikler açısından ölçülmüştür. Dokunsal arayüzdeki 8 farklı konumun tamamında 106 V_{pp} 'de %83, 232 V_{pp} 'de %96'lık başarı oranına ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, ITO elektrotlarla kaplı saydam PVDF filmlerin eyleyici olarak çalıştırıldığı bir dokunsal arayüz tasarlanmış ve insanların kullanması için elzem olan temel parametreler araştırılarak sistem karakterizasyonu yapılmıştır. Bu temel

parametreler uyarma frekansı ve mutlak algı eşiğidir. Ortaya konan parametrelere göre tasarlanan ikinci deneyde ise, bu eyleyicilerin bölgeselleştirilmiş dokunsal geribildirim verebilen arayüzlerin hazırlanmasında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Açıktır ki, bu çalışmada kullanılan ITO kaplı PVDF malzemesi dokunsal arayüzler için uygun eyleyici çeşitlerinden biri olabilir. Tez çalışmasında en fazla 232 V'luk gerilim seviyesinin kullanıldığı düşünüldüğünde daha yüksek seviyelerde çok daha zengin dokunsal geribildirimler elde etmek mümkün olabilir. Nitekim, üreticinin sağladığı bilgilere göre, çalışmadan kullanılan filmler 5000 V gerilim seviyelerine dayanabilmektedir [63]. Ek olarak, görünür ışıktaki % 90'dan daha yüksek bir ışık geçirgenlik oranına sahip olması, PVDF filmleri dokunsal ekranlar için iyi bir eyleyici adayı yapmaktadır.

İkinci konfigürasyonda 8 adet 2x2 cm ölçülerinde PVDF eyleyici kullanılmıştır. Her ne kadar bir insan parmağının dokunsal yüzeyle temas alanının yaklaşık 1 cm olduğu göz önüne alındığında eyleyicilerin yeteri kadar küçük olmadığı düşünülse de arayüzdeki eyleyiciler çoğaltılarak bu sorun aşılabılır ve dokunsal çözünürlük artırılabilir.

Öte yandan PVDF malzemelerin, direkt çalışma modundan faydalanılarak sensör olarak kullanılması da mümkündür. Böylece dokunsal yüzeyde parmak konumu da algılanabilir ve uygun bir devre topolojisiyle birlikte aynı anda sensör ve eyleyici olarak çalışabilen bir arayüz oluşturulabilir. Ayrıca PVDF filmlere uygulanan kuvvet ile üretilen gerilim arasında doğrusal bir ilişki olduğundan, bu arayüz basınç sensörü olarak da kullanılabilir. Bu özelliklerinden yola çıkıldığında, gelecekte saydam PVDF malzemelerin dokunsal arayüzlerde daha fazla kullanım alanı bulabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page, (Erişim Tarihi: 01.02.2024)
- [2] Türk Dil Kurumu, Güncel Türkçe Sözlük, <https://sozluk.gov.tr>. Erişim Tarihi: 01.02.2024
- [3] Wiertlewski M., Colgate J. E., (2015), “Power Optimization of Ultrasonic Friction-Modulation Tactile Interfaces”, IEEE Transactions on Haptics, 8(1), 43-53.
- [4] Jones L. A., (2018), “Haptics”, 1st Edition, The MIT Press Essential Knowledge Series.
- [5] Verified Market Research, (2023), “Global Haptic Touchscreen Market, Market Size, status & Forecast to 2030”, Report ID: 39312.
- [6] Bau O., Poupyrev I., Israr A., Harrison C., (2010), “TeslaTouch: Electrovibration for Touch Surfaces”, 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 283-292, New York, NY, USA, 3-6 October.
- [7] Uchino K., (2003), “Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers”, Technical Report, International Center for Actuators and Transducers, Penn State University, USA.
- [8] Hudin C., Lozada J., (2013), “Localized Tactile Stimulation by Time-Reversal of Flexural Waves: Case Study With a Thin Sheet of Glass”, IEEE World Haptics Conference, 67-72, Daejeon, South Korea, 14-18 April.
- [9] Sweller J., (1988), “Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning”, Cognitive Science, 12, 257-285.
- [10] Enriquez M. J., (2008), “Design of haptic signals for information communication in everyday environments.” PhD Thesis, University of British Columbia.
- [11] Ramnath R., Kinnear N., Chowdhury S., Hyatt T., (2020), “Interacting with Android Auto and Apple CarPlay when driving: The effect on driver performance”, Published Project Report PPR948, TRL Limited, UK.
- [12] Ege E. S., Cetin F., Basdogan C., (2011), “Vibrotactile feedback in steering Wheel reduces navigation errors during GPS-guided car driving”, IEEE World Haptics Conference, Istanbul, Türkiye, 21-24 June.
- [13] Mayer R. E., (2001), “Multimedia Learning”, 2nd Edition, New York: Cambridge University Press.

