**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

# KAPASİTİF DOKUNMA ALGILAMA İLE CİNSİYET TANIMA

**MUHAMMED NUR AHMET**

**KOCAELİ 2024**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

# KAPASİTİF DOKUNMA ALGILAMA İLE CİNSİYET TANIMA

**MUHAMMED NUR AHMET**

| | | |
|---|---|---|
| **Prof. Dr. Oğuzhan URHAN** | | |
| **Danışman,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |
| **Prof. Dr. Tülay YILDIRIM** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Yıldız Teknik Üniversitesi** | **.....** |
| **Dr. Öğr. Üyesi Ayhan KÜÇÜKMANİSA** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |
| **Prof. Dr. Bahattin TÜRETKEN** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |
| **Prof. Dr. Özge CİHANBEĞENDİ** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Dokuz Eylül Üniversitesi** | **.....** |

**Tezin Savunulduğu Tarih: 20.12.2024**

## ETIK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler TÜBİTAK TEYDEB tarafından 3201261 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir. Tüm etik ve deneysel prosedür ve protokollerin onayı Kocaeli Üniversitesi Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından verilmiştir (Başvuru No. GOKAEK-2022/16.03).

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Muhammed Nur AHMET

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.
Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

Muhammed Nur AHMET

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Kapasitif algılama temelli çalışan birçok sensör mevcut olup bunlar farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Günümüzde dokunmatik ekranlar ve butonlar, temelinde kapasitif algılamaya dayanan en yaygın sensörlerdir. Cep telefonlarında dokunmatik ekranların kullanılması "Akıllı Telefon" olarak bilinen yeni bir çağ başlatmıştır. Akıllı telefonlar insanların temel iletişimi ihtiyaçlarından fazlasını sunarak gündelik hayata ciddi kolaylıklar getirmiştir. Bu kolaylıklar ise insanların akıllı telefonlarını kişiselleştirebilmelerinden kaynaklıdır. Bu açıdan bakıldığında bir elektronik aletin kişiselleşmesi ve kullanıcının kişisel bilgilerine göre çalışması oldukça önem arz etmektedir. Dokunmatik butonlar da dokunmatik ekranların yaygınlaşmasından etkilenerek elektronik ürünlerin içerisinde daha sık kullanılmaya başlamıştır. Bu tez kapsamında, kullanıcı cinsiyet ve yaş grubunu tespit etme amacıyla özgün bir dokunmatik buton tasarımı ve kapasitif algılama yöntemi geliştirildi. Dokunmatik butonlara kullanıcıların kişisel bilgilerini algılama özelliği, katma elektronik ürünlerde kullanıcının cinsiyet ve yaşına göre farklı çalışma seçenekleri sunma potansiyeli barındırmaktadır. Örneğin, çocuklar için tehlikeli olan aletlerin çalıştırılması bu yaklaşımla engellenebilir veya spor salonlarındaki soyunma odalarına cinsiyet bazlı giriş yapılması sağlanabilir. Bu tez kapsamında geliştirilen özgün algılama yöntemiyle insan fizyolojisi hakkında bilgi edinme potansiyeli olduğundan bu yöntemin sağlık uygulamalarında da kullanılma olasılığı bulunmaktadır. Bazı sağlık problemleri insan vücudunun elektriksel özelliklerini etkilediğinden bu hastalıkların akıllı cihazlar tarafından algılanıp kullanıcıya bildirilmesi mümkün olabilir. Bu tez kapsamında geliştirilen dokunma algılama yöntemi bir basit dokunmayla insan vücudu hakkında bilgi edinmeyi sağlayan öncü bir çalışma olduğu için gelecekte yapılacak birçok çalışma için bir temel oluşturma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan denemelerde bana yardımcı olan, maddi ve manevi destekleriyle her daima yanımda olan aileme en samimi duygularımla teşekkür ederim. Bu tez çalışmamda, bilgileri ve deneyimiyle beni yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. Oğuzhan URHAN, tecrübeleriyle bana destek olan Prof. Dr. Tülay YILDIRIM, Prof. Dr. Ayşe KARSON, Dr. Öğr. Üyesi Ayhan KÜÇÜKMANİSA hocalarıma ve bilimsel açıdan beni yetiştiren Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümündeki hocalarıma teşekkür ederim.

Aralık-2024 Muhammed Nur AHMET

## İÇİNDEKİLER

ETIK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ ..... i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ..... ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... iii
İÇİNDEKİLER ..... iv
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... vi
TABLOLAR DİZİNİ ..... ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... xi
ÖZET ..... xii
ABSTRACT ..... xiii
1. GİRİŞ ..... 1
2. GENEL BİLGİLER ..... 5
2.1. Filtreler ..... 5
2.2. İletim Hatları ..... 9
2.3. Saçılma Parametreleri (S-parametre) ..... 12
2.4. İnsan Vücudundaki Dokuların Elektriksel Özellikleri ..... 14
2.5. Denetimli Makine Öğrenmesi ..... 17
3. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR ..... 20
3.1. Dış Görünüş Temelli Yöntemler ..... 20
3.2. Biyosinyal Temelli Yöntemler ..... 24
3.3. Biyometrik Yöntemler ..... 26
3.4. Dokunmatik Ekranlarla Yapılan Çalışmalar ..... 29
3.5. Literatürdeki Yöntemlerin Değerlendirilmesi ..... 36
3.6. Kapasitif Dokunma Algılama için Önerilen Yöntemler ..... 38
4. GELİŞTİRİLEN YÖNTEMLER ..... 44
4.1. FTKA için Devre Tasarımı ..... 46
4.2. FTKA için Üretilen Devre Kartıyla Veri Toplama ..... 52
4.3. Frekans Taramalı Kapasitif Algılamayı Etkileyen Faktörler ..... 57
4.4. Dokunma Algılama için Yeni Yaklaşım: Düzlemsel Prob Yöntemi ..... 61
4.5. DPY ile Cinsiyet Sınıflandırma ..... 69
4.6. Dokunma Davranışlarının S-parametre Ölçümlerine Etkisi ..... 71
4.7. DPY ile Yaş Grubu Sınıflandırma ..... 74
4.8. VNA Port 1 Kalibrasyonu ..... 75
4.9. Veri Toplamaya Katılacak Kişi Sayısının Belirlenmesi ..... 79
4.10. HF/VHF Frekans Bantlarındaki Elektriksel Sinyallerin İnsan Cismine Etkisi ..... 83
4.11. Veri Toplama Prosedürü ..... 85
5. DENEYSEL SONUÇLAR ..... 87
5.1. Cinsiyet Sınıflandırması için Veri Toplama ..... 89
5.2. Katılımcı Verilerinin Analizi ..... 92
5.3. El Sıcaklığının Etkisi ..... 97
5.4. El Neminin Etkisi ..... 99
5.5. Dokunma Kuvvetinin Etkisi ..... 100
5.6. Dokunmatik Buton Yeri ve Boyutunun Etkisi ..... 102
5.7. S-Parametre Ölçümlerinin Tutarlılığı ..... 104
5.8. Öznitelik Seçimi ve Sınıflandırıcı Eğitimi ..... 106
5.9. DPY ile FTKA Yaklaşımlarının Karşılaştırılması ..... 108

5.10. FTKA ile Dokunma Şekli Algılama ..... 109
5.11. Farklı İstatiksel Güç Seviyeleri için Gerekli Katılımcı Sayısı (Yaş Grubu)..... 112
5.12. Yaş Grubu Verilerinin Cinsiyet Bilgisi Dahil Edilerek Analizi ..... 114
5.13. Ortamın Etkisi ..... 120
5.14. Sınıflandırıcı Genelleme Performansının İncelenmesi..... 124
5.15. Öznitelik Seçimiyle Sınıflandırıcı Genellemesini Arttırma (Cinsiyet)..... 126
5.16. Tek ve İki Parmaklı Dokunma Durumlarının Karşılaştırılması..... 129
5.17. Ultra Yüksek Frekans Bandında DPY ile Cinsiyet Tespiti..... 131
5.18. DPY ile Literatürdeki Yöntemlerin Karşılaştırılması..... 132
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 135
KAYNAKLAR ..... 140
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER..... 147
ÖZGEÇMİŞ..... 148

## ŞEKİLLER DİZİNİ


Şekil 2.1. Alçak Geçiren Filtre (a) RC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı ..... 6
Şekil 2.2. Yüksek Geçiren Filtre (a) RC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı ..... 7
Şekil 2.3. Bant Geçiren Filtre (a) RLC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı ..... 8
Şekil 2.4. Bant Durduran Filtre (a) RLC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı ..... 8
Şekil 2.5. Elektriksel güç kaynağı, yük ve iletim hattı ..... 10
Şekil 2.6. İki kapılı devre örneği ..... 13
Şekil 2.7. Tek kaplı devre örneği ..... 14
Şekil 2.8. Biyolojik dokuların elektriksel devre modeli ..... 15
Şekil 2.9. Kol ön-kısmındaki deri dokusunun frekansa bağlı elektriksel özellikleri ..... 16
Şekil 3.1. Kullanıcı ayağıyla döşeme arasında oluşan kapasitans ..... 30
Şekil 3.2. Dokunma jestleriyle cinsiyet algılama ..... 31
Şekil 3.3. Dokunma jestleriyle cinsiyet sınıflandırması ..... 36
Şekil 3.4. P-Cap kapasitif dokunma algılamada ölçülen kapasitans değişimleri: (a) öz kapasitans ve (b) karşılıklı kapasitans. ..... 39
Şekil 3.5. Yük transferi yaklaşımıyla kapasitif dokunma algılama ..... 40
Şekil 3.6. Frekans taramalı kapasitif algılama devresinin blok diyagramı. ..... 41
Şekil 3.7. Meta-materyal temelli bir dokunma algılama ..... 42
Şekil 4.1. (a) bant durduran filtre şeması (b) bant durduran filtre yanıtı ..... 46
Şekil 4.2. Si5351 kare dalga kaynağı içeren prototip FTKA devresinin blok diyagramı ..... 47
Şekil 4.3. FTKA temelli çalışan dokunmatik buton için (a) tasarlanan prototip devre ve (b) elde edilen filtre yanıtı ..... 49
Şekil 4.4. FTKA temelli çalışan dokunmatik butonlar için üretilen baskı devrenin blok diyagramı ..... 50
Şekil 4.5. FTKA temelli çalışan dokunmatik butonlar için üretilen baskı devre kartı ..... 50
Şekil 4.6. FTKA devresiyle veri toplama için tasarlanan kullanıcı arayüzü. ..... 51
Şekil 4.7. 1'inci veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları ..... 52
Şekil 4.8. 2'nci veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları ..... 53
Şekil 4.9. 3'üncü veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları ..... 53
Şekil 4.10. 4'üncü veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları ..... 54
Şekil 4.11. 5'inci veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları ..... 56
Şekil 4.12. FTKA devresinde dokunma şiddetinin kapasitif profile etkisi ..... 57
Şekil 4.13. Farklı zamanlarda dokunmanın kapasitif profile etkisi ..... 58
Şekil 4.14. Farklı ortamlarda dokunmanın kapasitif profile etkisi ..... 59
Şekil 4.15. Farklı dokunma davranışlarının kapasitif profile etkisi ..... 60
Şekil 4.16. İnsan vücudunun N kapılı devre modelinde ölçüm için kullanılan iki kapı. ..... 61
Şekil 4.17. Düzlemsel prob çiftinin boyutları ..... 63
Şekil 4.18. Düzlemsel prob çiftinin S-parametre simülasyon sonucu ..... 65

Şekil 4.19. Düzlemsel prob çiftinin elektrik alan simülasyonu: (a) 3MHz ve (b) 330MHz ..... 65
Şekil 4.20. Düzlemsel prob çiftinin uzak alan simülasyonu: (a) 3MHz ve (b) 330MHz ..... 66
Şekil 4.21. NanoVNA ile düzlemsel prob çiftinden veri toplama için tasarlanan MATLAB GUI..... 66
Şekil 4.22. Tez kapsamında geliştirilen Düzlemsel Prob Yönteminin uygulama senaryosu ..... 67
Şekil 4.23. Veri toplama kurulumu ..... 68
Şekil 4.24. DPY ile cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S11$ verileri: (a) Smith grafiği ve (b) genlik grafiği ..... 70
Şekil 4.25. DPY ile cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S21$ genlik verileri. ..... 71
Şekil 4.26. Farklı dokunma davranışlarının S-parametre ölçümlerine etkisi..... 72
Şekil 4.27. DPY ile yaş grubu sınıflandırması için toplanan $S11$ verileri: (a) Smith grafiği ve (b) genlik grafiği ..... 73
Şekil 4.28. DPY ile yaş grubu sınıflandırması için toplanan $S21$ genlik verileri. ..... 74
Şekil 4.29. VNA ölçüm hataları ..... 75
Şekil 4.30. Cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S11$ verilerinin VNA kalibrasyonu sonucu: (a) kalibrasyonsuz veriler ve (b) kalibrasyonlu veriler. ..... 78
Şekil 4.31. Hipotez testi için yapılan bir deneyin olası sonuçları ..... 80
Şekil 4.32. NanoVNA v2 PORT1 gerilimi (50 Ω yük): (a) 1 MHz, (b) 10 MHz, (c) 30 MHz ve (d) 100 MHz ..... 84
Şekil 4.33. DPY ile veri toplama prosedürünün grafiksel özeti..... 85
Şekil 5.1. DPY kullanılarak 56 katılımcıdan toplanan $S11$ genlik verileri. ..... 90
Şekil 5.2. DPY kullanılarak 56 katılımcıdan toplanan $S11$ faz verileri..... 90
Şekil 5.3. DPY kullanılarak 56 katılımcıdan toplanan $S21$ genlik verileri. ..... 91
Şekil 5.4. Katılımcıların boy ve kilo verileri. ..... 93
Şekil 5.5. Aynı boydaki katılımcıların: (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ faz verileri..... 93
Şekil 5.6. Aynı boydaki katılımcıların $S21$ genlik verileri ..... 94
Şekil 5.7. Aynı kilodaki katılımcıların: (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ faz verileri ..... 95
Şekil 5.8. Aynı kilodaki katılımcıların $S21$ genlik verileri ..... 96
Şekil 5.9. Katılımcıların BMI verileri. ..... 96
Şekil 5.10. Farklı el sıcaklıklarında ölçülen (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ fazları. ..... 98
Şekil 5.11. Farklı el sıcaklıklarında ölçülen $S21$ genlikleri..... 98
Şekil 5.12. Farklı el nemi oranlarında ölçülen (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ fazları. ..... 99
Şekil 5.13. Farklı el sıcaklıklarında ölçülen $S21$ genlikleri..... 100
Şekil 5.14. Farklı dokunma kuvvetlerinde (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ fazları..... 101
Şekil 5.15. Farklı dokunma kuvvetlerinde $S11$ genlikleri. ..... 101
Şekil 5.16. Farklı buton düzenlerinde (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ fazları..... 103
Şekil 5.17. Farklı buton düzenlerinde $S21$ genlikleri. ..... 103
Şekil 5.18. Dokunma zamanına bağlı (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ fazları ..... 104
Şekil 5.19. Dokunma zamanına bağlı $S21$ genlikleri ..... 105
Şekil 5.20. FTKA devresiyle toplanan filtre yanıtları. ..... 108
Şekil 5.21. Yanlış dokunmaları tespit etmek amacıyla yapılan buton tasarımı .....110

Şekil 5.22. FTKA devresiyle toplanan dokunma davranışlarının filtre yanıtları ..... 111
Şekil 5.23. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edilmesi: (a) $S11$ genlik ve (b) $S11$ Faz verileri. ..... 115
Şekil 5.24. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edilmesi: $S21$ genlik verileri. ..... 115
Şekil 5.25. $S11$ Faz verileri: (a) erkek çocuk ile kız çocuk, (b) yetişkin erkek ile yetişkin kadın, (c) yetişkin erkek ile erkek çocuk ve (d) Yetişkin kadın ile kız çocuk ..... 117
Şekil 5.26. $S11$ Genlik verileri: (a) erkek çocuk ile kız çocuk, (b) yetişkin erkek ile yetişkin kadın, (c) yetişkin erkek ile erkek çocuk ve (d) Yetişkin kadın ile kız çocuk ..... 118
Şekil 5.27. $S21$ Genlik verileri: (a) erkek çocuk ile kız çocuk, (b) yetişkin erkek ile yetişkin kadın, (c) yetişkin erkek ile erkek çocuk ve (d) Yetişkin kadın ile kız çocuk ..... 119
Şekil 5.28. Aynı katılımcılarla iki farklı ortamda HF ve VHF bantlarında toplanan $S11$ genliğinin ortama bağlı değişimi. ..... 120
Şekil 5.29. Aynı katılımcılarla iki farklı ortamda HF ve VHF bantlarında toplanan $S11$ fazının ortama bağlı değişimi. ..... 121
Şekil 5.30. Aynı katılımcılarla iki farklı ortamda HF ve VHF bantlarında toplanan S-parametre verilerinin ortama bağlı değişimi ($S21$ genliği için). ..... 121
Şekil 5.31. Sol kolun 210 MHz frekansında ortama yaydığı EM dalgalar: butona dokunma olmadığı durum mor ve dokunma durumu yeşil renkle gösterilmektedir. ..... 124
Şekil 5.32. Veri Seti #5'ten 2 erkek ve 2 kadın katılımcıyla iki farklı ortamda toplanan S-parametre verilerinin ortama bağlı değişimi ($S11$ genliği için). ..... 127
Şekil 5.33. Farklı dokunma davranışları için DPY devresiyle toplanan $S11$ verileri ..... 127
Şekil 5.34. Cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S11$ genlikleri: (a) iki başparmakla dokunma verileri (Veri Seti #3) ve (b) sol başparmakla dokunma verileri (Veri Seti #4) ..... 129
Şekil 5.35. UHF ve L bant frekanslarında cinsiyet sınıflandırması için toplanan: (a) $S11$ genlikleri ve (b) $S11$ fazları ..... 131
Şekil 5.36. UHF ve L bant frekanslarında cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S11$ genlikleri ..... 132