- [14] Mayer R. E., Moreno R., (2003), "Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning", *Educational Psychologist*, 38(1), 43-52.
- [15] Corbett B., Nam C. S., Yamaguchi T., (2015), "The Effects of Haptic Feedback and Visual Distraction on Pointing Task Performance", *Int. Journal of Human-Computer Interaction*, 32(2), 89-102.
- [16] Frid E., Moll J., Bresin R., Pysander E. L. S., (2019), "Haptic Feedback combined with movement sonification using a friction sound improves task performance in a virtual throwing task", *Journal on Multimodal User Interfaces*, 13, 279-290.
- [17] Purves D., Augustine G. J., Fitzpatrick D., Hall W. C., LaMantia A. S., McNamara J. O., Williams S. M., (2004), "Neuroscience", 3rd Edition, Sinauer Associates Inc.
- [18] Gescheider G. A., Wright J. H., Verrillo R. T., (2009), "Information-Processing Channels in the Tactile Sensory System", *Scientific Psychology Series*.
- [19] Verrillo R. T., (1963), "Effect of Contactor Area on the Vibrotactile Threshold", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35, 1962-1966.
- [20] Verrillo R. T., (1985), "Psychophysics of vibrotactile stimulation", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77, 225-232.
- [21] Bolanowski S. J., Gescheider G. A., Verrillo R. T., Checkosky C. M., (1988), "Four channels mediate the mechanical aspects of touch", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84, 1680-1694.
- [22] Choi S., Kuchenbecker K. J., (2013), "Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications", *Proceedings of the IEEE*, 101(9), 2093-2104.
- [23] Brewster S., Chohan F., Brown L., (2007), "Tactile Feedback for Mobile Interactions", *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 159-162, San Jose, CA, USA, 28 April - 3 May.
- [24] Jones L., Sarter N., (2008), "Tactile Displays: Guidance for Their Design and Application", *Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(1), 90-111.
- [25] Israr A., Tan H. Z., Reed C. M., (2006), "Frequency and amplitude discrimination along the kinesthetic-cutaneous continuum in the presence of masking stimuli", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120, 2789-2800.
- [26] Verrillo R. T., (1979), "Comparison of vibrotactile threshold and suprathreshold responses in men and women", *Perception & Psychophysics*, 26(1), 20-24.
- [27] Fechner G. T., (1860), "Elemente der Psychophysik", Druck und Verlag von Breitkopf und Haertel.