## TABLOLAR DİZİNİ


Tablo 2.1. Bazı vücut dokularının 6,3 GHz frekansındaki elektriksel özellikleri ..... 16
Tablo 3.1. Cinsiyet sınıflandırması için önerilen dış görüntü temelli yöntemlerin özeti ..... 23
Tablo 3.2. Yaş grubu sınıflandırması için önerilen dış görüntü temelli yöntemlerin özeti ..... 23
Tablo 3.3. Cinsiyet sınıflandırması için önerilen biyosinyal temelli yöntemlerin özeti ..... 26
Tablo 3.4. Yaş grubu sınıflandırması için önerilen biyosinyal temelli yöntemlerin özeti ..... 26
Tablo 3.5. Cinsiyet sınıflandırması için biyometrik özellikleri kullanan bazı yöntemlerin özeti ..... 28
Tablo 3.6. Yaş grubu sınıflandırması için biyometrik özellikleri kullanan bazı yöntemlerin özeti ..... 28
Tablo 3.7. Cinsiyet sınıflandırması için dokunmatik ekran veya kapasitif algılama kullanan bazı yöntemlerin özeti ..... 34
Tablo 3.8. Yaş grubu sınıflandırması için dokunmatik ekran kullanan bazı yöntemlerin özeti ..... 35
Tablo 3.9. Cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırmasını değerlendirme amacıyla önerilen performans ölçütleri ..... 37
Tablo 3.10. Literatürdeki yöntemlerin performans değerlendirmesi ..... 38
Tablo 4.1. FTKA yöntemiyle yapılan veri toplamalardaki devre durumu ..... 54
Tablo 4.2. Yalıtkan dokunmatik butonla yapılan veri toplama sonucu (cinsiyet) ..... 55
Tablo 4.3. İletken dokunmatik butonla yapılan veri toplama sonucu (cinsiyet) ..... 55
Tablo 4.4. Toplanan verilerin istatistiksel anlamlı olması için gereken maksimum katılımcı sayısı. ..... 82
Tablo 4.5. Toplanan verilerin istatistiksel anlamlı olması için gereken minimum katılımcı sayısı. ..... 83
Tablo 4.6. HF, VHF ve UHF bantlarının Frekans aralıkları. ..... 83
Tablo 4.7. Maksimum temas akım değerleri ..... 83
Tablo 5.1. Cinsiyet sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama) ..... 92
Tablo 5.2. Aynı boydaki katılımcıların bilgisi ..... 94
Tablo 5.3. Aynı kilodaki katılımcıların bilgisi ..... 95
Tablo 5.4. Aynı BMI aralığında olan katılımcıların sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama) ..... 97
Tablo 5.5. İleri yönlü öznitelik seçimiyle belirlenen öznitelikler (cinsiyet sınıflandırması) ..... 106
Tablo 5.6. İleri yönlü öznitelik seçimiyle belirlenen öznitelikler (yaş grubu sınıflandırması) ..... 106
Tablo 5.7. Yaş grubu sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama) ..... 107
Tablo 5.8. Cinsiyet sınıflandırması için en yüksek doğruluğu veren sınıflandırıcının (Lineer DVM) karışıklık matrisi ..... 107
Tablo 5.9. Yaş grubu sınıflandırması için en yüksek doğruluğu veren sınıflandırıcının (Lineer DVM) karışıklık matrisi ..... 108

Tablo 5.10. Cinsiyet sınıflandırması için ileri yönlü öznitelik seçimiyle belirlenen öznitelikler (FTKA) ..... 109
Tablo 5.11. Yanlış dokunmaları algılama için tasarlanan butona uygulanan Frekans taramasının bilgileri. .....111
Tablo 5.12. Davranış şekli algılamanın sınıflandırma sonuçları .....112
Tablo 5.13. İleri öznitelik seçimi yöntemiyle belirlenen öznitelikler (yaş grubu).....113
Tablo 5.14. %80 seviyesinde istatistiksel güç için 29 kişi veya daha az katılımcı gerektiren öznitelikler (yaş grubu sınıflandırması) .....113
Tablo 5.15. %80 seviyesinde istatistiksel güç için seçilen özniteliklerle yaş grubu sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama).....114
Tablo 5.16. Yaş grubu sınıflandırması için En yüksek doğruluğu veren sınıflandırıcının (KNN, k = 3) karışıklık matrisi .....114
Tablo 5.17. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edildikten sonra elde edilen sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama) .....116
Tablo 5.18. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edildikten sonra KNN (k = 3) için elde edilen karışıklık matrisi .....116
Tablo 5.19. Spektrum analizörünün ayarlanması..... 123
Tablo 5.20. Cinsiyet sınıflandırması için DPY kullanılarak oluşturulan veri setleri..... 125
Tablo 5.21. Sınıflandırıcı #1 için veri setlerinden elde edilen doğruluk ve bağıl hata değerleri. ..... 126
Tablo 5.22. Cinsiyet sınıflandırıcı genellemesini arttırmak için seçilen özniteliklerle elde edilen sonuçlar (5 katlı çapraz doğrulama)..... 128
Tablo 5.23. Cinsiyet sınıflandırması için en iyi genelleme sonucunu veren sınıflandırıcının (Lineer DVM) karışıklık matrisi ..... 128
Tablo 5.24. Sınıflandırıcı #1 ve #2 için veri setlerinden elde edilen doğruluk ve hata değerleri..... 129
Tablo 5.25. DPY doğruluğunun literatürdeki cinsiyet sınıflandıran yöntemlerle karşılaştırılması..... 133
Tablo 5.26. DPY doğruluğunun literatürdeki yaş grubu sınıflandıran yöntemlerle karşılaştırılması..... 134

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$c$ : Işık hızı, (m/s)
E : Elektrik alan, (V/m)
$f$ : İşaret frekansı, (Hz)
H : Manyetik alan, (A/m)
$\varepsilon$ : Elektriksel geçirgenlik, (F/m)
$\lambda$ : Dalga boyu, (m)
$R$ : Direnç, (Ω)
$S_{ij}$ : Devrenin i ve j portları için ölçülen S-parametre, (birimsiz)
$X$ : Reaktans, (Ω)
$Z$ : Empedans, (Ω)
Γ : Yansıma katsayısı, (birimsiz)

### Kısaltmalar

ADC : Analog to Digital Converter (Analogdan Sayısala Çevirici)
ANN : Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağı)
CNN : Convolutional Neural Network (Evrişimsel Sinir Ağı)
CWT : Continuous Wavelet Transform (Sürekli Dalgacık Dönüşümü)
DPY : Düzlemsel Prob Yöntemi
DVM : Destek Vektör Makinesi
DWT : Discrete Wavelet Transform (Ayrık Dalgacık Dönüşümü)
EEG : Elektroensefalografi
EKG : Elektrokardiyografi
EM : Elektromanyetik
EMG : Elektromiyografi
FTKA : Frekans Taramalı Kapasitif Algılama
GRU : Gated Recurrent Unit (Kapılı Tekrarlayan Birim)
HOG : Histogram of Oriented Gradients (Yönlendirilmiş Gradyanların Histogramı)
IMU : Inertial Measurement Unit (Eylemsizlik Ölçüm Birimi)
KNN : k-Nearest Neighbors (k-en Yakın Komşular)
LBP : Local Binary Pattern (Yerel İkili Örüntü)
OPAMP : Operational Amplifier (İşlemsel Yükselteç)
RC : Resistor Capacitor (Direnç Kondansatör)
RLC : Resistor coiL Capacitor (Direnç Bobin Kondansatör)
PCA : Principal Component Analysis (Temel Bileşenler Analizi)
PCB : Printed Circuit Board (Baskı Devre Kartı)
SVM : Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)
VNA : Vector Network Analyzer (Vektör Ağ Analizörü)

## KAPASİTİF DOKUNMA ALGILAMA İLE CİNSİYET TANIMA

## ÖZET

Dokunma algılama, dokunmatik ekran ve dokunmatik buton tasarımı için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Yüksek hassasiyetli ve düşük hatalı olmalarından dolayı başta akıllı telefonlar olmak üzere birçok tüketici elektroniğinde kapasitif dokunma algılama yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında kapasitif algılamayla kullanıcı cinsiyeti ve yaş grubu bilgisinin kestirilmesi amaçlanmaktadır. Cinsiyet ve yaşa bağlı olarak kullanıcıların vücut fizyolojisinde farklılıklar bulunmaktadır. Fizyolojik farklılıklar vücudun elektriksel özelliklerinde de farklılığa neden olmaktadır. Vücudun elektriksel özelliklerini ve farklı frekanslardaki elektriksel sinyallere verdiği tepkiyi ölçmek için tez kapsamında iki devre geliştirildi. Kullanıcı vücuduyla ölçüm devresi arasındaki bağlantı dokunmatik butonlarla sağlandı. Geliştirilen ilk devre sadece kapasitans ölçmekte ve kullanıcının bulunduğu ortamdan oldukça etkilenmektedir. Tek başına kapasitans ölçümü kullanıcıların dokunma davranışını algılamada başarılı bir şekilde çalışmakta ama kişisel bilgilerin kestiriminde aynı başarıyı sergilememektedir. Geliştirilen ikinci devre S-parametre ölçümleriyle dokunma algılamayı gerçekleştirmektedir. S-parametre ölçümü kullanıcı vücudunun kapasitansıyla birlikte elektriksel direncini de içermektedir. Bu yöntemde kullanıcı ile devre arasındaki bağlantı iki adet dokunmatik buton ile sağlanıp ve kullanıcı elektriksel açıdan N kapılı bir devre gibi modellenmiştir ancak ölçümler iki kapıdan alınmıştır. İki kapıdan alınan ölçümler sayesinde kullanıcının bulunduğu ortamın ölçümlere etkisi azaltıldı. S-parametre ölçümleri için Vektör Ağ Analizörü (VNA) kullanılıp veri toplama için grafiksel bir kullanıcı arayüzü tasarlandı. 28 erkek ile 28 kadın katılımcıdan toplanan S-parametre verileriyle Lineer DVM sınıflandırıcısı kullanılarak %92,9 seviyesinde cinsiyet sınıflandırması doğruluğu elde edildi. Yaş grubu sınıflandırması için 15 çocuk ile 14 yetişkinden toplanan S-parametre verileriyle eğitilen Lineer DVM yöntemi ile %89,7 yaş gurubu sınıflandırma doğruluğu elde edildi. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, tez kapsamında geliştirilen S-parametre ölçümüyle cinsiyet ve yaş grubu tespiti yapan yaklaşımın basit yapılı ve düşük maliyetli bir çözüm sunduğu değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Cinsiyet Sınıflandırması, Kapasitif Dokunma Algılama, Makine Öğrenmesi, S-parametre, Yaş Grubu Sınıflandırması.

## GENDER RECOGNITION WITH CAPACITIVE TOUCH SENSING

## ABSTRACT

In the literature, many methods exist for touch sensing, touch screen, and touch button design. Due to its high sensitivity and low error, capacitive touch sensing is widely used in many consumer electronics, especially smartphones. This dissertation aims to estimate user gender and age group information by capacitive sensing. There are differences in the body physiology of the users depending on their gender and age. Physiological differences also cause differences in the electrical properties of the body. Two circuits were developed within the scope of the dissertation to measure the body's electrical properties and response to electrical signals at different frequencies. Touch buttons connect the user's body and the measurement circuit. The first circuit developed only measures capacitance and is highly affected by the user's surrounding environment. Capacitance measurement alone successfully detects users' touch behavior, but it is not as successful in estimating personal information. The second circuit developed performs touch detection with S-parameter measurements. S-parameter measurement includes the electrical resistance and capacitance of the user body. In this method, the connection between the user and the circuit is provided by two touch buttons and the user is electrically modeled as an N-port circuit, but the measurements are taken from two ports. Thanks to the measurements taken from two ports, the effect of the user's environment on the measurements is reduced. A Vector Network Analyzer (VNA) was used for S-parameter measurements, and a graphical user interface was designed for data collection. Gender classification accuracy of 92.9% was achieved using the Linear SVM classifier with S-parameter data collected from 28 male and 28 female participants. For age group classification, 89.7% accuracy was achieved with the Linear SVM method trained with S-parameter data collected from 15 children and 14 adults. When compared with the works in the literature, it is evaluated that the approach that determines gender and age group with the S-parameter measurement developed within the scope of the thesis offers a simple and low-cost solution.

**Keywords:** Gender Classification, Capacitive Touch Sensing, Machine Learning, S-parameter, Age Group Classification.

# 1. GİRİŞ

Dokunma algılama günümüzde özellikle tüketici elektroniğinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dokunma algılama birçok elektronik aygıta giriş veya komut vermede kullanılmakta olup dokunmatik ekran içeren akıllı cihazlarda kullanıcı arayüzü tasarımını basitleştirmekte ve verimli hale getirmektedir. Bu tip uygulamalarda buton veya ekran gibi düzlemsel yüzeylerde belirli bir bölgeye dokunma olup olmadığı tespit edilmektedir.

Literatürde dokunma algılamayı gerçekleştirmek ve dokunmatik yüzey ve buton tasarımı ile ilgili birçok yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemlerin arasında önem çıkan kapasitif dokunma algılama yaklaşımı, bir elektronik devreye insan cisminin müdahalesi sonucunda oluşan kapasitans değişiminin ölçülmesiyle çalışmaktadır. Tüketici elektroniğinde bir yüzey üzerinde dokunma konumunu bulma ve bazı davranışları (ekrana veya butona basarken kullanıcının uyguladığı kuvvet gibi) tespit etmek özellikle akıllı telefon, tablet vb. arayüzlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı elektronik eşyalarda ise (ör: çamaşır makinesi, fırın, kahve makinesi vb.) fiziksel mekanik butonların yerine dokunmatik butonlar kullanılarak daha etkin kullanıcı arayüzlerinin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır. Bu tip uygulamalarda temel olarak kullanıcının bir butona veya yüzeydeki/ekrandaki belirli bir alana dokunup dokunmadığı tespit edilmektedir.

Bu tez kapsamında ise dokunmatik butonların sadece basma eyleminin yapılıp yapılmadığını değil aynı zamanda butona/yüzeye basan/dokunan kişinin bazı kişisel bilgilerini elde etmek amacıyla kullanılıp kullanılamayacağı ele alınmıştır. Bu çerçevede özellikle dokunmatik butona basan kişinin cinsiyeti ve yaş grubunun (yetişkin/çocuk) tespiti irdelenmiştir.

Bir kullanıcıya ait kişisel bilgiler, tanımlama (parmak izi gibi) veya gruplandırma (cinsiyet bilgisi gibi) amaçlı kullanılabilmektedir. Kişileri gruplandırmaya yarayan cinsiyet ve yaş grubu bilgisinin otomatik olarak elde edilmesi tüketici elektroniğinde, ticari ve güvenlik amaçlı uygulama potansiyeline sahiptir olarak (Jain ve diğ., 2004). Örneğin spor salonlarındaki soyunma odalarına giriş amaçlı cinsiyet ayrımı yapabilen bir dokunmatik buton veya çoklu biyometri ile çalışan bir güvenlik sistemine ek bir güvenlik katmanı dokunmatik butonla ölçülen fiziksel bilgilerin kullanımı söz konusu olabilir.

Yaş grubu bilgisinin basit ve etkin bir yaklaşımla tespitinin tüketici elektroniğinde farklı bir kullanımları olabileceği değerlendirilmektedir. Örneğin, çocuklar için tehlikeli olabilecek ocak ve fırın gibi bazı ev aletlerinin kullanması yaş grubu ayrımı yapabilen bir dokunmatik buton kullanımı ile engellenebilir. Ya da motorlu taşıtlarda aracın çalıştırılması veya kapıların içeriden açılmasının (çocuk kilidi) sadece yetişkinler tarafından yapılabilmesi bu tip bir dokunmatik butonla sağlanabilir.

Literatürde cinsiyet ve yaş grubu bilgisini dokunmatik ekranlardan elde eden çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar genellikle dokunma hareketlerine (gesture) odaklanarak çalışmaktadır. Ancak her elektronik cihazda bir dokunmatik ekran kullanımı hem maliyet açısından hem de işlevsellik açısından mümkün değildir. Kapasitif algılama temelli çalışan dokunmatik butonlar ise hem düşük maliyet hem de basit iletken yüzeylerden oluştuğu için birçok cihaza kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Ancak kapasitif algılama temelli çalışan dokunmatik butonlardan cinsiyet ve yaş grubu bilgisini elde eden bir çalışma literatürde bulunmamaktadır.

Dokunmatik butona dokunma olduğunda, dokunan kişinin (kullanıcının) vücut fiziği ve elini kullanma şekli butonun elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Kullanıcının butona yaptığı etki uygun bir dokunma algılama yöntemiyle ölçülebilmektedir. Tez kapsamında dokunma algılama için ilk olarak Frekans Taramalı Kapasitif Algılama (FTKA) (Sato ve diğ., 2012) yöntemiyle denemeler yapılmış, ancak yapılan detaylı incelemeler sonrasında bu yöntemin tezin amacı için uygun olmadığı ortaya çıkmıştır. FTKA yöntemi kullanılarak ölçülen kapasitans kapasitif profili dokunan kişinin vücudunun tamamından etkilendiği tespit edilmiştir. Vücudun tamamı ölçüme dahil olduğunda ise yapılan kapasitif profil ölçümü ölçümün yapıldığı ortamdan ve ortamdaki nesnelerden etkilenebilmektedir. Bu durum kapasitif profil kullanılarak verilecek kararların hatalı olmasına neden olabilmektedir.

Tıbbi alanda yapılan bir çalışmada (Mayrovitz ve diğ., 2016) ortak eksenli (koaksiyel) problar kullanılarak erkek ve kadın katılımcılardan elektriksel ölçümler alınmış ve kol ön-kısmının elektriksel geçirgenliğinin cinsiyete göre değişti tespit edilmiştir. (Mayrovitz ve diğ., 2016)'daki çalışma dikkate alınarak, cinsiyet sınıflandırması için aranan fizyolojik farklılığın kol ön kısmında olabileceği düşünülmüştür. Bu sebeple dokunmayla kullanıcıya iletilen elektriksel sinyallerin dokunan parmak ucundan kola doğru

yayılmasını ve vücudun geri kalanına mümkün mertebe hiç yayılmamasını sağlayan yeni bir yöntem bulmak için çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu konuda yeni bir yaklaşım geliştirilmesi aşamasında elektromanyetik dalgaların yayılımıyla ilgili teoriden yararlanılmıştır. Biyolojik dokular gibi iletkenliği olan ortamlarda, elektromanyetik dalgaların (EM dalgaların) frekansı arttıkça yayılma derinliği azalmaktadır. Literatürde ve tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan elektriksel sinyaller zamanla değişen sinyaller olduğu için elektromanyetik dalgalar oluşturmaktadır. Yüksek frekanslarda çalışan bir devre ile dokunma algılama yapıldığında, EM dalgalar vücudun tamamı yerine sadece dokunan parmağa yakın bölgelerde yayılmaktadır (kol ön-kısmı gibi).

Bu çerçevede tezde elektromanyetik dalgaları dokunan parmaktan kolun ön kısmına iletebilecek yeni bir devre tasarlayarak insan vücudunu elektriksel olarak daha tutarlı bir şekilde tanımlayan yeni bir elektriksel vücut modeli oluşturmak için çalışmalar yapıldı.

Bu tez kapsamında, FTKA yöntemiyle yapılan ölçümlerde insan vücudu, elektronik devrede kapasitans değişimine neden olan bir kondansatör plakası gibi analiz edilirken geliştirilen yeni yöntemde insan vücudu N kapılı bir devre olarak modellenerek ölçümler sadece iki kapıdan alındı. Bu modellemeye göre ölçüm için kullanılan iki kapıdan giriş kapısı kullanıcının sol başparmağı olurken çıkış kapısı sağ başparmak oldu.

Yeni yöntemde insan vücudunun elektriksel özelliklerini ölçmek için tasarlanan devre kartında, karesel şekilde küçük alana sahip iki adet dokunmatik buton bulunmaktadır. Elektriksel ölçümleri gerçekleştirmek için NanoVNA v2 adlı düşük maliyetli bir Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer VNA) kullanıldı. Butonların birisi VNA'nin PORT1 diğeri PORT2 uçlarına RG316 koaksiyel kabloları kullanılarak bağlandı. VNA'nın ürettiği sinyaller sol başparmaktan sol kolun ön kısmına iletilmektedir. Vücut dokularının iletkenliğinden dolayı VNA'den sol başparmağa iletilen sinyallerin çok az bir kısmı sağ kol üzerinden sağ başparmağa ulaşmaktadır.

Devre kartı üzerindeki butonlar yüksek frekanslı elektriksel ölçümler yapmak için bir prob olarak kullanıldığından, tez kapsamında önerilen yöntem Düzlemsel Prob Yöntemi (DPY) olarak isimlendirilmiştir.

Veri toplamaya başlamadan önce bir veri toplama prosedürü belirlenip katılımcı sayısının yeterli olup olmadığını tespit etmek için istatistiksel güç analizi yapılmıştır. Cinsiyet sınıflandırması amacıyla toplanan verilerden öznitelik seçimi yapılarak makine öğrenmesinde kullanılan sınıflandırıcılar eğitilmiştir. Eğitim sonucunda, cinsiyet için %92 seviyesinde sınıflandırma doğruluğu elde edilirken, yaş grubu sınıflandırması için yapılan ön çalışma kapsamında toplanan sınırlı veri ile %89 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen DPY, dokunmatik butonlar ile kullanıcının cinsiyet bilgisinin uygun maliyetli elektronik cihazlar tarafından otomatik olarak elde edilmesine olanak sağlayan ve dokunmatik butonlarla cinsiyet kestirimi yapan ilk çalışma olma niteliğindedir. Ek olarak, bu tez çalışmasında dokunmatik butonlarla yaş grubu tespiti için de bir ön çalışma yapılmış ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir.

Özetle, DPY ile literatüre yeni bir dokunma algılama yaklaşımı kazandırmıştır. DPY, cinsiyet sınıflandırması açısından literatürdeki diğer yöntemlere göre en basit yapılı devreyi, en anlaşılabilir yöntemi ve düşük maliyetli çözümü sunmaktadır. Tezin sonraki bölümleri aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

- 2’nci bölümde literatürde ve tez kapsamında yapılan çalışmaların anlaşılması için bilinmesi gereken genel bilgiler verilmiştir.
- 3’üncü bölümde dokunma algılama, cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırmasıyla ilgili literatürdeki çalışmalar anlatılmıştır.
- 4’üncü bölümde tez kapsamında kullanılan FTKA yöntemi ve FTKA yönteminin yetersizliğinden dolayı geliştirilen yeni yöntem olan DPY açıklanmıştır.
- 5’inci bölümde DPY ile veri toplama süreci ve elde edilen deneysel sonuçlar anlatılmıştır.
- 6’ncı bölümde tez kapsamında yapılan çalışma ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Tezde anlatılan bilgiler temel alınarak gelecekte yapılabilecek olası çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. GENEL BİLGİLER

Tez kapsamında geliştirilen yöntemler cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırması için bu gruplar arasındaki fizyolojik farklılıkları elektriksel ölçümlerle algılayıp kullanıcının hangi sınıfa ait olduğuna karar vermeyi hedeflemektedir. Geliştirilen yöntemlerin temelinin anlaşılmasına yardımcı olacağı düşünülerek bu bölümde aşağıdaki konular anlatılmaktadır:

- Geliştirilen yöntemler insan vücudu için bir elektriksel devre modeline ihtiyaç duyduğu için insan vücudundaki dokuların elektriksel özellikleri.
- Elektronik devrelerde ve vücut içerisinde elektriksel gücün yayılması ve iletiminin anlaşılmasını sağlayan iletim hatları.
- Yüksek frekanslarda çalışan elektronik devrelerin ve insan vücudunun elektriksel özelliklerinin ölçülmesini ve modellenmesini kolaylaştıran S-parametreleri.
- Algılama devreleri tasarlamaya yarayan filtreler.
- Kullanıcı vücudunun elektriksel özellikleri algılama devresiyle ölçüldükten sonra hangi sınıfa ait olduğuna karar vermeyi sağlayan denetimli makine öğrenmesi.

### 2.1. Filtreler

Filtre devreleri bir girişi ve bir çıkışı olan devrelerdir, belirli frekans aralıklarında girişe verilen sinyalleri çıkışa iletirken diğer frekanslarda girişe verilen sinyalleri çıkışa iletmez veya çok zayıflatarak iletir.

Pasif Filtreler devreleri (transistor gibi) herhangi bir aktif eleman içermezler, sadece (direnç, bobin ve kondansatör gibi) pasif devre elemanlarından oluşurlar.

Geçirme Bandı (Pass-Band): filtre girişindeki sinyallerin filtre çıkışına zayıflama olmadan iletildiği frekans aralığıdır.

Durdurma Bandı (Stop-Band): filtre girişindeki sinyallerin filtre çıkışına iletilmediği veya ciddi bir seviyede zayıflatıldıktan sonra iletildiği frekans aralığıdır.

Bant Genişliği (Bandwidth): çıkış işareti gücünün, giriş işareti gücünün yarısına denk gelen (desibel ölçeğinde -3dB azalmaya denk gelen) frekans değerleriyle tanımlanır.

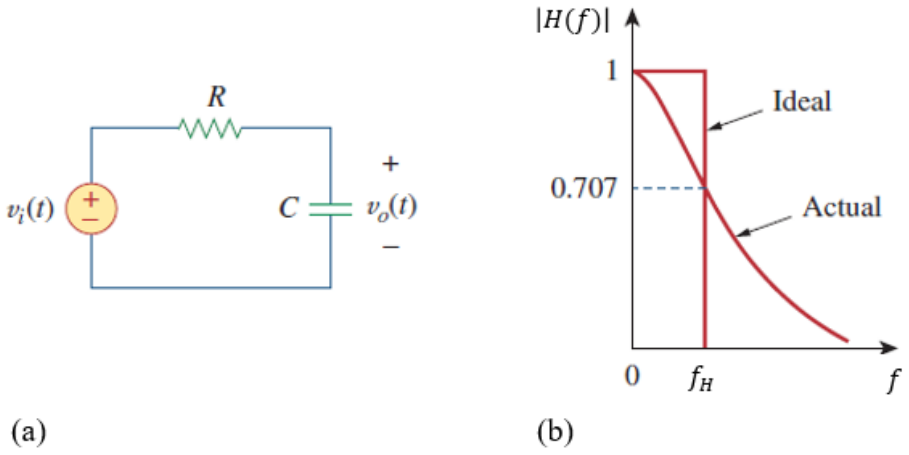
Geçirme bandının alt ve/veya üst limitini belirleyen frekans değerleri kesim frekansı (cutoff frequency) olarak bilinir. Alternatif olarak, filtre çıkışına iletilen sinyal girişteki genliğinin 0,707 katına indiği frekans aralığı da bant genişliğini tanımlamak için kullanılmaktadır.

Merkez Frekansı (Center Frequency): fitre türüne göre geçirme bandının ortasına (bant geçiren filtreler için) veya durdurma bandının ortasına (bant durduran filtreler için) denk gelen frekans değeridir.

Bir filtrenin frekans yanıtı, sinyal frekansındaki değişime karşı filtre davranışındaki değişimdir. Bir filtrenin transfer fonksiyonu $H(j\omega)$, filtre çıkışının $Y(j\omega)$ filtre girişine $X(j\omega)$ frekans bağımlı oranıdır. Filtre transfer fonksiyonunda ölçülen giriş ve çıkış değerleri gerilim ise oluşan oran gerilim kazancı olarak bilinir. Tez kapsamında, filtre yanıtı ifadesi filtre gerilim kazancı anlamında kullanılacaktır (Alexander ve Sadiku, 2013).

Filtre Türleri: Filtreleri dört ana kategoride gruplamak mümkündür: Bant Geçiren, Bant Durduran, Alçak Geçiren ve Yüksek Geçiren.

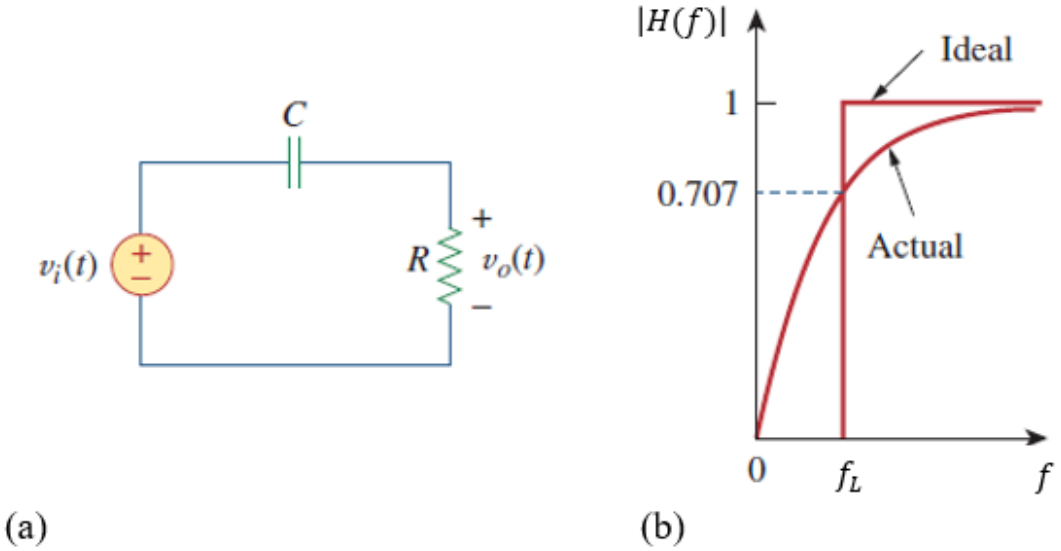
Alçak Geçiren Filtre AGF (Low Pass Filter LPF): $f_H$ kesim frekansından düşük frekanslardaki sinyalleri girişinden çıkışına (idealde hiç zayıflatmadan) ileten filtre devresidir. AGF devresi oluşturmanın en basit yolu Şekil 2.1.a'daki direnç kondansatör (RC) bağlantılarıdır. Giriş işareti direncin bir ucundan uygulanır ve kondansatör üzerinden çıkış alınır.




Şekil 2.1. Alçak Geçiren Filtre (a) RC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı (Alexander ve Sadiku, 2013)

Şekil 2.1.b'de AGF gerilim kazancının genlik grafiği gösterilmektedir. İdealde geçirme bandının gerilim kazancı birim kazanca eşit olup durdurma bandının (kesim frekansından yüksek frekanslarda) genlik kazancı sıfıra eşittir. Pratikte, geçirme bandında bir miktar zayıflama oluşmakta ve durdurma bandına ani bir geçiş olmamaktadır.

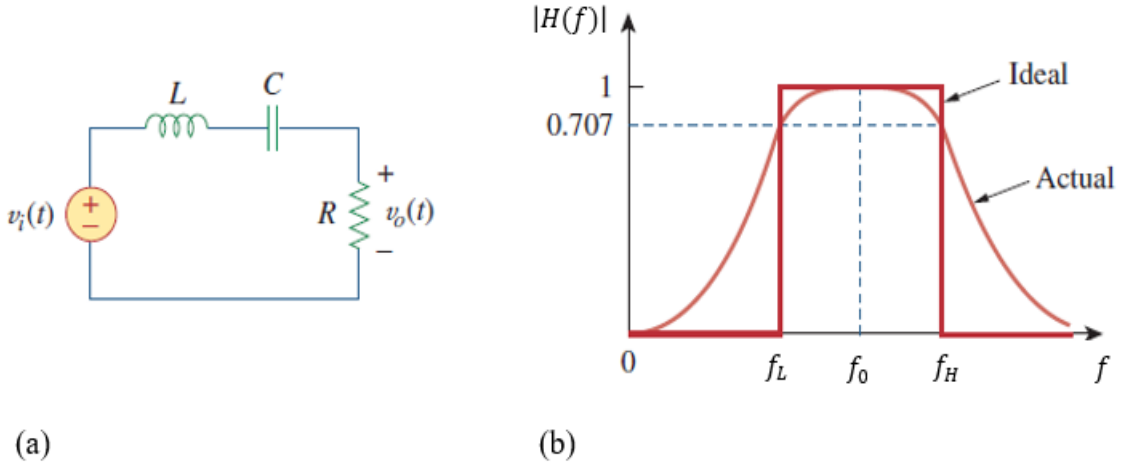
Yüksek Geçiren Filtre YGF (High Pass Filter HPF): $f_L$ kesim frekansından yüksek frekanslardaki işaretleri girişinden çıkışına (idealde hiç zayıflatmadan) ileten filtre tipidir. YGF devresi oluşturmanın en basit yolu Şekil 2.2.a'daki RC bağlantılarıdır. Giriş işareti kondansatörün bir ucuna verilir ve direnç üzerinden çıkış alınır.




Şekil 2.2. Yüksek Geçiren Filtre (a) RC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı (Alexander ve Sadiku, 2013)

Şekil 2.2.b'de YGF' gerilim kazancının genlik grafiği gösterilmektedir. İdealde geçirme bandının gerilim kazancı birim kazanca eşit olup durdurma bandının (kesim frekansından düşük frekanslarda) gerilim kazancı sıfıra eşittir.

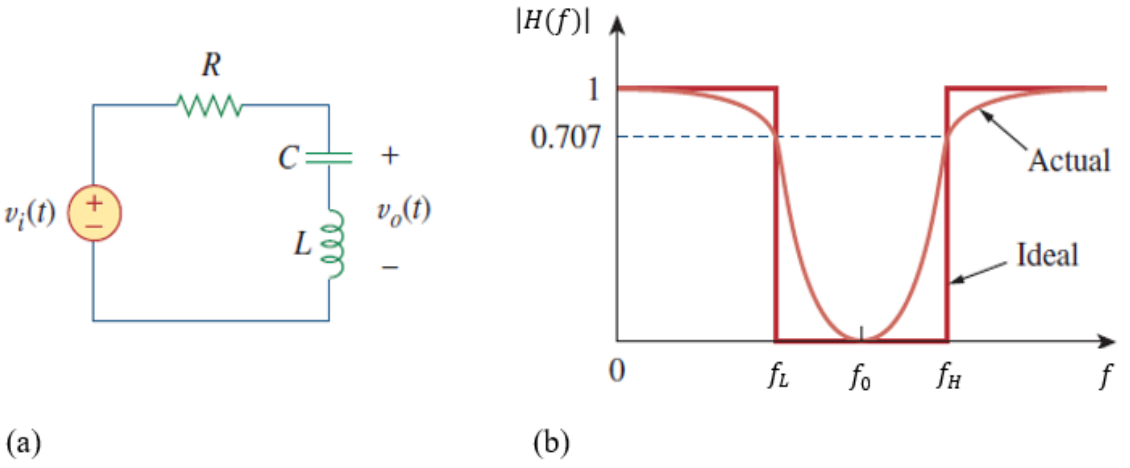
Bant Geçiren Filtre BGF (Band Pass Filter BPF): $f_L$ ile $f_H$ frekans aralığıyla tanımlanan bir bant genişliğinde işaretleri girişinden çıkışına (idealde hiç zayıflatmadan) ileten filtre tipidir. BGF devresi oluşturmanın en basit yolu Şekil 2.3.a'daki seri direnç bobin kondansatör (RLC) bağlantılarıdır. Giriş işareti birbirine seri bağlı bobin veya kondansatöre verilir ve direnç üzerinden çıkış alınır.




Şekil 2.3. Bant Geçiren Filtre (a) RLC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı (Alexander ve Sadiku, 2013)

Şekil 2.3.b'de BGF gerilim kazancının genlik grafiği gösterilmektedir. İdealde geçirme bandının gerilim kazancı birim kazanca eşit olup durdurma bandının ($f_L$ frekansından düşük ve $f_H$ frekansından yüksek frekanslarda) gerilim kazancı sıfıra eşittir.

Bant Durduran Filtre BDF (Band Stop Filter BSF – Notch Filter): $f_L$ ile $f_H$ frekans aralığıyla tanımlanan bir bant genişliğinde işaretleri girişinden çıkışına (idealde hiç) iletmeyen filtre tipidir. BDF devresi oluşturmanın en basit yolu Şekil 2.4.a'daki seri RLC bağlantılarıdır. Giriş işaret dirence verilir ve birbirine seri bağlı bobin ile kondansatör üzerinden çıkış alınır.




Şekil 2.4. Bant Durduran Filtre (a) RLC devresi ve (b) Filtrenin gerilim kazancı (Alexander ve Sadiku, 2013)

Şekil 2.4.b'de BDF gerilim kazancının genlik grafiği gösterilmektedir, $f_L$ ile $f_H$ aralığındaki durdurma bandının gerilim kazancı (idealde) sıfır değerindedir, $f_L$ frekansından düşük ve $f_H$ frekansından yüksek frekanslarda gerilim kazancı (idealde) birim kazanca eşittir. Diğer filtre tiplerinde olduğu gibi, pratikte geçirme bandında bir miktar kayıp olmakta ve durdurma bandına ani bir geçiş olmamaktadır.

Bant Durduran Filtrenin (durdurma bandının) bant genişliği $BW = f_H - f_L$ frekanslarıyla belirlenmektedir. Şekil 2.4.a'daki devrede $f_0$ merkez frekansı, gerilim kazancı genliği $|H(\omega_0)| = 0$'ye eşitlenerek Eşitlik (2.1) ve Eşitlik (2.2)'deki gibi hesaplanmaktadır,

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{j(\omega L - 1/\omega C)}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} \tag{2.1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.2}$$

BGF ve BDF devrelerinin bant genişliği ($BW$) kalite faktörü ($Q$) değeri kullanılarak Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4)'teki gibi hesaplanmaktadır (aşağıdaki eşitlikler bobin ile kondansatör Şekil 2.3.a ve Şekil 2.4.a'da gösterilen devrelerdeki gibi seri bağlı olduğunda kullanılmaktadır),

$$Q = \frac{\omega L}{R} \tag{2.3}$$

$$Q = \frac{f_0}{BW} \rightarrow BW = \frac{f_0}{Q} \tag{2.4}$$

## 2.2. İletim Hatları

İletim hattı, elektriksel işaretleri iki nokta arası taşımaya yarayan devre elemanlarıdır. İletim hatları, iletken ve yalıtkan malzemelerin belirli bir geometrik düzende yerleştirilmesiyle oluşur. İletim hatlarının çalışma şeklini anlayabilmek için elektriksel enerjinin iki nokta arası nasıl iletildiğini bilmek gerekmektedir. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi elektriksel gücün/işaretin üretildiği nokta kaynak, iletildiği nokta ise yük noktası olarak bilinmektedir (Ulaby ve Ravaioli, 2015).




Şekil 2.5. Elektriksel güç kaynağı, yük ve iletim hattı (Ulaby ve Ravaioli, 2015)

Elektriksel gücü taşıyan işaretin zamana bağlı değişimine göre iki iletim senaryosu tanımlanabilir:

- İletilmesi gereken elektriksel güç zamanla değişmiyorsa, iki nokta arası elektriksel güç aktarımı elektrik veya manyetik alanın kaynak noktasından yüke ulaşmasıyla gerçekleşir.
- İletilmesi gereken elektriksel güç zamanla değişiyorsa, iki nokta arası elektriksel güç aktarımı elektromanyetik alanın kaynak noktasından yüke ulaşmasıyla gerçekleşir.