- [28] Weber E. H., (1978), "The Sense of Touch", Academic Press for Experimental Psychology Society.
- [29] Jones L., Tan H., (2013), "Application of psychophysical techniques to haptic research", IEEE Transactions on Haptics, 6(3), 268-284.
- [30] Gescheider G. A., (1997), "Psychophysics: The Fundamentals", 3rd Edition, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, USA.
- [31] Jalili N., (2010), "Piezoelectric-Based Vibration Control, from Macro to Micro/Nano Scale Systems", 1st edition, Springer: New York, USA.
- [32] Zhao J. M., Song X. X., Liu B., (2016), "Standardized Compliance Matrices for General Anisotropic Materials and a Simple Measure of Anisotropy Degree Based on Shear-Extension Coupling Coefficient", International Journal of Applied Mechanics, 8(6), 1650076.
- [33] Piefort V., (2001), "Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures", PhD Thesis, Universite Libre de Bruxelles.
- [34] Fukada E., Furukawa T., (1981), "Piezoelectricity and ferroelectricity in polyvinylidene fluoride", Ultrasonics, (19), 31-39.
- [35] Holloway F. C., (1997), "Material Characterization of Poly(Vinylidene Fluoride): A Thin Film Piezoelectric Polymer", MS Thesis, Montana State University.
- [36] Dahiya R. S., Valle M., (2013), "Robotic Tactile Sensing", 1st Edition, Springer: Dordrecht, Holland.
- [37] Wang H., Zhang Q. M., Cross L. E., Sykes A. O., (1993), "Piezoelectric, dielectric, and elastic properties of poly(vinylidene fluoride/trifluoroethylene)", Journal of Applied Physics, (74), 3394-3398.
- [38] Ramanathan A. K., (2021), "Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Films for Near-Static Measurement Applications", PhD Thesis, The Ohio State University, Columbus. USA.
- [39] Brewster S., Chohan F., Brown L., (2007), "Tactile Feedback for Mobile Interactions", Conference on Human Factors in Computing Systems, 159-162, San Jose, CA, USA, 28 April – 3 May.
- [40] Hoggan E., Brewster S. A., Johnston J., (2008), "Investigating the Effectiveness of Tactile Feedback for Mobile Touchscreens", Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1573-1582, Florence, Italy, 5-10 April.
- [41] Mcadam C., and Brewster S., (2009), "Distal Tactile Feedback for Text Entry on Tabletop Computers", Proceedings of the 23rd British HCI Group Annual Conference on People and Computers: Celebrating People and Technology, 504–511, Cambridge, England, 1-5 September.

- [42] Zhao S., Israr A., Klatzky R., (2015), “Intermanual Apparent Tactile Motion on Handheld Tablets”, IEEE World Haptics Conference, 241-247, Evanston, IL, USA, 22-26 June.
- [43] Park G., Choi S., (2018), “Tactile Information Transmission by 2D Stationary Phantom Sensations”, Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1-12, Montreal, QC, Canada, 21-26 April.
- [44] Woo J., Ih J., (2015), “Vibration rendering on a thin plate with actuator array at the periphery”, Journal of Sound and Vibration, 349, 150-162.
- [45] Seifert J., Packeiser M., Rukzio E., (2013), “Adding Vibrotactile Feedback to Large Interactive Surfaces”, 14th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction, 507-514, Cape Town, South Africa, 2-6 September.
- [46] Dimitriadis E. K., Fuller C. R., Rogers C. A., (1991), “Piezoelectric actuators for distributed vibration excitation of thin plates”, Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, 113(1), 100-107.
- [47] Sarı G., Akgül M. B., Kirişken B., Ak A. F., Akiş A. A., (2017), “An Experimental Study of a Piezoelectrically Actuated Touch Screen”, International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, 753–758, Prague, Czech Republic, 22-25 July.
- [48] Ak A. F., Sarı G., Akgül M. B., Kirişken B., Akiş A. A., (2017), “Numerical Analysis of Vibrating Touch Screen Actuated by Piezo Elements”, International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, 775–779, Prague, Czech Republic, 22-25 July.
- [49] Sadia B., Emgin S. E., Sezgin T. M., Basdogan C., (2020), “Data-driven vibrotactile rendering of digital buttons on touchscreens”, International Journal of Human Computer Studies, 135, 102363.
- [50] Ji H., Oakley I., Kang J., Ryu J., (2012), “Exploring the Perceptual Space of a Novel Slip-Stick Haptic Surface Display”, Conference on Human Factors in Computing Systems, 2231-2236, Austin, TX, USA, May 5-10.
- [51] Winfield L., Glassmire J., Colgate J. E., Peshkin M., (2007), “T-PaD: Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction”, Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 421-426, Tsukuba, Japan, 22-24 March.
- [52] Mullenbach J., Shultz C., Piper A. M., Peshkin M., Colgate J. E., (2013), “Surface haptic interactions with a TPad tablet”, Adjunct Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 7-8, St. Andrews, Scotland, UK, 8-11 October.
- [53] Giraud F., Amberg M., Lemaire-Semail B., Giraud-Audine C., (2014), “Using an ultrasonic transducer to produce tactile rendering on a touchscreen”, Joint IEEE Int. Symposium on the Applications of Ferroelectric, Int. Workshop on