Yukarıda anlatılan iletim senaryolarının ortak bir yanı vardır. O da elektriksel güç iletiminin metal nesneler içerisinde belli serbestlik koşullarında hareket edebilen elektronlara bağlı olmamasıdır. Elektriksel güç iletimi kesinlikle alan iletimine bağlıdır.

İletim hatları farklı geometrik şekillerde tasarlanabilir. İki iletken içeren yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik tesisat işlerinde kullanılan iki telli kablolar ve uydu alıcılarda kullanılan koaksiyel kablolar iki iletkenli iletim hatlarına birer örnek olarak verilebilir. Bu iki iletkenin şekli ve aradaki yalıtkan malzeme ne olursa olsun, iki iletkenin üzerinde bulunan yükler bir elektrik alan ve iletilen akım bir manyetik alan oluşturmaktadır. İki iletkenli hatlarda elektrik ve manyetik alan aynı düzlemde birbirine dik olup da bu düzlem güç iletimi yönüne dik olduğunda enine elektromanyetik alan olarak adlandırılmaktadır (Ulaby ve Ravaioli, 2015).

İletim hattı yan kesitinin geometrisi karakteristik empedans (characteristic impedance) değerini belirler. Karakteristik empedans değeri ($Z_0$) de Eşitlik (2.5)'te ifade edildiği gibi hat içerisinde iletilen elektrik alnın ($E_0$) manyetik alana ($H_0$) oranını belirler;

$$Z_0 = \frac{E_0}{H_0} \tag{2.5}$$

Elektromanyetik alanlar dalga şeklinde yayılırlar. Fizikteki her dalga türünde olduğu gibi elektromanyetik dalgaların da bir genlik, frekans ve fazı olur. Elektromanyetik dalgalar ışık hızında yayılırlar. Serbest uzayda frekans ($f$) ve dalga boyu ($\lambda$) arasında bağıntı Eşitlik (2.6)'daki gibi hesaplanır. Işık hızı ortama göre değişmekte olup serbest uzaydaki değeri ($c$) ile ifade edilir ve sabittir.

$$c = \lambda f \tag{2.6}$$

İletim hatları içeren bir devrenin boyutları, devrede iletilen elektriksel işretlerin dalga boyuna göre çok küçükse Doğru Akım devrelerinde kullanılan Ohm kanunu ($V = IR$) geçerli olur. Devrede iletilen elektriksel işaretlerin dalga boyu devre boyutlarına yakınsa işaretlerin fazını dikkate almak gerekir. Dalga boyun frekansla ters orantılı olduğu için frekans arttıkça dalga boyu azalır ve bu durumda gerilim ile akım hesaplamalarında elektriksel sinyal fazının önemi artar.

İletim hatlarıyla taşınan gücün hesaplanması için aynı sonucu veren iki yöntem bulunmaktadır: hat içerisinde yayılan elektrik ile manyetik alanın çarpımı veya hat iletkenlerinde iletilen gerilim ile akımın çarpımı. İletim hatlarını analiz ederken bazı durumlarda alanları kullanarak hesaplama yapmak kolayken, bazı durumlarda ise gerilim ile akımı kullanma kolaylık sağlamaktadır. Devre analizinde genellikle gerilim ve akım değerleri kullanıldığı için ve iletim hattı devreyi oluşturan bileşenlerin birisi olduğundan gerilim ve akım kullanımı hesaplamaları kolaylaştırmaktadır. Bu sebeple yansıma katsayısı hesabında, iletim hattı iletkenleriyle taşınan gerilim değerinin kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 2.5'teki iletim hattıyla iletilen elektriksel güç yüke ($Z_L$) ulaştığında, gücün bir kısmı yüke aktarılırken kalanı tekrar üreticiye (kaynağa) doğru geri yansır. Bu nedenle iletim hattında iki farklı yönde ilerleyen gerilim bulunur: kaynaktan yüke doğru iletilen gerilim ($V^+$) ve yükten kaynağa doğru geri yansıyan gerilim ($V^-$). Yansıma katsayısı ($\Gamma$), yansıyan gerilimin iletilen gerilime oranıdır ve Eşitlik (2.7)'ye göre hesaplanmaktadır;

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{2.7}$$

$$Z_L = R_L + jX_L \tag{2.8}$$

Yük, Eşitlik (2.8)'de ifade edildiği gibi kompleks bir empedans olup dirençli ve reaktif bileşenlerden oluşmaktadır. Yükün dirençli bileşeni reel değerlidir ve gelen gücü tüketen kısımdır. Yükün reaktif bileşeni sanal değerlidir, gelen gücü depolar ve hiçbir şekilde tüketmez. Yükün içinde kapasitif veya indüktif devre elemanları olduğunda reaktif bileşen oluşur (Alexander ve Sadiku, 2013). Yükün içerisinde indüktif devre elemanları olduğunda reaktif kısmın ($X_L$) değeri pozitif olur ve değeri indüktans ($L$) değerine bağlı olarak Eşitlik (2.9)'a göre hesaplanmaktadır. Yükün içerisinde kapasitif devre elemanları olduğunda reaktif kısmın ($X_C$) değeri negatif olur ve değeri kapasitans ($C$) değerine bağlı olarak Eşitlik (2.10)'a göre hesaplanmaktadır;

$$X_L = 2\pi f L \tag{2.9}$$

$$X_C = \frac{-1}{2\pi f C} \tag{2.10}$$

Yükün karmaşık bir sayı olması yansıma katsayısını da karmaşık bir sayı yapmaktadır. Eşitlik (2.7)'de bilinmeyen yansıma katsayısı yük ve hat empedansı cinsinden hesaplanmıştı. Aynı şekilde bilinmeyen yük empedansı, hat empedansı ve yansıma katsayısı kullanılarak Eşitlik (2.11)'e göre hesaplanmaktadır;

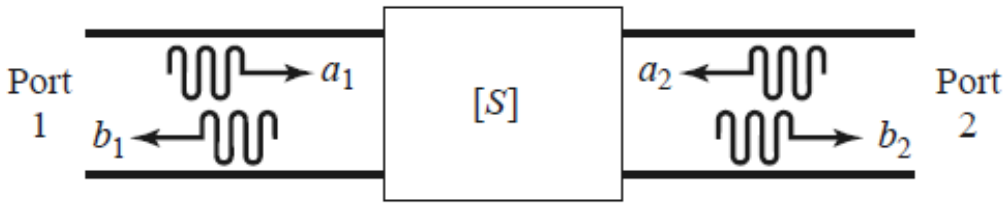
$$Z_L = Z_0 \left( \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \tag{2.11}$$

### 2.3. Saçılma Parametreleri (S-parametre)

Elektronik devrelerde iletilen sinyalin frekansı arttıkça devre elemanlarının ideal olmamasından kaynaklanan parazitik direnç, kapasitans ve indüktans değerleri devreyi etkilemektedir. Ek olarak ideal olmayan iletim hatları da devreye aynı parazitik etkilerde bulunmaktadır. Öyle ki, yüksek frekanslı devrelerde pasif devre elemanı (direnç, kondansatör veya bobin) kullanmadan sadece iletim hatlarının sağladığı parazitik direnç, kapasitans ve indüktans değerleri kullanılarak devreler tasarlanabilmektedir. Bu parazitik

değerleri hesaplamak için ampirik denklemler kullanılmaktadır. Ancak bu yaklaşım temelde varsayımlar üzerine kurulmuştur ve kesin bir sonuç verememektedir. Bu sebeple yüksek frekanslı devrelerin davranışlarını karakterize etme amacıyla ölçümler yapılmaktadır. En yaygın kullanılanı ise Saçılma Parametreleri (S-parametre) ölçümüdür. S-parametre ölçümü için de Vektör Ağ Analizörü (VNA) kullanılmaktadır.

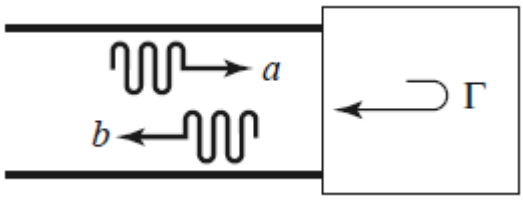
Bir elektronik devrede kapı (veya port), devreye giriş verilen veya çıkış alınan noktadır. Bir devreye verilen giriş ile devrenin çıkışı aynı noktadan yapılıyorsa bu devre tek kapılıdır. Bir devreye giriş bir noktadan verilip çıkış farklı bir noktadan ölçülüyorsa bu devre iki kapılı bir devredir. Devrelerin kapı sayısı sınırlı değildir, bir devrede n adet kapı bulunabilir, ölçümleri kolaylaştırmak ve kapıları birbirinden ayırt etmek için her kapıya bir numara verilir.




Şekil 2.6. İki kapılı devre örneği (Pozar, 2012)

Şekil 2.6'da iki kaplı bir devre gösterilmektedir, $a$ kapıdan devreye doğru ilerleyen normalize gerilimi temsil eder ve $b$ devreden kapıya doğru ilerleyen normalize gerilimi temsil eder. Bu değerlerin hangi kapıya ait olduğunu belirlemek için kapı numarası şekilde gösterildiği gibi alt indis olarak eklenir. S-parametreler ($S_{ij}$) basitçe, devrede $i$ kapsına ait $b_i$ değerinin $j$ kapısına ait $a_j$ değerine oranıdır. S-parametre ölçümü veya hesabı yapılırken $i = j$ olabilir ama $a_j$ hariç diğer tüm kapılarda $a = 0$ olmalıdır. Bu bilgiler ışığında S-parametreler $S_{ij}$ Eşitlik (2.12)'deki gibi yazılmaktadır. S-parametre ölçümü veya hesabında $a_j$ hariç diğer tüm kapılarda $a = 0$ olması için $j$ kapısı hariç diğer tüm kapıların uyumlu yükle (iletim hattının empedansına eşit bir yük) sonlandırılması gerekmektedir.

$$S_{ij} = \left.\frac{b_i}{a_j}\right|_{a_k=0,\ \ k\neq j} \tag{2.12}$$




Şekil 2.7. Tek kaplı devre örneği (Pozar, 2012)

Bir iletim hattı sonuna bağlanmış yük Şekil 2.7'de gösterildiği gibi tek kapılı devreye örnek olarak verilebilir. Bu örnekte $a_1$ yüke doğru giden normalize gerilim olduğu için $a_1 = V^+/2\sqrt{Z_0}$ olur, $b_1$ yükten geri yansıyan normalize gerilim olduğu için $b_1 = V^-/2\sqrt{Z_0}$ olur ve $S_{11}$ Eşitlik (2.13)'e göre hesaplandığında yansıma katsayısına eşit olduğu anlaşılır;

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{V^-}{V^+} = \Gamma \tag{2.13}$$

Eşitlik (2.11)'a göre yük direnci yansıma katsayısından hesaplanabildiği gibi S-parametreleriyle de hesaplanabilmektedir.

İki kapılı devrelerin en yaygın örnekleri filtrelerdir. Filtrenin girişi 1'inci kapı, çıkışı 2'nci kapı olarak varsayılıp $S_{21}$ Eşitlik (2.14)'e göre hesaplandığında filtrenin transfer fonksiyonuna eşit olduğu anlaşılmaktadır (filtre çıkışında uyumlu bir yük olduğu varsayılarak);

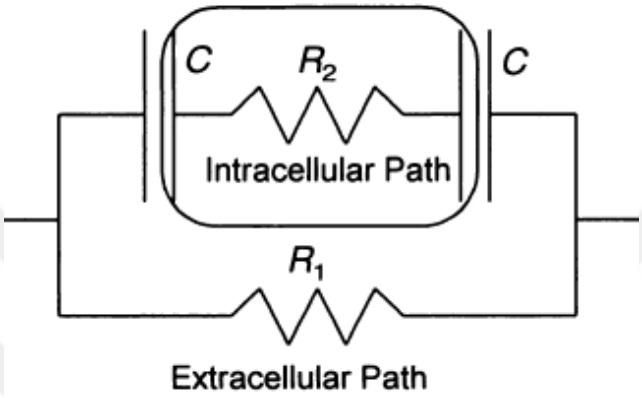
$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} = \frac{V_o}{V_i} = H(\omega) \tag{2.14}$$

Bu iki örnek bile S-parametrelerin yüksek frekanslı elektronik devrelerin davranışlarını karakterize etmek için faydalı olduğunu ve VNA ile ölçümü yapılabildiğinden pratik bir çözüm olduğunu göstermektedir.

### 2.4. İnsan Vücudundaki Dokuların Elektriksel Özellikleri

Elektrik akımının insan cismi içerisindeki izleyeceği yol birçok fizyolojik mekanizmalardan etkilenmektedir. Elektrik akımı fizyolojik sıvıların içerisinde iyonların hareketiyle ilerlemektedir. Ancak sıvıların katılığı bu ilerleyişe engel teşkil ettiği için

elektriksel direnç gibi davranmaktadır. İlerleyen akım, hücre zarları ve diğer ara yüzlerde elektriksel yüklerin birikmesine neden olmakta ve bu yapılar elektriksel kondansatör gibi davranmaktadır (Foster ve Lukaski, 1996). Bir dokunun basit elektriksel modeli Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Burada $R_1$ hücre dışında kalan sıvılardan kaynaklanan direnç değeri, $R_2$ hücre içerisindeki sıvılardan kaynaklanan direnç değeri ve $C$ hücre zarının oluşturduğu kapasitans değeridir.

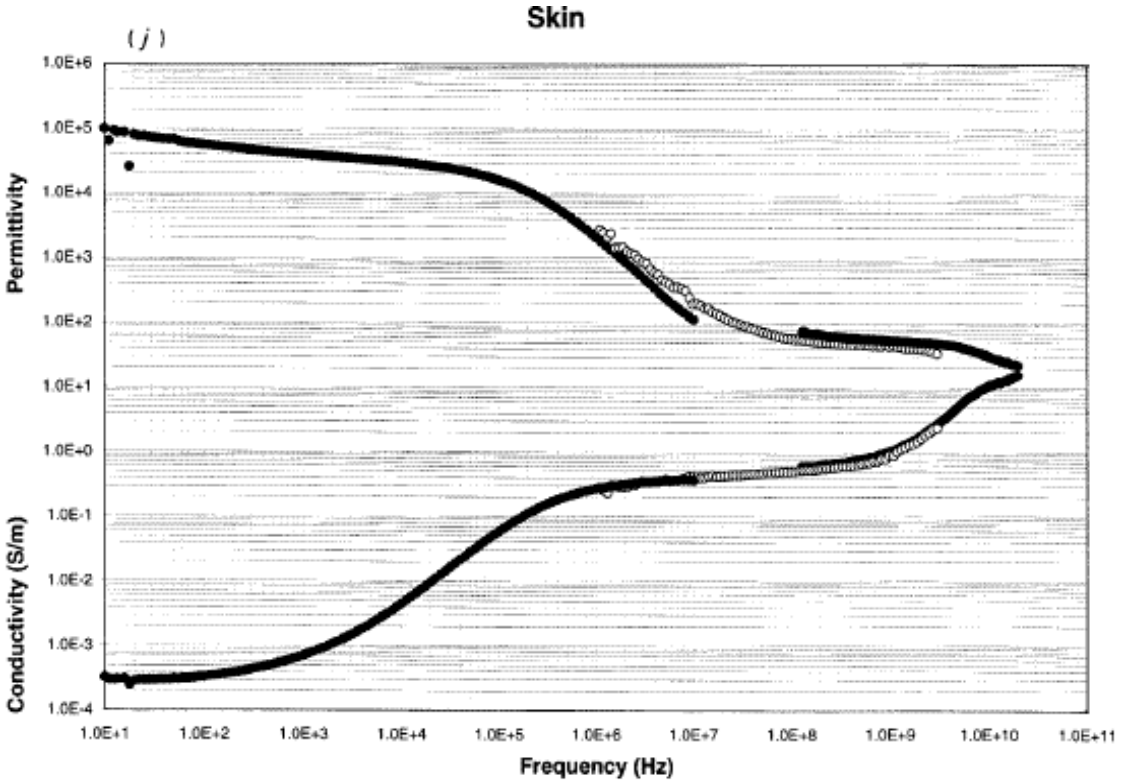



Şekil 2.8. Biyolojik dokuların elektriksel devre modeli (Foster ve Lukaski, 1996)

Düşük frekanslarda akım hücreler arasındaki alanda ilerlemektedir. Yüksek frekanslarda akım hücre içerisinde ve dışındaki alanlarda ilerlemektedir. Bu da elektrik akımının vücut içerisinde izleyeceği yolun frekansa göre değiştiğini göstermektedir.

İnsan vücudu içerisindeki farklı dokularda hücre yapısı ve hücreler arası ortamda farklılık olduğu için bu dokuların elektriksel özelliklerinde de farklılık oluşmaktadır. Bir ortamı veya malzemeyi tanımlayan elektriksel özellikler: elektriksel geçirgenlik ($\varepsilon$), manyetik geçirgenlik ($\mu$) ve iletkenlik ($\sigma$) değerleridir. Elektriksel özelliklerin değeri biyolojik dokuların farklılığına bağlı olarak değiştiği gibi frekans değerine bağlı olarak da değişmektedir (Gabriel ve diğ., 1996).

Şekil 2.9'da kolun ön kısmındaki deri dokusu için 10Hz ile 10GHz frekans aralığında elektriksel geçirgenlik "Permittivity" ve iletkenlik "Conductivity" değerlerinin grafiği gösterilmektedir (Gabriel ve diğ., 1996). Tablo 2.1'de 6.3 GHz frekansı için bazı dokuların elektriksel özellikleri listelenmiştir, kas dokularının en yüksek elektriksel geçirgenlik ve iletkenlik değerine sahip olduğu tablodan anlaşılmaktadır (Kerketta ve Ghosh, 2020).




Şekil 2.9. Kol ön-kısmındaki deri dokusunun frekansa bağlı elektriksel özellikleri (Gabriel ve diğ., 1996)

Bir kullanıcıya düşük güce sahip elektriksel sinyaller iletilse, vücut içerisindeki dokuların farklı elektriksel özellikleri çeşitli iletim hatlarının oluşmasına neden olmaktadır. Biyolojik dokuların özelliği frekansa bağlı değiştiği için vücut içerisinde oluşan iletim hatlarının iletme/geri yansıtma özelliğini de etkileyecektir.

Bu sebeple, tez kapsamında elektriksel ölçümler tek bir frekans değerinde değil de belirli bir frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Çocuk/yetişkin bireylerin ve yetişkin bireylerde kadın/erkek vücutlarındaki biyolojik dokulardaki farklılıkları elektriksel ölçümlerle algılayacak yöntemler geliştirildi.

Tablo 2.1. Bazı vücut dokularının 6,3 GHz frekansındaki elektriksel özellikleri (Kerketta ve Ghosh, 2020)

| **Doku** | **Bağıl Elektriksel Geçirgenlik ($\varepsilon_r$)** | **İletkenlik (S/m)** |
|---|---|---|
| Kemik | 9,45 | 1,27 |
| Kas | 47,80 | 5,58 |
| Yağ | 4,90 | 0,32 |
| Deri | 34,68 | 4,16 |

## 2.5. Denetimli Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesindeki denetimli sınıflandırma işlemi, bir giriş verisini olası sınıflar arasından belirli bir sınıfa atama işlemidir. Sınıflandırıcı, giriş verisinin hangi sınıfa ait olduğunu belirlemektedir. Sınıflandırma işlemini gerçekleştirmek için; Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine SVM), Karar Ağları (Karar Ağacı) ve Yapay Sinir Ağları-YSA (Artificial Neural Network ANN) gibi birçok yöntem bulunmaktadır (Alpaydin, 2020). Bu yöntemler bir makine üzerinde çalıştırıldığı için "Makine Öğrenmesi" olarak adlandırılmaktadır (kullanılan makine: bir bilgisayar veya mikrodenetleyici olabilir). Örnek olarak elimizde bilgisayara kedi ile köpek görsellerini ayırt ettirme problemi olsun. Bu örnekte makine bilgisayardır, giriş verisi bilgisayara verilen görseldir ve ayırt edilecek sınıflar kedi ile köpek sınıflarıdır. Giriş verisinin hangi sınıfa ait olduğunu belirleyecek sınıflandırıcı DVM, YSA veya başka bir yöntem olabilir. Her bir sınıflandırma yönteminin avantajı ve dezavantajları vardır. En uygun olan sınıflandırıcıyı tespit etme: giriş verilerinin türü, sınıflandırıcıyı çalıştıracak makinenin hesaplama gücü ve eğitim verilerinin sayısı gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Denetimli sınıflandırıcının karar verebilmesi için:

1. Makine (Bilgisayar) tarafından karar vermeyi gerektiren problemin olası sınıfları belirlenmelidir. Bu tezde cinsiyet sınıflandırma problemi için belirlenen sınıflar: Erkek ve Kadın sınıflarıdır. Yaş grubu sınıflandırma problemi için belirlenen sınıflar Yetişkin ve Çocuk sınıflarıdır.
2. Önceki adımda belirlenen sınıflara ait veri toplama gerekmektedir (sınıf örnekleri). Toplama sürecinde veriler kaydedilirken verinin hangi sınıfa ait olduğu bilgisi de kaydedilmelidir (sınıf etiketi olarak bilinmektedir).
3. Toplanan veriler iki kısma ayrılmalıdır; sınıflandırıcı eğitmek için **eğitim verileri** ve eğitilen sınıflandırıcının performansını değerlendirmek için **test verileri**. Genellikle toplanan verilerin %80'lik kısmı eğitim ve %20'lik kısmını test için ayırmak uygundur.
4. Toplanan verilerin (sınıf örneklerinin) boyutu büyük değilse direkt sınıflandırıcı eğitimi için kullanılabilmektedir. Büyük boyutlu sınıf örnekleri doğrudan sınıflandırıcı eğitiminde kullanıldığında sınıflandırma yönteminin karmaşıklığını ve eğitim için gerekli veri sayısını arttırmaktadır. Bu sebeple büyük sınıf örneklerini özetle tanımlayan bazı istatistiksel değerleri hesaplayıp bunlardan yeni sınıf örnekleri

oluşturarak sınıflandırıcı eğitimi yapılmaktadır. Her iki durumda da sınıflandırıcı eğitiminde direkt kullanılan sınıf örnekleri öznitelik vektörü ve içerdiği değerler de öznitelikler olarak bilinmektedir.

5. Kullanılacak sınıflandırma algoritması belirlenmelidir. Eğitim için toplanacak veri sayısı kullanılacak algoritmanın karmaşıklığını belirlemede dikkate alınmalıdır. Sınıflandırma algoritmasının karmaşıklığı algoritma içerisindeki değişken sayısı ile doğru orantılıdır (bu değişkenlerin değeri sınıflandırıcı eğitimi sürecinde belirlenmektedir). Örnek olarak; aynı öznitelik vektörü için DVM sınıflandırıcı eğitimi derin bir YSA sınıflandırıcıya göre daha az sayıda değişken değeri belirleme gerektirdiği için daha az sayıda eğitim verisi kullanılabilmektedir.
6. Eğitim süreci tamamlandıktan sonra, test verileri sınıflandırıcıya giriş olarak verilir ve sınıflandırıcının çıkış olarak ürettiği sınıf etiketi (sınıf tahmini) elde edilir. Elde edilen sınıf tahmini veri toplama sürecinde kaydedilen gerçek sınıf etiketiyle karşılaştırılır ve ikisinin eşit olduğu veri için sınıflandırıcının doğru çalıştığı anlaşılır. Bu işlem tüm test verileri için tekrarlandığında doğru tahmin sayısının tüm test verilerine olan yüzdelik oranı sınıflandırıcının test doğruluğunu gösterir ve bunu en yüksek değerde yapma sınıflandırıcı eğitiminin ana hedefidir.
7. Bazı durumlarda toplanan verileri eğitim ve test için iki kısma bölme yerine çapraz doğrulama yöntemi kullanılır. $k$-katlı çapraz doğrulamada ($k$-fold cross validation) toplanan veriler $k$ adet kısma bölünür, verilerin $k-1$ adet kısmı sınıflandırıcı eğitim için kullanılırken kalan bir kısmı sınıflandırıcı testi için kullanılır. Bu işlem $k$ adet parçaya bölünen verilerden elde edilebilecek $\binom{k}{k-1}$ adet eğitim/test kombinasyonunun tamamı için tekrarlanır ve nihai sınıflandırma doğruluğunu hesaplamak için tüm kombinasyonlardan elde edilen doğruluk değerlerinin aritmetik ortalaması alınır.

Öznitelik sayısının çokluğu sınıflandırıcı eğitimi için gerekli eğitim verisi sayısını arttırmaktadır. Makine öğrenmesinde bu durum "boyutluluk laneti" (curse of dimensionality) olarak bilinmektedir (Alpaydin, 2020). Bir öznitelik, sınıflar arası ayrışmayı arttıracak bilgi taşıyorsa eğitilen sınıflandırıcının doğruluğunu arttırmaktadır ama böyle bir bilgi taşımıyorsa (yani özniteliğin aldığı değerler tüm sınıflar için aynı aralıktaysa) sınıflandırıcı eğitiminin doğruluğunu arttırma yerine tam tersi doğruluğu azaltmaktadır. Sınıflandırma doğruluğunu azaltan öznitelikler eğitimde kullanılacak

öznitelik vektörüne dahil edilmemelidir. Dolayısıyla en yüksek sınıflandırma doğruluğunu verecek özniteliklerin seçilmesi gerekmektedir.

İleri Yönlü Öznitelik Seçimi yönteminde (Alpaydin, 2020):

1. Başlangıçta öznitelik vektörü boştur, sonrasında öznitelik vektörüne bir öznitelik dahil edilir ve eğitim yapılıp sınıflandırıcı doğruluğu kaydedilir.
2. Eğitim tamamlandıktan sonra dahil edilen öznitelik, öznitelik vektöründen çıkarılır.
3. 1'inci ve 2'nci adım tüm öznitelikler için tekrarlanır ve en yüksek doğruluğu veren öznitelik tespit edilir.
4. 3'üncü adımda bulunan öznitelik bir daha çıkarılmamak üzere öznitelik vektörüne dahil edilir, böylece başlangıçta boş olan öznitelik vektörüne ilk öznitelik eklenmiş olur.
5. Öznitelik vektörüne kalan özniteliklerden bir öznitelik daha eklemek için 1,2 ve 3'üncü adımlar tekrarlanır. 3'üncü adımda elde edilen sınıflandırma doğruluğunu arttıran öznitelikler varsa en yüksek doğruluğu veren öznitelik 4'üncü adımda anlatılan şekilde eklenir.
6. Önceki adımlar kalan öznitelikler için sınıflandırma doğruluğu arttığı sürece tekrarlanır, kalan öznitelikler sınıflandırma doğruluğunu arttırmıyorsa veya arttırma yerine azaltmaya başladıysa öznitelik ekleme döngüsü durdurulur ve ileri yönlü öznitelik seçimi tamamlanmış olur.

Öznitelik seçme yönteminde 1'inci adımda kullanılan sınıflandırma algoritması (DVM sınıflandırıcı gibi) öznitelik vektörünün oluşmasını etkilemektedir. Farklı sınıflandırma algoritmaları için farklı öznitelikler seçilmesi olası bir durumdur.

# 3. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürdeki cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırması ile ilgili çalışmalar üç gruba ayrılabilir: dış görünüş temelli yöntemler, biyosinyal temelli yöntemler ve biyometrik özellikleri kullanan yöntemler. Bu bölümde her biri ayrı ayrı irdelenmiş ve performans değerlendirmesi için farklı açılardan yöntemler arası karşılaştırmalar yapılmıştır.

Dokunmatik ekranlarla yapılan çalışmalar ayrı bir başlık altında anlatılmıştır. Ancak bu çalışmalarda sınıflandırıcı eğitimi için dokunma jestleri kullanıldığından, bu çalışmalar da davranışsal biyometri ve dolayısıyla biyometrik yöntemler kategorisine dahildir. Tezin konusu dokunmatik buton tasarımı ve kapasitif algılamayı içerdiğinden bu konularla ilgili yöntemler de irdelenmiştir.

Dokunmatik ekranlar/butonların çoğu kapasitif algılama temelli çalıştığı için tezin konusuna literatürdeki en yakın yöntemler dokunmatik ekranlarla yapılan çalışmalardır. Dokunmatik ekranlarla yapılan çalışmalarda cinsiyet ile yaş grubu ayrımı kullanıcıların davranışsal özelliklerinden faydalanarak gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki yöntemlerin aksine bu tez kapsamında geliştirilen yöntemlerde hiçbir davranış (el hareketi) yapmaya gerek kalmadan tek bir dokunuştan cinsiyet ve yaş grubu bilgisi elde edilmektedir.

## 3.1. Dış Görünüş Temelli Yöntemler

Dış görünüş temelli yöntemlerde bir kamera görüntüsünden elde edilen bilgilerle sınıflandırma yapılmaktadır. (Danisman ve diğ., 2015)'te yüz görüntülerindeki saç hacmi kullanılarak cinsiyet tanıma yapılmıştır, sınıflandırma için DVM ve nihai kararı verme için bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy Inference System FIS) kullanılmıştır.

(Basha ve Jahangeer, 2012)'de yüz görüntüleri tek boyutlu bir diziye çevrilmiştir. Elde edilen dizinin Sürekli Dalgacık Dönüşümü (Continuous Wavelet Transform CWT) alınarak DVM sınıflandırıcı için öznitelikler çıkarılmış ve cinsiyet tanımada %98'lik doğruluk elde edilmiştir.

(Liew ve diğ., 2016)'da cinsiyet sınıflandırması için yüz görüntüleriyle evrişimsel derin sinir ağı (Convolutional Neural Network CNN) eğitilmiştir. Konvolüsyon yerine korelasyon kullanımı ve ilk iki evrişimsel katman arasında kısmi bağlantılar kullanılarak

CNN ağının mimarisinde değişiklik yapılmıştır. Bu sayede hızlı çalışan (32x32'lik görüntüyü 0,27ms'de sınıflandırma) ve yüksek doğruluk (%98 üzeri) veren bir sınıflandırıcı elde edilmiştir.

(Dong ve diğ., 2016)'da yüz görüntülerinden yaş tahmini yapılmıştır. Önerilen yöntemin ilk aşamasında yüz tanıma yapılmıştır. Yüz tanıması yapıldıktan sonra her bir yüzden 20 görsel bölge elde edilmiştir. Bulunan 20 bölgenin her biri için evrişimsel derin sinir ağı eğitilmiş ve en yüksek sınıflandırma doğruluğunu sağ göz bölgesi için eğitilen "büyük ölçekli" sınıflandırıcı vermiştir.

(Dehghan ve diğ., 2017)'deki yöntemin ilk aşamasında yüz tanıma için derin sinir ağı eğitilmiştir (4 milyondan fazla görüntü kullanılmıştır). Sonraki aşamada yaş tahmini, cinsiyet ve duygu tanıma için önceden eğitilen derin sinir ağında ince ayarlamalar (fine-tunning) yapılmıştır. Elde edilen sınıflandırma doğruluğu yaş tahmini için %70,5 cinsiyet tanıma için %91 ve duygu tanıma için %76,1 değerindedir.

(Liu ve diğ., 2017)'de kullanılan veri setindeki görüntüler belirli yaş aralıklarına göre gruplandırılmıştır. Yüz görüntüsünü ifade eden özniteliklerin aynı yaş grubu içerisindeki farklılığı azaltıp yaş grupları arasındaki farkı açması için CNN ağıların eğitimi sırasında değeri minimize edilmeye çalışılan maliyet fonksiyonunu revize edilmiştir. Yaş tahmini için elde edilen ortalama mutlak hata (Mean Absolutely Error MAE) 3,93 değerindedir.

(Amayeh ve diğ., 2008)'de elin antropometrik ölçülerinin cinsiyete göre değişmesi temel alınmıştır. El görüntüsü 6 bölgeye bölünmüştür, 20 erkek ve 20 kadının katılımıyla veri seti oluşturulmuştur. LDA ve skor seviyesi füzyonla (Score-Level Fusion) %98'lik doğruluk elde edilmiştir.

(Afifi, 2019)'da cinsiyet sınıflandırması için 11k el görüntüsü içeren "11K Hands" veri seti kullanılmıştır. Her bir el görüntüsü filtrelenerek yumuşatılmış görüntü ve detay görüntü elde edilmiştir. İki adet CNN derin sinir ağı eğitimi yapılmıştır. Bu çalışmada düzleştirilmiş ve detay görüntüleriyle farklı ağlar eğitilerek %91'lik doğruluk elde edilmiştir. Buna ek olarak ayrıca CNN ağının son katmalarını oluşturan tam bağlı katmalar DVM sınıflandırıcı eğitimi için öznitelik vektörü olarak kullanılmış ve %97,3'lük doğruluk elde edilmiştir.

(Abderrahmane ve diğ., 2020)'de "11K Hands" veri seti kullanılmıştır ve 17 adet yaş grubu sınıflandırma hedeflenmiştir. Her bir kişiye ait 4 el görseli 4 adet CNN derin sinir ağına giriş olarak verilmiştir. CNN ağların ürettiği öznitelik vektörü bir GRU ağına giriş olarak verilmiştir. Eğitimden sonra %96,5'lik doğruluk elde edilmiştir.

(Camalan ve diğ., 2018)'de Kinect kamera ile cinsiyet tanıma yapılmıştır. Veri seti oluşturmaya 29 kadın ve 31 erkek katılmıştır. Kinect kamera önünde ayakta duran katılımcıların 20 adet iskelet eklem noktaları çıkartılmıştır. Genellikle erkeklerin omuzları kadınların omuzlarına göre daha geniş olduğu için bu bölgedeki eklem noktaları arasındaki mesafelerin farklılığı temel alınmıştır. DVM sınıflandırıcı %96,77'lik doğruluk vermiştir.

(Makihara ve diğ., 2011)'de yürüyüş biçimi kullanılarak yaş grubu ve yetişkin yaş grubu için cinsiyet sınıflandırması yapılmıştır. 168 kişinin katılımıyla ve 25 farklı açıdan alınan video kayıtlarıyla veri seti oluşturulmuş ve frekans uzayında öznitelik çıkarımı yapılmıştır. İki sınıflı sınıflandırıcılar eğitilmiş ve elde edilen doğruluk değerleri: yetişkin erkek/yetişkin bayan sınıfları için %80, çocuk/yetişkin sınıfları için %74 seviyesindedir.

(Garain ve diğ., 2021)'de, yüz görüntülerinden cinsiyet ve yaş bilgisi çıkarmak için Kapılı Artık Dikkat Ağı (Gated Residual Attention Network) adı verilen yeni bir ağ modeli kullanılmıştır; deneyler, beş adet herkese açık veri seti üzerinde yapılmış ve "UTKFace" ve "AdienceDB" veri setleri için sırasıyla %99,2 ve %81,4 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Aynı veri setlerinde yaş bilgisini elde etmede sırayla %93,7 ve %65,1 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir.

(Kalafatić ve diğ. 2023)'te yüz görüntüleriyle (NVIDIA Jetson ailesi gibi) gömülü platformlar üzerinde çalışabilecek uygun bir yaş tahmini yöntemi belirlemek için çalışma yapılmıştır. Denemelerde "Adience" ve "FG-NET" veri setleri kullanılmıştır. Yöntemin gömülü sistemlere uygun olması için "MobileNetV2" evrişimsel sinir ağı modeli kullanılmıştır. Derin sinir ağı eğitimi sırasında optimize edilmek üzere yeni bir kayıp fonksiyonu önerilmiştir. Eğitim sonucunda "Adience" veri seti için %94,9'lik ve "FG-NET" veri seti 97,6'lık için doğruluk elde edilmiştir.

(Oulad-Kaddour ve diğ., 2023)'te yüz görüntüleriyle cinsiyet sınıflandırması yapılmıştır. Veri seti oluşturma için "StyleGAN" sinir ağı kullanılarak 200000 adet etiketli sahte yüz görüntüsü elde edilmiştir (). Oluşturulan sahte yüz veri setiyle "VGG16", "Inception-V3", "ResNet" ve "MobileNet" evrişimsel sinir ağı mimarisi eğitilmiştir. Eğitilen sinir ağı gerçek yüz görselleri içeren dört veri seti ("FERET", "FRAV2D", "FEI" ve "LFW") kullanılarak test edilmiştir. En yüksek doğruluk "VGG16" modelinin "FERET" veri seti üzerinde test edilmesiyle %98,2 değerinde elde edilmiştir.