Acoustic Transduction Materials and Devices and Workshop on Piezoresponse Force Microscopy, State College, PA, USA, 12-16 May.

- [54] Giraud F., Hara T., Giraud-audine C., Amberg M., Lemaire-semail B., Takasaki M., (2018), “Evaluation of a Friction Reduction Based Haptic Surface at High Frequency”, IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), 210-215, San Francisco, CA, USA, 25-28 March.
- [55] Hudin C., Lozada J., Hayward V., (2015), “Localized tactile feedback on a transparent surface through time-reversal wave focusing”, IEEE Transactions on Haptics, 8(2), 188–198.
- [56] Dhiab A. B., Hudin C., (2019), “Confinement of Vibrotactile Stimuli in Narrow Plates”, IEEE World Haptics Conference, 431–436, Tokyo, Japan, 9-12 July.
- [57] Enferad E., Giraud-Audine C., Giraud F., Amberg M., Semail B. L., (2019), “Generating controlled localized stimulations on haptic displays by modal superimposition”, Journal of Sound and Vibration, 449, 196–213.
- [58] Matysek M., Lotz P., Winterstein T., Schlaak H. F., (2009), “Dielectric Elastomer Actuators for Tactile Displays”, World Haptics 2009 – Third Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 290-295, Salt Lake City, UT, USA, 18-20 March.
- [59] Stubning T., Denes I., Beruscha F., (2018), “Design optimization of EAP-based haptic surfaces”, IEEE 2nd International Conference on Dielectrics, 1-4, Budapest, Hungary, 1-5 July.
- [60] Ankit N. T., Rajput M., Chien N. A., Mathews N., (2017), “Highly transparent and integrable surface texture change device for localized tactile feedback”, Small, 14, 1702312.
- [61] Kim U., Kang J., Lee C., Kwon H. Y., Hwang S., Moon H., Koo J. C., Nam J. D., Hong B. H., Choi J. B., Choi H. R., (2013), “A transparent and stretchable graphene-based actuator for tactile display”, Nanotechnology, 24, 145501.
- [62] Choi D. S., Kim S. Y., (2019), “Transparent Film-Type Vibrotactile Array and Its Haptic Rendering Using Beat Phenomenon”, Sensors, 19, 3490.
- [63] PolyK Technologies, <https://piezopvdf.com/PVDF-piezo-film-pvdf-ito/>, (Erişim Tarihi: 01.02.2024).
- [64] MatWeb, (2023), <https://www.matweb.com/index.aspx>, (Erişim Tarihi: 01.05.2023).
- [65] D’Anniballe R., Zucchelli A., Carloni R., (2021), “The effect of morphology on poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorotrifluoroethylene)-based soft actuators: Films and electrospun aligned nanofiber mats”, Sensors and Actuators A: Physical, 333, 113255.