Tablo 3.1. Cinsiyet sınıflandırması için önerilen dış görüntü temelli yöntemlerin özeti

| **Literatür** | **Görüntü türü** | **Sınıflandırıcı** | **Doğruluk** |
|---|---|---|---|
| (Danisman ve diğ., 2015) | Yüz görüntüsü | DVM ve FIS | %91,25 |
| (Basha ve Jahangeer, 2012) | Yüz görüntüsü | DVM | %98 |
| (Liew ve diğ., 2016) | Yüz görüntüsü | CNN | %98,75 |
| (Dehghan ve diğ., 2017) | Yüz görüntüsü | CNN | %91 |
| (Garain ve diğ., 2021) | Yüz görüntüsü | GRA_NET | %99,2 |
| (Oulad-Kaddour ve diğ., 2023) | Yüz görüntüsü | VGG16 | %98,2 |
| (Kumar ve Misra, 2024) | Yüz görüntüsü | CMNV2 | %96,5 |
| (Amayeh ve diğ., 2008) | El görüntüsü | LDA ve Score-Level Fusion | %98 |
| (Afifi, 2019) | El görüntüsü | CNN ve DVM | %97,3 |
| (Jamshidi ve diğ., 2024) | El görüntüsü | CNN | %99,6 |
| (Camalan ve diğ., 2018) | İskelet Eklem Noktaları | DVM | %96,77 |
| (Makihara ve diğ., 2011) | Yürüme Biçimi | KNN (k=3) ve LDA | %80 |

Tablo 3.2. Yaş grubu sınıflandırması için önerilen dış görüntü temelli yöntemlerin özeti

| **Literatür** | **Görüntü türü** | **Sınıflandırıcı** | **Doğruluk** |
|---|---|---|---|
| (Dong ve diğ., 2016) | Yüz görüntüsü | CNN | %91 |
| (Dehghan ve diğ., 2017) | Yüz görüntüsü | CNN | %70,5 |
| (Liu ve diğ., 2017) | Yüz görüntüsü | CNN | %3,93 (MAE) |
| (Garain ve diğ., 2021) | Yüz görüntüsü | GRA_NET (DNN) | %93,7 |
| (Kalafatić ve diğ. 2023) | Yüz görüntüsü | MobileNetV2 | %97,6 |
| (Kumar ve Misra, 2024) | Yüz görüntüsü | CMNV2 | %96,5 |
| (Abderrahmane ve diğ., 2020) | El görüntüsü | CNN ve GRU | %96,5 |
| (Makihara ve diğ., 2011) | Yürüme Biçimi | KNN (k=3) ve LDA | %74 |

(Kumar ve Misra, 2024)'te maske ile kısmi bir şekilde kapatılmış yüz görüntüleriyle cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırması yapılmıştır. "CAFFE" ve "MobileNetV2" modellerinin birleştirilmesiyle "CMNV2" adlı yeni bir model önerilmiştir. İnsanların yüz görüntülerini yapay bir şekilde maskeleyerek 12160 imge içeren bir veri seti

oluşturulmuştur. Bu veriler cinsiyet ve yaş aralıklarına göre 16 sınıfa ayrılmıştır. İlk etapta "CAFFE" ve "MobileNetV2" modelleri büyük bir veri seti kullanılarak eğitilmiş, sonrasında transfer öğrenme yaklaşımıyla 12160 imge içeren veri seti kullanılarak "CMNV2" eğitimi yapılmıştır. Eğitim sonucunda %96,54 değerinde doğruluk elde edilmiştir.

(Jamshidi ve diğ., 2024)'te el görüntüleriyle cinsiyet sınıflandırması yapılmıştır. Önerilen yöntem CNN temelli üç yollu aktarım şeklinde tasarlanmıştır. Birinci aktarım yolu elin düşük frekanslı görüntüsünden global özellikleri öğrenmeye odaklanmıştır. İkinci aktarım yolu elin yüksek frekanslı görüntüsünden lokal özellikleri öğrenmeye odaklanmıştır. Üçüncü aktarım yolunda ise imge segmentasyonu kullanılmış ve el görselini arka plandan ayırmak için kullanılmıştır. Sonrasında birinci ve ikinci aktarım yolu tam bağlı bir sinir ağı katmanıyla birleştirilmiş ve sınıflandırma sonucu bu katmadan elde edilmiştir. Veri seti olarak "11K Hands" kullanılmıştır ve eğitim sonucunda %99,6 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir.

Cinsiyet ve yaş grubu için önerilen dış görüntü temelli yöntemler sırayla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de özetlenmektedir.

### 3.2. Biyosinyal Temelli Yöntemler

Biyosinyaller canlılarda sürekli olarak ölçülebilen sinyallerdir. Bu sinyaller zamanla değişen (EEG, EKG, vb.) veya uzamsal değişen sinyaller olabilir (ör: DNA).

(Nguyen ve diğ., 2013)'te EEG sinyallerinden "Popüler EEG" ve "paralinguistic" öznitelikleri çıkarılmıştır. Veriler, yaşları "19-69" yıl aralığında olan 20 erkek ve 20 kadın katılımcıdan alınmıştır. DVM sınıflandırıcı eğitilmiştir: yaş grubu için %97,5 ve cinsiyet sınıflandırması için %97,7 civarında test doğruluğu vermiştir.

(Kaushik ve diğ., 2019)'da 60 kişinin katılımıyla oluşturulan bir veri seti kullanılmıştır. 10 saniyelik EEG sinyali katılımcıların gözü kapalıyken toplanmıştır. DWT dönüşümü kullanılarak Delta, Theta, Alpha, Beta ve Gamma beyin sinyalleri elde edilmiştir. Sınıflandırma için LSTM derin sinir ağı eğitilmiştir. En yüksek doğruluk değerini Beta dalgaları: cinsiyet sınıflandırma için %97,5 ve yaş grubu sınıflandırması için %93,7 değerinde vermiştir.

(Wiggins ve diğ., 2008)'de EKG sinyalleriyle yaş grubu sınıflandırması yapılmıştır. Veriler 20 genç (yaş aralığı "21-34" yıl) ve 20 yaşlının (yaş aralığı "68-85" yıl) katılımıyla oluşturulan "Fantasia" veri setinden temin edilmiştir. EKG verilerinden 12 adet zaman ve frekans uzayı özniteliği çıkarılmıştır. Bayes sınıflandırıcı eğitimi %86,1'lik doğruluk vermiştir.

(Cabra ve diğ., 2018)'de EKG sinyalleri kullanılarak kimlik doğrulama ve cinsiyet tanıma yapılmıştır. EKG verileri "ECG-ID" ve "CYBHi" veri setlerinden alınmıştır. İlk aşamada EKG sinyallerinden referans noktaları (P, Q, R, S ve T noktaları) elde edilmiş, sonrasında bu noktalardan zaman ve genliğe bağlı öznitelikler çıkarılmıştır. KNN (k = 1) sınıflandırıcı eğitimi sonrasında "CYBHi" veri setinden %95,0 ve "ECG-ID" veri setinden %88'lik doğruluk elde edilmiştir.

(Hosen ve diğ., 2015)'te EMG sinyalleriyle yaş grubu sınıflandırması yapılmıştır. Veriler 10 kişinin katılımıyla kolun ön kısmına takılan 3 adet EMG elektrotu ile toplanmış ve her katılımcıdan 3 kez ölçüm alınmıştır. EMG sinyalinin 4 seviyeli DWT dönüşümü alınmış, sonrasında 7 adet zaman uzayı ve 3 adet frekans uzayı özniteliği çıkarılmıştır. Yapay sinir ağı eğitimi sonucunda 0.058 değerinde Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error MSE) değeri elde edilmiştir.

(Lee ve diğ., 2022)'de yürüyüş biçimine bağlı cinsiyet tanıma yapılmıştır. Yapılan çalışmaya 12 erkek ve 13 kadın katılmıştır. Katılımcıların ayakaltına iki basınç sensörü yerleştirilmiş ve bu sensörler ile yürüyüş döngüsünün fazı (evresi) belirlenmiştir. Buna ek olarak katılımcıların dizine IMU sensör yerleştirilmiştir. Farklı bacak kaslarının uyarılmasını incelemek için katılımcının bacağına 9 adet EMG probu yerleştirilmiştir. Her bir katılımcıdan 250 adım atması istenmiştir ve her bir adımdan 225 EMG özniteliği, 3 adet zamansal ve kinematik öznitelik elde edilmiştir. Rastgele Orman (RF) sınıflandırıcısı eğitimi %99,1'lik doğruluk vermiştir.

(Aydemir ve diğ., 2021)'de Fotopletismografi (PPG) sinyalleriyle cinsiyet sınıflandırması yapılmıştır. Veri seti hipertansiyon ve normal tansiyonlu kişilerden toplanmıştır. Veri toplamaya 105 erkek ile 105 kadın katılmıştır. Toplanan verilerden ilk aşamada dalgacık dönüşümü katsayıları hesaplanmış sonrasında ise bu katsayılardan istatistiksel değerler

hesaplanmıştır. Eğitim sonucunda karar ağacı sınıflandırıcı %74,77 doğruluk değeri vermiştir.

(Arif ve diğ., 2024)'te EKG verileri kullanarak cinsiyet sınıflandırma yapılmıştır. EKG verileri "ECG ID" veri setinden temin edilmiştir. Sınıflandırıcı olarak rastgele orman sınıflandırıcısı kullanılmıştır, veri seti içerisinde bulunan filtrelenmiş veriler ile yapılan eğitim sonucunda %65,8'lik doğruluk elde edilmiştir.

Cinsiyet ve yaş grubu için önerilen biyosinyal temelli yöntemler sırayla Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'te özetlenmektedir.

Tablo 3.3. Cinsiyet sınıflandırması için önerilen biyosinyal temelli yöntemlerin özeti

| Literatür | Biyosinyal türü | Sınıflandırıcı | Doğruluk |
|---|---|---|---|
| (Nguyen ve diğ., 2013) | EEG | DVM | %97,7 |
| (Kaushik ve diğ., 2019) | EEG | LSTM derin sinir ağı | %97,5 |
| (Cabra ve diğ., 2018) | EKG | KNN (k = 1) | %95,1 |
| (Arif ve diğ., 2024) | EKG | Rastgele Orman | %65,8 |
| (Lee ve diğ., 2022) | EMG | Rastgele Orman | %99,1 |
| (Aydemir ve diğ., 2021) | PPG | Karar ağacı | %74,7 |

Tablo 3.4. Yaş grubu sınıflandırması için önerilen biyosinyal temelli yöntemlerin özeti

| Literatür | Biyosinyal türü | Sınıflandırıcı | Doğruluk |
|---|---|---|---|
| (Nguyen ve diğ., 2013) | EEG | DVM | %97,5 |
| (Kaushik ve diğ., 2019) | EEG | LSTM derin sinir ağı | %93,7 |
| (Wiggins ve diğ., 2008) | EKG | Bayes sınıflandırıcı | %86,1 |
| (Hosen ve diğ., 2015) | EMG | Yapay sinir ağı | 0,058 (MSE) |

## 3.3. Biyometrik Yöntemler

Kişilere ait biyometrik özellikleri iki gruba ayırmak mümkündür: Fiziksel Biyometri (iris ve parmak izi gibi) ve Davranışsal Biyometri (yürüme şekli, yazma şekli, imza ve dokunma gibi). Biyometrik özellikler, ayırt edicilik açısından iki gruba ayırılabilir: Sert Biyometri ve Yumuşak Biyometri. Sert Biyometri (Hard Biometrics) kişiye özeldir, bir kişiyi diğerlerinden ayırt etmek için yeterli bilgi sağlamaktadır (iris ve parmak izi gibi). Yumuşak Biyometri (Soft Biometrics) kişileri ayırt etme için yeterli bilgi sağlamamakta ama ayırt etmeye destekleyici bilgiler sağlamaktadır (cinsiyet ve yaş grubu gibi) (Kurban ve Yildirim, 2024).

İris görüntülerinden cinsiyet sınıflandırması (Tapia ve diğ., 2016) (Bansal ve diğ., 2012)'de ve yaş grubu sınıflandırması (Erbilek ve diğ., 2013) (Sgroi ve diğ., 2013)'te yapılmıştır. (Tapia ve diğ., 2016)'da NIR iris görselleri içeren iki veri seti kullanılmıştır. 750 erkek ile 750 kadın katılımcıdan toplanan birinci veri seti eğitim, 175 erkek ve 148 kadın katılımcıdan olan ikinci veri seti ise test için kullanılmıştır. NIR iris görüntüleri tek boyutlu sinyallere çevrilerek tek boyutlu Gabor filtresi uygulanmıştır. Filtre çıktısı nicemlendikten sonra ikili iris kodu elde edilmiştir ve eğitimde kullanılacak öznitelikleri oluşturmuştur. Öznitelik seçimi yapıldıktan sonra DVM sınıflandırıcı eğitilmiş ve %89'luk doğruluk elde edilmiştir. (Erbilek ve diğ., 2013)'te 200 kişinin katılımıyla veri seti oluşturulmuştur. İris görsellerinden 12 adet geometrik öznitelik çıkarılmıştır. Öznitelikler arasındaki korelasyon dikkate alınarak öznitelik seçimi yapılmıştır. Öznitelik seçimi sonrası farklı sınıflandırıcılar eğitilmiş ve DVM sınıflandırıcıyla %62 değerinde doğruluk elde edilmiştir.

Parmak iziyle cinsiyet sınıflandırması (Tom ve Arulkumaran, 2013) (Gupta ve Rao, 2014)'te ve yaş grubu sınıflandırması (Falohun ve diğ., 2016) (Ceyhan ve diğ., 2014)'te yapılmıştır. (Tom ve Arulkumaran, 2013)'te parmak izi veri seti ve gerçek zamanlı toplanan parmak izi görselleri kullanılmıştır. Elde edilen görseller 512×512 piksel boyutuna ölçeklenmiş ve ön işleme ile ikili görsele çevrilmiştir. Ön işleme sonrası parmak izi görsellerinin DWT dönüşümü alınarak 19 adet öznitelik ve PCA ile 512 adet öznitelik toplamda 531 öznitelik elde edilmiştir. Minimum uzaklık sınıflandırıcı ile %70'lik doğruluk elde edilmiştir. (Falohun ve diğ., 2016)'da 280 kişilik veri seti oluşturulmuş (eğitimde 140 kişilik veri kullanılmıştır) ve (Tom ve Arulkumaran, 2013)'deki gibi parmak izinden DWT ve PCA ile öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Yaş grubu sınıflandırması için eğitilen minimum uzaklık sınıflandırıcısı %82'lik doğruluk vermiştir.

El yazısıyla cinsiyet sınıflandırması (Liwicki ve diğ., 2011) (Siddiqi ve diğ., 2015)'te ve yaş grubu sınıflandırması (Bouadjenek ve diğ., 2015) (Basavaraja ve diğ., 2019)'da yapılmıştır. (Liwicki ve diğ., 2011)'de 40 erkek ve 40 kadından eğitim verisi toplanmıştır. Sınıflandırıcı eğitimi için her bir eğitim verisinden 29 adet "çevrimiçi" ve 9 adet "çevrimdışı" öznitelik çıkartılmıştır. Beklenti Maksimizasyon (Expectation Maximization EM) sınıflandırıcısı eğitimi, cinsiyet ayrımında %67'lik doğruluk vermiştir. (Bouadjenek ve diğ., 2015)'te İngilizce el yazısı verilerini "IAM" veri setinden

elde edilmiştir. Verilerden HOG ve Gradient of LBP (GLBP) öznitelikleri çıkarılmıştır. DVM sınıflandırıcı eğitimi sonucunda %70 civarında doğruluk elde edilmiştir.

Biyometrik özelliklerden sayılan ses işaretleriyle yaş grubu ve cinsiyet sınıflandırması ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Li ve diğ., 2013) (Bahari ve diğ., 2014) (Alkhawaldeh, 2019). Cinsiyet sınıflandırması amacıyla (Alkhawaldeh, 2019)'daki çalışmada eğitim verileri hazır bir veri setinden temin edilmiştir. Ses işaretlerinden öznitelikler çıkartıldıktan sonra sınıflandırıcı eğitimi yapılmıştır. DVM ile %99,7 ve derin öğrenme ile %99,9 seviyesinde duyarlılık elde edilmiştir.

(Davarcı ve Anarim, 2023)'te akıllı telefondaki hareket sensörlerinden toplanan yürüme biçimi verileriyle cinsiyet sınıflandırması yapılmıştır. Sınıflandırma eğitiminde kullanılan veri setlerindeki verileri eğitim ve test veri setlerine ayrılmış, ve eğitim veri setinden yapay veriler üretilmiştir. Sonrasında Sürekli Dalgacık Dönüşümü kullanılarak öznitelikler çıkartılmıştır. Sınıflandırıcı olarak 3-katman CNN ile LSTM kullanılmış ve "BOUN" veri setinde %94,83 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir.

Tablo 3.5. Cinsiyet sınıflandırması için biyometrik özellikleri kullanan bazı yöntemlerin özeti

| Literatür | Biyometrik Özellik | Sınıflandırıcı | Doğruluk |
|---|---|---|---|
| (Tapia ve diğ., 2016) | İris | DVM | %89 |
| (Bansal ve diğ., 2012) | İris | DVM | %83 |
| (Tom ve Arulkumaran, 2013) | Parmak izi | PCA ve Minimum Uzaklık | %70 |
| (Gupta ve Rao, 2014) | Parmak izi | Yapay sinir ağı | %91 |
| (Kong ve diğ., 2024) | Parmak izi | Derin sinir ağı | %87,21 |
| (Liwicki ve diğ., 2011) | El yazısı | EM | %67 |
| (Siddiqi ve diğ., 2015) | El yazısı | DVM | %73 |
| (Alkhawaldeh, 2019) | Ses | DVM | %99,7 (duyarlılık) |
| (Davarcı ve Anarim, 2023) | Yürüme Biçimi | CNN + LSTM | %94,83 |

Tablo 3.6. Yaş grubu sınıflandırması için biyometrik özellikleri kullanan bazı yöntemlerin özeti

| Literatür | Biyometrik Özellik | Sınıflandırıcı | Doğruluk |
|---|---|---|---|
| (Erbilek ve diğ., 2013) | İris | DVM | %62 |
| (Sgroi ve diğ., 2013) | İris | Rastgele Orman | %64 |
| (Falohun ve diğ., 2016) | Parmak izi | PCA ve Minimum Uzaklık | %82 |
| (Ceyhan ve diğ., 2014) | Parmak izi | KNN (k = 1) | %83 |
| (Bouadjenek ve diğ., 2015) | El yazısı | DVM | %70 |
| (Basavaraja ve diğ., 2019) | El yazısı | DVM | %66 |

(Kong ve diğ., 2024)'te parmak izi imgeleriyle cinsiyet sınıflandırması yapılmıştır. Yapışkan bantla alınan parmak izlerinden yüksek kaliteli imgeler elde etmek için parmak izlerinin optik koherans tomografiyle çıkarılması önerilmiştir. 98 katılımcıyla veri toplama yapılmıştır (52 erkek ve 46 kadın). İki kollu bir derin sinir ağı sınıflandırma işlemi için kullanılmıştır. Derin sinir ağının ilk kol uzamsal özellikleri öğrenme amaçlı kullanılmıştır. İkinci koldaysa Ayrık Kosinüs Dönüşümü kullanımıyla frekans uzayı özelliklerini öğrenen ağ tasarlanmıştır. Sonrasında bu iki kol birleştirilmiş ve birleştirilen bu ağın eğitimi sonucunda 10 katlı çapraz-doğrulama veri seti üzerinde %87,21 değerinde ortalama doğruluk elde edilmiştir.

Cinsiyet ve yaş grubu için biyometrik özellikler kullanan bazı yöntemler sırayla Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da özetlenmektedir.

### 3.4. Dokunmatik Ekranlarla Yapılan Çalışmalar

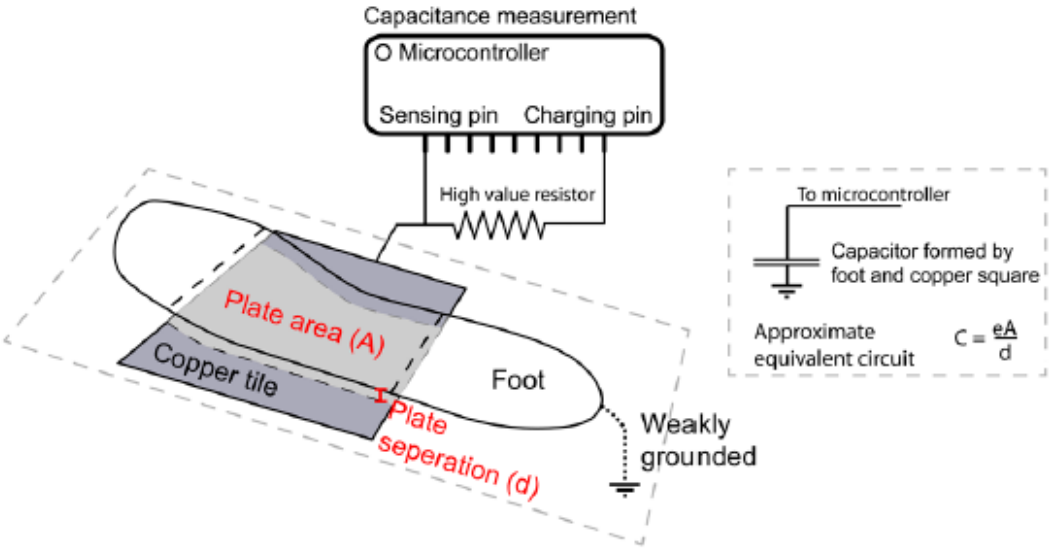
İnsanın yaptığı birçok eylem elektriksel açıdan kapasitans değişimine neden olmaktadır, (Bian ve diğ., 2024)'te literatürdeki çalışmalar derlenmiştir ve kapasitif algılamanın (veya elektrik alan değişiminin) kullanım amaçları üç ana kategoriye ayırılmıştır:

- Vücut parçası elektrik alanı algılama (göz kırpma, yüz ifadeleri, el hareketler, …).
- Tüm vücut elektrik alanı algılama (vücut hareketi, iç mekân konumlandırma, …).
- Vücuttan vücuda elektrik alanı algılama (sosyal mesafe, işbirlikçi oyunlar, …).

Bu üç ana kategorinin altında birçok uygulama yapılmış ama kapasitans ölçümüyle cinsiyet veya yaş grubu belirlemeyle ilgili hiçbir çalışma bulunmamaktadır.

Literatürde, tezin amacına en yakın yöntemler dokunmatik ekranlarla yapılan yöntemlerdir. Çünkü çoğu dokunmatik ekran kapasitif algılama temelli çalışmaktadır. Dokunmatik ekranların haricinde kapasitif çalışan neredeyse hiçbir yöntem önerilmemiş, sadece (Konings ve diğ., 2022)'de önerilen yöntemde kapasitif bir zemin kullanılarak katılımcıların yürüyüşleri kaydedilmiştir. Kapasitif zemin yan yana bağlanan 0,6 m × 0,6 m alana sahip panellerden oluşmaktadır. Her bir panel ise 25 adet karesel bakırdan oluşmaktadır (bunlar kondansatör plakaları gibi çalışmaktadır). Şekil 3.1'de gösterildiği gibi kapasitans ölçümleri için bir mikrodenetleyici kullanılmaktadır. Test zemini 0,6 m × 4,8 m alana sahip olup 200 adet bakır kare içermektedir. 200 adet bakır karenin ölçtüğü

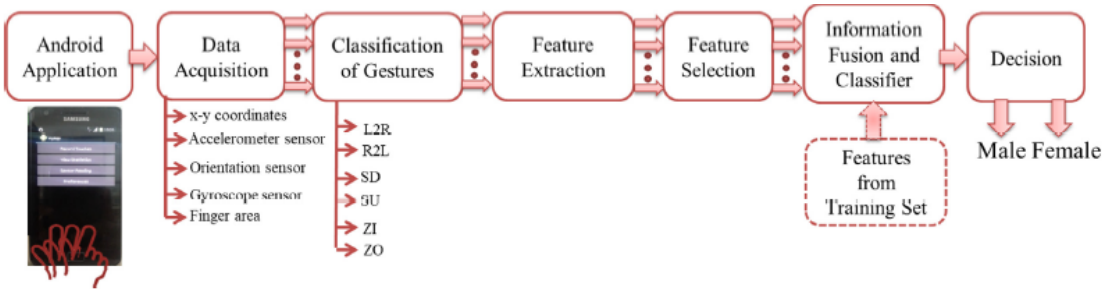
kapasitans değerleriyle 200 piksellik kapasitans görüntüsü oluşturulmuştur. Veri toplamaya 11 erkek ve 12 kadın katılmış ve katılımcıların test zemini üzerinde yürümeleriyle veri toplama yapılmıştır. Elde edilen veriler yürüyüş şeklinin kapasitif olarak ifade edilmesinden ibarettir. Kapasitif zeminden insan cisminin fizyolojisi veya vücut dokularıyla ilgili hiçbir bilgi elde edilmemiştir. Cinsiyet sınıflandırmasında ayakkabı ölçüsü ve adım uzunluğu gibi uzamsal bilgilerin yürüme hızı gibi zamansal bilgilerden daha faydalı olduğu anlatılarak CNN derin sinir ağı eğitilmiş ve %93,3 değerinde doğruluk elde edilmiştir.




Şekil 3.1. Kullanıcı ayağıyla döşeme arasında oluşan kapasitans (Konings ve diğ., 2022)

(Maki-Kihnia, 2021)'de dokunma davranışı temelli cinsiyet sınıflandırması yapılmıştır. Dokunma davranışlarını kaydetmek için Android mobil uygulama (oyun) tasarlanmıştır. Mobil uygulama dört dokunma davranışını (dokunma jesti) kaydetmektedir. Bunlar: dikey yönlerde (yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya) ile yatay yönlerde (soldan sağa ve sağdan sola) parmağı ekran üzerinde kaydırma jestidir. Sınıflandırıcı eğitimi için her bir yöndeki dokunma davranışı ile ilgili 8 adet öznitelik kullanılmıştır. Bunlar dokunmanın: genişlik, yükseklik, mesafe, süre, maksimum hız, ortalama hız, x-ekseni maksimum ivme ve y-ekseni maksimum ivmesidir. Dikey ve yatay yönlerdeki kaydırma davranışları iki farklı sınıflandırma problemi olarak ele alınmıştır. Dikey yönde DVM sınıflandırıcı %72,60'lik doğruluk, yatay yönde karar ağacı sınıflandırıcı %71,06'lik doğruluk vermiştir.

(Jain ve Kanhangad, 2019)'de dokunma jestleri ile cinsiyet tanıma yapılmış ve önerilen yöntemin grafiksel özeti Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Dokunma jestlerini toplama için Android mobil uygulama yazılmıştır. Toplanan dokunma jestleri: yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya, sağdan sola, soldan sağa kaydırma, yakınlaştırma ve uzaklaştırmadır. Jestler ile ilgili "birincil" ve "ikincil" özellikler; toplamda yedi özellik toplanmıştır. Birincil özellikler: ivmeölçer, jiroskop, oryantasyon sensörü ve dokunan parmağın ekran üzerinde kapladığı alanın bilgileridir. İkincil özellikler dokunma jestlerinin ekran üzerindeki x-y koordinatları kullanılarak elde edilmiştir. İkincil özellikler: kaydırma hızı (kaydırma: ekrana dokunurken yapılan kaydırma hareketi/jesti), nokta eğriliği ve kaydırma uzunluğudur. Dokunma jestlerinin yapıldığı sırada, ekran üzerindeki her bir dokunma konumu için birincil ve ikincil özellik değerlerinin kaydedilmesiyle 2-boyutlu özellik haritası oluşturulmuştur. 2-boyutlu özellik haritasındaki her bir dokunma konumu için kaydedilen özellik değeri o konumdaki pikselin değeri olmuştur. Böylece birincil ve ikincil özelliklerden 9 adet 2-boyutlu özellik haritası elde edilmiştir. 2-boyutlu özellik haritalarından öznitelik çıkarımı için "GIST" tanımlayıcıları kullanılmıştır. "GIST" kullanılarak her bir 2-boyutlu özellik haritasından 512-boyutlu öznitelik vektörü çıkartılmıştır. Çıkartılan 512 öznitelikten, en uygun öznitelikleri seçmek için ileri yönlü öznitelik seçim yöntemi kullanılmıştır. Farklı sayıda kişilerin katılımıyla iki adet veri seti oluşturulmuştur (veri setlerinde kullanılan telefon modelleri farklıdır) ve sınıflandırmada KNN (k=1) kullanılmıştır. Tüm jestler bir arada kullanıldığında birinci veri seti %92.96'lık doğruluk ve ikinci veri seti %93,65'lik doğruluk vermiştir.




Şekil 3.2. Dokunma jestleriyle cinsiyet algılama (A. Jain ve Kanhangad, 2019)

(Davarci ve Anarim, 2021)'da akıllı telefonun ivmeölçer sensörü kullanılarak cinsiyet tanıma yapılmıştır. Veri toplama için Android uygulama tasarlanmış ve dokunmayla (tıklama jestiyle) ilgili ivmeölçer sensörünün verileri kaydedilmiştir. Sensör verileri

incelenirken kullanıcının hareket durumuna bağlı olarak iki senaryo göz önünde bulundurulmuştur: statik senaryo (ayakta durma ve oturma gibi) ve dinamik senaryo (yürüme gibi). 50 erkek ve 50 kadının katılımıyla statik senaryo için 5206, dinamik senaryo için 5219 tıklama verisi toplanmıştır. Toplanan verilerden çıkartılan öznitelik sayısı statik ve dinamik senaryo için sırayla 48 ve 52 özniteliktir. Çalışmada farklı sınıflandırıcılar eğitilmiş, statik ve dinamik senaryolar için DVM sınıflandırıcı sırayla %89,7 ve %86,3 değerinde en yüksek doğruluğu vermiştir.

(Miguel-Hurtado ve diğ., 2016)'da dokunmatik ekranlarla cinsiyet tanıma yapılmıştır. Çalışmada, 57 erkek ve 59 kadının katılımıyla oluşturulan veri seti kullanılmıştır. Toplanan veriler dokunmatik ekran üzerinde dört yönde yapılan kaydırma jestleri/hareketleridir. Toplanan verilerdeki kaydırma yönleri ise: soldan sağa, sağdan sola, yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarıya doğrudur. Sınıflandırıcı eğitiminde kullanılmak üzere kaydırma jestinden 14 adet öznitelik çıkartılmıştır. Çıkartılan öznitelikler: toplam uzunluk, toplam süre, genişlik, yükseklik, alan, ortalama kalınlık, ortalama baskı, maksimum hız, ortalama hız, maksimum ivme, ortalama ivme, ortalama yay mesafesi, maksimum yay mesafesi ve başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru yapılan açıdır. Çalışmada belirtildiği üzere Android işletim sistemi baskı şiddetini parmağın baskı yaparken kapladığı alandan çıkartmaktadır. Soldan sağa yapılan kaydırma jesti için eğitilen Naïve Bayes sınıflandırıcı %71,8 değerinde en yüksek doğruluğu vermiştir. Sınıflandırıcı eğitiminde ortalama kalınlık, maksimum hız ve ortalama yay uzunluğu öznitelikleri kullanılmıştır. Farklı yönlerdeki jestler için eğitilen sınıflandırıcıların birlikte kullanılmasıyla doğruluğu arttırmak için puan seviyesi ve karar seviyesi birleştirme teknikleri denenmiştir. Karar seviyesi birleştirme %78,2 değeriyle en yüksek doğruluğu vermiştir.

(Hernandez-Ortega ve diğ., 2017)'de dokunma jestleriyle yaş grubu sınıflandırması yapılmıştır. 89 çocuk ve 30 yetişkinin dokunma verisini içeren veri setinin toplanmasında tablet ve telefon kullanılmıştır. Çocukların ve yetişkinlerin nöromotor becerileri farklıdır. 10 yaş altı çocuklar yetişkinlere göre kaslarını düzgün ve akıcı bir şekilde kullanamamaktadır. Bu farklılık dokunmatik ekran üzerinde yapılan jestlere yansımaktadır. İki yaş grubunun karmaşık kas hareketlerini daha basit hareketlere ayrıştırıp analiz etme imkânı veren "Sigma-Lognormal" modeli kullanılmıştır. Bunu

uygulamak için dokunmatik ekran üzerinde yapılan sürükle ve bırak jestleri "Sigma-Lognormal" modeline göre ayrıştırılmıştır. Ayrıştırmadan sonra 20 adet öznitelik elde edilip DVM-RBF sınıflandırıcı eğitilmiştir. DVM-RBF sınıflandırıcı telefon verilerinde %91,4 ve tablet verilerinde %95,4'lik doğruluk vermiştir.

(Acien ve diğ., 2019)'da dokunma jestleriyle yaş grubu sınıflandırması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan dokunma verileri hazır bir veri setinden elde edilmiştir. Akıllı telefon ve tablet ile 89 çocuk ve 30 yetişkinin katılımıyla toplanmıştır. Toplanan veriler dokunmatik ekran üzerinde yapılan kaydırma ve tıklama jestlerini içermektedir. Kaydırma jestlerinden 21 adet "global öznitelik" ve "Sigma-Lognormal" modeli kullanılarak 20 adet öznitelik çıkartılmıştır. Tıklama jestinden iki adet öznitelik çıkarılmıştır: tıklama süresi ve tıklama konumuyla hedef nokta (tıklanması gereken) arasındaki mesafe. Öznitelik çıkarımından sonra DVM-RBF sınıflandırıcı eğitilmiştir. Kaydırma jestinin "Sigma-Lognormal" ve "global öznitelikleri" için elde edilen doğruluk sırayla (tabletten toplanan veriler için geçerlidir) %96,3 ve %94,5 değerindedir. Tıklama jestinden elde edilen doğruluk tablet verileri için %80 ve telefon veriler için %85,4 değerindedir.

(Vatavu ve diğ., 2015)'te dokunma jestleriyle yaş grubu sınıflandırması yapılmıştır. Bu çalışmada hazır veri seti kullanılmıştır. Dokunma jestleri telefon ve tablet ile toplanmış olup veri toplamaya 89 çocuk ve 30 yetişkin katılmıştır. Toplanan dokunma jesti tıklama jestidir. Tıklama jestinden iki öznitelik elde edilmiştir: tıklama zamanı ve offset mesafesi (tıklamanın yapıldığı konum ile tıklanması gereken konum arasındaki mesafedir). Çıkarılan iki adet öznitelik kullanılarak Yetişkin/Çocuk yaş gruplarına olasılık yoğunluk fonksiyonu uydurulmuştur. Verinin Normal dağılım olduğu varsayılmıştır. Bayes sınıflandırıcıyla, tek-tıklama jesti için %85'lik doğruluk elde edilmiştir.

(Buriro ve diğ., 2016)'te tuş vuruşu dinamikleriyle yaş grubu, cinsiyet ve kullanılan el tahmini yapılmıştır. Hazır bir veri seti kullanılmıştır "TDAS", 150 katılımcıdan veri toplanmış ve her katılımcıdan 10 kez veri alınmıştır. Katılımcıların 45'i erkek ve 105'i kadın 136'si sağ 16'sı sol ellidir. Toplanan veriler tuş vuruşu zamanlamaları, dokunma basıncı ve şifre uzunluğu bilgilerini içermektedir (şifreler rakamlardan oluşmaktadır). Bu çalışmada 4, 6, 8, 10, 12 14 ve 16 rakamdan oluşan şifreler kullanılmış ve her bir şifre uzunluğu için sırayla 14, 22, 30, 38, 46, 54 ve 62 zamansal öznitelik çıkarılmıştır.

Öznitelik çıkarımından sonra farklı sınıflandırma yöntemleri kullanılarak eğitim yapılmıştır. En iyi performans Rastgele Orman sınıflandırıcıyla elde edilmiş olup; cinsiyet için %82,8 (14 rakamlı şifre), yaş grubu için %87,9 (4, 10 ve 14 rakamlı şifre) ve kullanılan el tahmini için %95,5'luk (12 rakamlı şifre) doğruluğa ulaşılmıştır.

(Tolosana ve diğ., 2022)'te çocuk yaş grubu sınıflandırması yapılmıştır. Çocukların dokunmatik ekranlarla etkileşimini kaydetmek için mobil uygulama tasarlanmıştır. Çocukların etkileşimi iki kategoriye göre kaydedilmiştir: parmak ile dokunarak yapılan jestler ve kalem ile yapılan jestler. Veri toplamaya 438 kişi katılmış olup katılımcıların yaşları 18 ay ile 8 yıl arasındadır. Katılımcılardan 6 test yapmaları istenmiştir. İlk dört test parmak ile yapılmıştır. Test 1: dokunma ve tepki süresi (kaba hareket becerileri). Test 2: sürükle bırak (ince hareket becerileri). Test 3: yakınlaştırma (ince hareket becerileri). Test 4: uzaklaştırma (ince hareket becerileri). Son iki test kalem ile yapılmıştır; Test 5: spiral testi ve Test 6: resim testi. Çocuklar üç yaş grubuna ayrılmıştır: Grup 1: 1-3 yaş arası, Grup 2: 3-6 yaş arası, Grup 3: 6-8 yaş arası. Yaş grubu sınıflandırması için Test 6'da toplanan veriler kullanılmıştır. Bu verilerden insan-bilgisayar etkileşimi ile alakalı zaman, kinematik, yön, geometri ve basınç bilgileri içeren öznitelikler çıkarılmıştır. Öznitelik çıkarma sonrasında farklı sınıflandırıcılar eğitilmiş ve en iyi performansı %90'lık doğrulukla DVM sınıflandırıcı vermiştir.