- [66] Gaudenzi P., (2009), "Smart Structures: Physical Behaviour, Mathematical Modelling and Applications", 1st Edition, Wiley, UK.
- [67] Thorby D., (2008), "Structural Dynamics and Vibration in Practice", 1st Edition, Elsevier, UK
- [68] Cunningham D. W., Wallraven C., (2012), "Experimental Design: From User Studies to Psychophysics", 1st Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 101-120.
- [69] Lederman S. J., (1974), "Tactile Roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure", *Attention Perception & Psychophysics*, 16(2), 385-395.
- [70] Kingdom F. A. A., Prins N., (2016), "Psychophysics, A Practical Introduction", 2nd Edition, Academic Press, London, UK.
- [71] Vardar Y., İşleyen A., Saleem M. K., Başdoğan Ç., (2017), "Roughness perception of virtual textures displayed by electrovibration on touch screens", *IEEE World Haptics Conference*, 263-268, Munich, Germany, 6-9 June.
- [72] Young G., Murphy D., Weeter J., (2013), "Audio-Tactile Glove", 16th *Conference on Digital Audio Effects*, DAFx-13, Maynooth, Ireland, 2-5 September.
- [73] Israr A., Choi S., Tan H. Z., (2006), "Detection Threshold and Mechanical Impedance of the Hand in a Pen-Hold Posture", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 472-477, Beijing, China, 9-15 October.
- [74] Gescheider G. A., Bolanowski S. J., Rope J. V., Verrillo R. T., (2002), "A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: Frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation", *Somatosensory&Motor Research*, 19(2), 114-124.

ÖZGEÇMİŞ

Enes Selman EGE, orta ve lise öğrenimini Özel Sankt Georg Avusturya Lisesi'nde 2003 yılında tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında mezun olmuştur. Aynı bölümde 2009 yılında yüksek lisansını tamamlamıştır. Daha sonra ikinci yüksek lisansını Koç Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2016 yılında tamamlamıştır. 2013 yılında, dokunsal akıllı arayüzler üzerine faaliyet gösteren HapSys firmasını kurmuştur. 2017-2018 yılları arasında THY Turkish Technic'te aviyonik tasarım mühendisi olarak ve 2018-2022 yılları arasında TÜBİTAK BİLGEM'de uzman araştırmacı olarak çalışmıştır. Dokunsal ekranlar ve arayüzler ile ilgili patentleri ve önemli başarıları bulunmaktadır. İngilizce ve Almanca bilmektedir.



TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYIN

Ege, E. S., Balıkçı, A., (2023), “Transparent Localized Haptics: Utilization of PVDF Actuators on Touch Displays”, Actuators 2023, 12, 289.



EKLER

Ek-A: Etik Kurulu Kararı

	T.C. GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ İNSAN ARAŞTIRMALARI ETİK KURULU KARARLARI
Oturum Tarihi: 07.03.2023	Oturum Sayısı: 2023/03

KARAR:03-03) Üniversitemiz Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Mühendisliği Programı öğrencisi Enes Selman EGE'nin 22.02.2023 tarihli ve E.95428 başvurusu görüşüldü ve aşağıdaki şekilde değerlendirildi.

Başvuru Tarihi:	22.02.2023
Protokol Sıra No:	03-02
Sorumlu Araştırmacıların Adı:	Enes Selman EGE – Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI
Çalıştığı Birim:	Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Proje Çalışmasının Adı:	“Piezoelektrik Eyleyiciler ile Dokunsal Geri Bildirimli Ekran Tasarımı”
Toplantı Tarihi ve Oturum Sayısı:	07.03.2023 – 2023/03-03

Değerlendirme:

Araştırmanın Amacı:

Son 15 yılda tüketici elektroniğindeki teknolojik gelişmelerin hızlanmasına bağlı olarak, dokunum (haptics) artık sadece bilim adamlarının akademik çalışmalar yürüttüğü bir alan olmaktan çıkıp geniş kitleler tarafından ilgi görmeye ve tanınmaya başladı. Bu ilginin en önemli sebebi, cazip ve kolay kullanılabilir arayüze sahip dokunmalı cep telefonlarının hemen hemen herkes tarafından kullanılması ve tuşlu telefonlardan neredeyse tamamen vazgeçilmesidir. Ancak bu sefer de farklı handikaplar ortaya çıkmaya başladı. Bunlardan en önemlisi, dokunmalı telefonları ekrana bakmadan kullanmanın çok zor oluşudur. Kullanıcı, etkileşime girdiği cihazdan uygun bir dokunsal geri bildirim alamadığı için sürekli ekrana bakıp etkileşimin istediği gibi ilerleyip ilerlemediğini kontrol etmek zorundadır. Sonuç olarak kullanıcının bilişsel yükü artmış olur. Özellikle günlük hayatta sıklıkla ihtiyaç duyulabilen trafikte araç kullanma eylemi esnasında dikkatin dağılması hayati önem taşır. Yapılan araştırmalar seyir esnasında cep telefonu kullanmanın alkolü araç kullanmaktan çok daha tehlikeli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu noktada, dokunsal geri bildirimin rolü ortaya çıkar ve kullanıcı başka bir işle meşgul iken dokunmalı ekranlar üzerinde gerçekleştirdiği etkileşimi kolaylaştırır. Böylece sürücünün dikkati daha az dağılmış olur. Sayısız örnekten sadece biri olan motorlu araç sürüşünden yola çıkılacak olursa, birçok alanda kullanılan dokunmalı ekranların dokunsal geri bildirim ile donatılmasının insan hayatını kolaylaştıracağı açıktır.

Araştırmanın amacı saydam piezoelektrik eyleyiciler ile dokunmalı ekranlarda tuş benzeri dokunsal geri bildirimler oluşturmaktır.

Araştırmanın Gerekçesi:

Dokunmalı ekranlarda dokunsal geri bildirim elde etmek için birkaç farklı yöntem vardır. Tez çalışmasında ekran mekanik olarak titreştirilecektir. Bir yüzeyi mekanik olarak titreştirmek için piezoelektrik eyleyiciler, titreşim motorları veya farklı lineer elektromekanik eyleyici düzenekleri kullanılabilir. Bütün bu eyleyicileri gelen görüntüyü engellemeyecek şekilde ekranın kenarlarına veya cihazın uygun herhangi bir yerine yerleştirmek gerekir. Tez çalışmasında kullanılan piezoelektrik (PVDF) eyleyiciler ise saydam yapıda olduğundan ekranın doğrudan altına konumlandırılabilir. Bu çalışmanın literatürde fazla benzeri olmadığından önce eyleyicilerin dokunsal olarak karakterizasyonu yapılmalıdır. Yani yapılması amaçlanan yeni dokunsal ekran tasarımında kullanıcıların dokunsal geri bildirim alabilmesi için söz konusu eyleyicilerin nasıl uyarılması gerektiği, bölgesel olarak geri bildirim verip veremediği, bazı temel etkileri üretip üretmediği gibi temel soruların cevaplanması gerekmektedir.

Araştırmanın Yöntemi:

Söz konusu temel sorular sonlu elemanlar yöntemi yazılım programı COMSOL Multiphysics ile analitik olarak cevaplanmış ve tasarlanan ekran düzeneği simülasyon ortamında doğrulanmıştır. Ayrıca tüketici elektroniği ile doğrudan ilgili bir konu olduğundan deneysel olarak da doğrulanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda düzenek üzerinde birtakım insanlı deneyler yapılması planlanmaktadır.

Çalışmaya Katılacak İnsanlarda Aranacak Özellikler:

	T.C. GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ İNSAN ARAŞTIRMALARI ETİK KURULU KARARLARI
Oturum Tarihi: 07.03.2023	Oturum Sayısı: 2023/03
Çalışmaya katılacak insanların, dokunmatik akıllı telefon kullanımına alışkın olması ve bu cihazlardan gelen temel dokunsal geri bildirimleri algılayabiliyor ve ayırt edebiliyor olmaları yeterlidir.	
Kullanılacak Psikolojik ve Teknik Yöntemler: Dokunmalı ekranlarda dokunsal geri bildirimlerin incelenmesi psikolojinin psikofizik alanıyla ilgilidir. Amacı gerçek fiziksel uyarılar ve algısal deneyimler arasındaki ilişkiyi incelemek olan psikofizik biliminin kurucusu Alman bili madamı Fechner'dir. Psikofizikte genel olarak fiziksel uyarılar dikkatlice ve sistematik olarak değiştirilir ve deneklerin bu uyarıları nasıl algıladıkları incelenip raporlanmaya çalışılır. İnsandaki duyarlar temel olarak iki fonksiyona sahiptir: 1) uyarının kendisi (mutlak eşik) ve 2) değişiklik miktarı (ayrimsal eşik). Mutlak eşik, gözlemcinin (denek) ancak algılayabildiği değerdir. Ayrimsal eşik ise değişken bir uyarının ayırt edilebilir algısal fark oluşturabilmesi için sabit referans uyarısına göre ne kadar değişmesi gerektiğini gösterir. Psikofizik deneylerde sabit uyarı yöntemi zorunlu seçim tekniğiyle birlikte kullanılacaktır. Yani katılımcılar yanıt verirken seçenekler arasında bir seçim yapmak zorundadırlar.	
Etik Özet: Çalışmaya katılacak insanlar tamamen gönüllülerden oluşmaktadır. Kendilerine herhangi bir rahatsızlık hissetmeleri halinde deneyi istedikleri zaman terk edebilecekleri söylenecektir. Rahatça oturacakları bir sandalyede iki farklı deneye katılacaklardır. Oluşması muhtemel yorgunluğun azaltılması adına birinci ve ikinci deneyler farklı günlerde planlanacaktır. Etkileşime girdikleri yüzeyin insan sağlığı açısından herhangi bir tehlikesi bulunmamaktadır. Üretilen titreşimin frekans değerleri 150-325 Hz arasında değişmekte olup parmaklarda herhangi bir rahatsızlığa (uyuşma, karıncalanma, vb.) sebep olmaz.	
Proje Yöneticisi: Enes Selman EGE – Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI	
Proje Araştırmacısı: -	
Projenin Yönetileceği Kuruluş: -	
Olası Tehlikeleri: -	
Araştırmanın nasıl finanse edileceği / Finanse eden kurum: Şahsi olarak finanse edilmektedir.	
Araştırma Bütçesi: 20.000 TL	
İnsan Araştırmaları için kullanılacak tutar: Deneklere herhangi bir ödeme yapılmayacaktır.	
<u>K A R A R</u>	
Kurul Üyelerinin bu çalışma ile ilişkisinin olup olmadığı incelenmiş olup, Kurul üyelerinin bu çalışma ile ilgili bir bağlantısı olmadığı görülmüştür.	
☒	Uygun Üniversitemiz Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Mühendisliği Programı öğrencisi Enes Selman EGE'nin "Piezoelektrik Eyleyiciler ile Dokunsal Geri Bildirimli Ekran Tasarımı" başlıklı projesi kapsamında kullanmak üzere Etik Kurulumuza sunduğu belgeler kurul üyeleri tarafından incelenmiş ve bir sakınca görülmemiş olup kullanımı için etik onayı verilmesine toplantıya katılanların oybirliği ile karar verildi.
☐	Uygun Değildir (Gerekçesi)
☐	Düzeltilmesi Gerekir yada Yeniden Düzenlenmesinden sonra tekrar başvurulması yönünde tavsiye kararı (Tavsiye edilen düzeltmeler ve düzenlemeler)

ASLININ AYNIYDIR
07.03.2023