Tablo 3.7. Cinsiyet sınıflandırması için dokunmatik ekran veya kapasitif algılama kullanan bazı yöntemlerin özeti

| **Literatür** | **Arayüz** | **Algılama Türü/Sensör** | **Kullanılan Veri** | **Sınıflandırıcı** | **Doğruluk** |
|---|---|---|---|---|---|
| (Konings ve diğ., 2022) | Kapasitif zemin | Kapasitif algılama | Yürüyüş şekli | CNN | %93,3 |
| (Cascone ve diğ., 2022) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Tuş vuruşu dinamiği | KNN (k=5) | %92 |
| (Maki-Kihnia, 2021) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | DVM | %72,6 |
| (Jain ve Kanhangad, 2019) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama ve hareket sensörleri | Dokunma jestleri | KNN (k = 1) | %92,96 |
| (Davarci ve Anarim, 2021) | Dokunmatik ekran | İvmeölçer | Dokunma jestleri | DVM | %89,7 |
| (Miguel-Hurtado ve diğ., 2016) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | Naïve Bayes | %71,8 |
| (Guarino ve diğ., 2023) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | VGG19 | %94 |

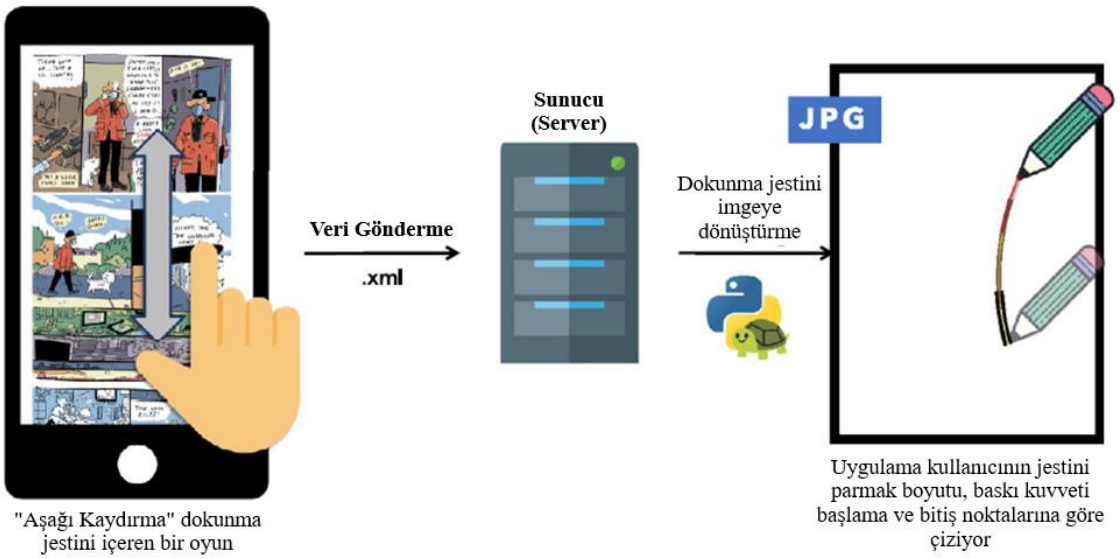
Tablo 3.8. Yaş grubu sınıflandırması için dokunmatik ekran kullanan bazı yöntemlerin özeti

| Literatür | Arayüz | Algılama Türü/Sensör | Kullanılan Veri | Sınıflandırıcı | Doğruluk |
|---|---|---|---|---|---|
| (Cascone ve diğ., 2022) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Tuş vuruşu dinamiği | KNN (k=5) | %84 |
| (Hernandez-Ortega ve diğ., 2017) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | DVM | %91,4 |
| (Acien ve diğ., 2019) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | DVM | %96,3 |
| (Vatavu ve diğ., 2015) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | Bayes | %85 |
| (Buriro ve diğ., 2016) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | Rastgele Orman | %87,9 |
| (Tolosana ve diğ., 2022) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | DVM | %90 |
| (Guarino ve diğ., 2023) | Dokunmatik ekran | Kapasitif algılama | Dokunma jestleri | VGG19 | %99 |

(Cascone ve diğ., 2022)'de cinsiyet ve yaş bilgisini elde etmek amacıyla akıllı telefon kullanıcılarının dokunmatik ekran üzerindeki tuş vuruş dinamiğini temel alan bir çalışma yapılmıştır. Denemeler üç veri setiyle yapılmıştır ("RHU", "KDAp" ve "TDAS" veri setleri), "basma/bırakma süresi" ve "parmak dokunma boyutu" tuş vuruş dinamikleri kullanılmıştır. Makine öğrenmesi sınıflandırıcıları eğitmek için tuş vuruş dinamiklerinden çeşitli istatistiksel bilgiler çıkarılmıştır (minimum, maksimum değer, standart sapma, vb.). En yüksek doğruluk değerleri "TDAS" veri setinden cinsiyet için %92 ve yaş bilgisi için %84 değerinde KNN (k=5) sınıflandırıcı kullanılarak elde edilmiştir.

(Guarino ve diğ., 2023)'te akıllı telefonların dokunmatik ekranları üzerinde yapılan dokunma davranışları (jestleri) kullanılarak cinsiyet ve yaş grubu tespiti yapılmıştır. Veri toplamak için bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi erkan üzerinde yapılan dokunma jestlerinden bir imge oluşturulmuştur. Oluşturulan imge dokunma jestini temsil eden eğriler içermektedir; eğrinin uzunluğu ekran üzerinde jest yapılırken çizilen yol, eğrinin genişliğini parmak boyutu ve oluşturulan pikselin değerini parmağın uyguladığı basınç temsil etmektedir. Toplanan dokunma jestleri: kaydırma, yakınlaştırma, sürükleme ve bırakma jestleridir. VGG19 derin sinir ağı eğitimi sonucunda dokunma jestleri arasında cinsiyet sınıflandırması en yüksek doğruluk (yukarı aşağı) kaydırma jesti için %81 değerinde elde edilmiştir. Peş peşe yapılan üç kaydırma jesti için

ise %94 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Yaş grubu sınıflandırması için eğitilen VGG19 sinir ağı en yüksek doğruluğu yine kaydırma jesti için %96 değeri ile vermiştir. Peş peşe yapılan üç kaydırma jesti için %99 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Veri toplamaya katılmayan katılımcılar üzerinde test edildiğinde doğruluk değerlerinde %4'lük azalma meydana gelmiştir.




Şekil 3.3. Dokunma jestleriyle cinsiyet sınıflandırması (Guarino ve diğ., 2023)

Cinsiyet ve yaş grubu için dokunmatik ekran veya kapasitif algılama kullanan bazı yöntemler sırayla Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de özetlenmektedir.

### 3.5. Literatürdeki Yöntemlerin Değerlendirilmesi

(Lin ve diğ., 2016)'da cinsiyet sınıflandırması ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelenip performans değerlendirmesi yapılmıştır. Literatürdeki yöntemlerin performansını değerlendirmek için göz önünde bulundurulan kriterlerin bazıları Tablo 3.9'da verilmiştir. (Lin ve diğ., 2016)'daki çalışmada literatürde cinsiyet sınıflandırması için önerilen yöntemler dış görünüşe bağlı ve dış görünüşe bağlı olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmıştır. Dış görünüşe bağlı yöntemler üç alt kategoriye ayrılmıştır: hareketsiz vücut, hareketli vücut ve giysi özelliklerini temel alan yöntemler. Dış görünüşe bağlı olmayan yöntemler iki alt kategoriye ayrılmıştır: biyometrik ve biyosinyal özelliklerini temel alan yöntemlerdir.

Tablo 3.9. Cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırmasını değerlendirme amacıyla önerilen performans ölçütleri

| | |
|---|---|
| **Doğruluk** | Sınıflandırma doğruluğu |
| **Müdahale** | Kişilere bir sensörle müdahale edilmesi |
| **Ayırt edicilik** | Toplanan özelliğin sınıflandırma problemindeki sınıflar arası farklılık göstermesi |
| **Toplanabilirlik** | Verilerin kişilerden kolayca elde edilebilmesi |
| **Kalıcılık** | Aynı kişiye ait verinin zamanla değişmemesi |

Literatürde yaş grubu ve cinsiyet sınıflandırması için benzer yöntemler kullanıldığından her iki sınıflandırma problemi Tablo 3.9'daki kriterlere göre aşağıdaki gibi değerlendirilebilir (değerlendirmelerin özeti Tablo 3.10'da verilmektedir):

- Biyosinyallerin ayrıt ediciliği büyük olduğundan en yüksek doğruluğu vermektedir. Ama müdahale gerektirdiğinden toplanabilirliği düşüktür ve zamanla değiştiği için kalıcılık açısından faydalı veri sağlamamaktadır.
- Dış görünüşe bağlı yöntemlerin ayrıt ediciliği ile sürekliliği ortamın aydınlatılmasından ve görüntü kalitesinden etkilendiği için doğruluğu daha düşüktür. Ancak müdahale gerektirmediğinden veriler daha kolay toplanmaktadır. Görüntülerin kamera ile kolayca toplanması pasif (kullanıcıya müdahale etmeden) ve gerçek zamanlı sınıflandırmayı mümkün kılmaktadır.
- Sert biyometri özel sensör kullanımıyla müdahale gerektirmektedir. Ancak biyosinyal toplamanın gerektirdiği müdahale seviyesinde değildir. Hard biyometrik yöntemlerin sürekliliği diğer yöntemlerden daha iyi olmasına rağmen cinsiyet ve yaş grubunu ayrıt ediciliği ve doğruluğu daha düşüktür. Ek olarak kimlik tespiti için kullanıldığından insanlar bu bilgileri paylaşmada tereddüt etmekte ve bu nedenle bu tip verilerin toplanabilirlik seviyesini düşük olmaktadır. Bu bilgileri kullanma izin gerektirdiğinden pasif ve gerçek zamanlı kullanılmalarını engellemektedir.
- Davranışsal Biyometri ile ilgili verileri toplama için genellikle özel sensör kullanımı gerekli değildir. İnsanların normalde kullandıkları dokunmatik ekranlar, klavye ve mouse sensör yerine geçmektedir. Kullanıcıların alışık olduğu bir eylemin (el yazısı gibi) yapılması istenildiği için müdahale seviyesi biyosinyal ve hard biyometriden daha düşüktür. Kullanıcıların davranış biçimi zamanla değişmektedir. Bu sebeple aynı kişi her zaman aynı davranışı sergilememektedir. Bu da neticede sürekliliği, ayırt ediciliği ve doğruluğu etkilemektedir. Toplanabilirlik müdahale seviyesine bağlı

olduğu için davranışsal biyometrik verileri toplama bu açıdan avantajlıdır (özellikle kamera kullanmanın uygun olmadığı durumlarda). Kullanıcıların sıklıkla kullandığı bir elektronik cihazla yapıldığı takdirde gerçek zamanlı sınıflandırma imkânı sağlamaktadır.

Tablo 3.10. Literatürdeki yöntemlerin performans değerlendirmesi

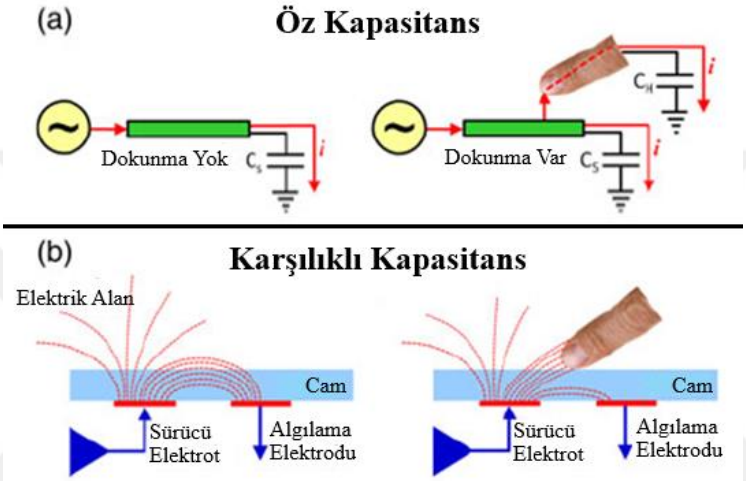
| Ölçüt / Yöntem | Doğruluk | Müdahale | Ayırt Edicilik | Toplanabilirlik | Kalıcılık |
|---|---|---|---|---|---|
| **Dış Görünüş** | Yüksek | Düşük | Orta | Yüksek | Düşük |
| **Biyosinyaller** | Yüksek | Yüksek | Yüksek | Düşük | Orta |
| **Sert Biyometri** | Orta | Orta | Orta | Orta | Yüksek |
| **Davranışsal Biyometri** | Düşük | Düşük | Düşük | Yüksek | Düşük |
| **Kapasitif Algılama** | Orta | Düşük | Orta | Yüksek | Düşük |

Literatürde, dokunma veya kapasitif algılama kullanılarak sınıflandırma yapan yöntemler kullanıcıların sergilediği davranışların (jestlerin) tespit edilip yorumlanmasına dayanmaktadır. Jestlerin tespit edilmesi, dokunmatik ekran veya (Konings ve diğ., 2022)'de önerilen kapasitif yer döşemesi gibi çoklu kapasitif sensör içeren sistemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu tezin konusu olan kapasitif algılama ile cinsiyet ve yaş grubu bilgilerinin elde edilmesinde dokunma jestleri kullanılmamaktadır. Dokunma jestlerinin yerine kullanıcı vücudunun elektriksel özellikleri dokunma eylemi sırasında ölçülmektedir. Bu da dokunan kişinin herhangi bir davranış sergilemesini beklemeden dokunduğu anda kişisel bilgilerinin elde edilmesini sağlamakta olup bu açıdan alanındaki ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Ek olarak, tezde gerçekleştirilen elektronik devrenin düşük maliyeti ve dokunmatik butonun basit yapısı kişisel bilgileri elde etme özelliğinin tüm tüketici elektroniğine entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.

### 3.6. Kapasitif Dokunma Algılama için Önerilen Yöntemler

Kapasitif algılamayı bir elektronik cihaza entegre etmenin en kolay yolu bir dokunmatik buton veya dokunmatik ekran tasarımında kullanmaktır. Bu sebeple tez kapsamında dokunmatik buton/ekran tasarımıyla ilgili literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. (Walker, 2012)'de dokunma algılama ile ekran yüzeyi üzerinde konum bilgisini elde etmek için pratikte kullanılan yöntemler 13 kategoriye ayrılmış ve her kategorinin çalışma prensibi anlatılmıştır. Tez kapsamında kişisel bilgileri dokunma ile elde etmek için kullanılacak

yöntemin insan cisminin elektriksel özelliklerinden maksimum derecede etkilenmesi gerekmektedir. (Walker, 2012)'de anlatılan yöntemler incelendiğinde kapasitif dokunma algılamanın bu tezde belirlenen hedefi gerçekleştirmek için en uygun yöntem olduğu anlaşılmıştır. Çünkü kapasitif algılama (özellikle öz kapasitans ölçümüyle çalışan yöntemler) insan vücudunun tamamını veya büyük bir kısmını devreye elektriksel olarak dahil etmektedir. (Walker, 2012)'de anlatılan diğer dokunma algılama kategorilerinde ise sadece kullanıcı parmağının fiziksel özelliği devreyi etkilemektedir.




Şekil 3.4. P-Cap kapasitif dokunma algılamada ölçülen kapasitans değişimleri: (a) öz kapasitans ve (b) karşılıklı kapasitans (Walker, 2012).

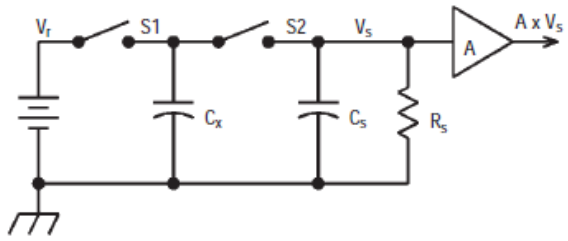
Bir iletkenin öz kapasitansı sonsuz uzaklıkta bulunan 0V'a göre olan elektriksel kapasite değeridir (Walker, 2012). İnsan cismi yere bastığı için vücudun bir tarafı düşük elektriksel potansiyel seviyesinde olup Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bu düşük potansiyel değerinin devredeki 0V seviyesine eşit olduğu (veya devre toprağına bağlı olduğu) varsayılır. Bu sebeple dokunma algılamada kullanılan iletken elektrota dokunulduğunda insan cisminin öz kapasitansı, toprağa bağlı bir kondansatör gibi davranır ve devredeki dokunmatik buton kapasitansının artmasına neden olur. Dokunma algılama, kapasitans artışının ölçülmesiyle yapılır.

Kondansatörün bir plakasına gerilim uygulandığında bu durum (sürücü elektrot – drive electrode) diğer plakada (algılama elektrotu – sense electrode) zıt işaretli yük toplanmasına neden olur ve karşılıklı kapasitans oluşur. İki plaka arasına bir nesne girdiğinde, bu durum plakalar arasındaki elektrik alanın zayıflamasına, iki plaka

arasındaki gerilim farkının azalmasına, algılama elektrotunda daha az yük toplanmasına ve karşılıklı kapasitansın azalmasına yol açar. Dokunma yapıldığında iki elektrotun arasındaki elektrik alanı kullanıcının parmağı kestiği için karşılıklı kapasitansın azalmasına neden olur. Dokunma algılama kapasitans azalmasının ölçülmesiyle yapılır.

Kapasitif dokunma algılamayı gerçekleştirme, kapasitans değişimini ölçebilen devre tasarımı gerektirmektedir. Literatürde, kapasitans değişimini ölçmek için çeşitli devre tasarımları önerilmiştir; NE555 gibi basit bir zamanlayıcı entegresini içeren devreler bulunduğu gibi (Barrett ve Omote, 2010) çok karmaşık analog devreler de bulunmaktadır (Kwon ve diğ., 2018).

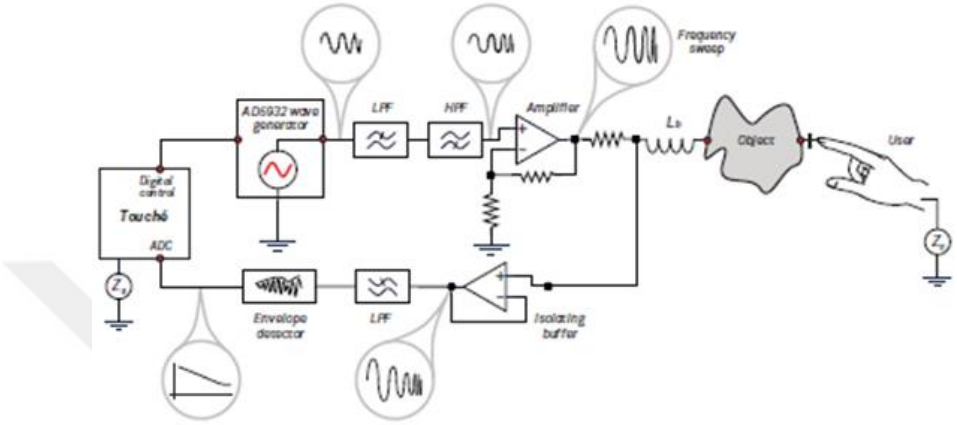
Kapasitans ölçümü için kullanılan bazı analog devrelerin çalışma prensibi (Bian ve diğ., 2024)'te derlenmiştir. Kapasitans, akım ve gerilim gibi doğrudan ölçebilen bir nicelik olmadığından dolayı yoldan ölçülmektedir. Dolayı yoldan ölçüm için ölçülecek kapasitans, çalışma prensibinde kondansatör içeren bir devreye dahil edilmektedir. Osilatör devreleri, çalışma prensibinde kondansatör içeren devrelerden birisidir, (Cheng ve diğ., 2010)'da Colpitts Osilatör devresindeki kondansatör yerine insan vücudunun kapasitansı kullanılmakta ve vücudun neden olduğu kapasitans değişimi osilatörün frekansını değiştirmektedir. Kapasitans ölçümünün bir başka dolaylı yolu (Fu ve diğ., 2019)'da kullanılan "Displacement" akımının ölçümüdür. Bu yöntemde insan vücudunun bir elektrotla yaptığı kapasitif bağlantı elektrotun oluşturduğu kondansatör üzerinden akan akımın değişmesine neden olmaktadır.




Şekil 3.5. Yük transferi yaklaşımıyla kapasitif dokunma algılama (Philipp, 1999)

Şekil 3.5'te gösterilen ve (Philipp, 1999)'da önerilen "Yük Transferi Algılama", gömülü sistemlerde en yaygın kullanılan dokunmatik algılama yöntemidir. Yöntem basitçe, küçük bir kapasitans değerine ($C_x$) sahip olan dokunmatik butondaki elektriksel yükün daha büyük bir kapasitöre ($C_s$) aktarılmasına dayanır. Dokunma olmadığında butonun küçük

bir parazitik kapasitansı vardır. Kullanıcı butona dokunduğunda buton kapasitansı artar ve daha fazla elektriksel yük taşır. Dokunma olduğunda butonun daha fazla yük taşıması büyük kapasitörün daha az sayıda yük transferiyle şarj edilmesine neden olur. Böylece, büyük kapasitörü şarj etmek için yük aktarımının kaç kez yapıldığı sayılarak bir dokunma olayı tespit edilmektedir.



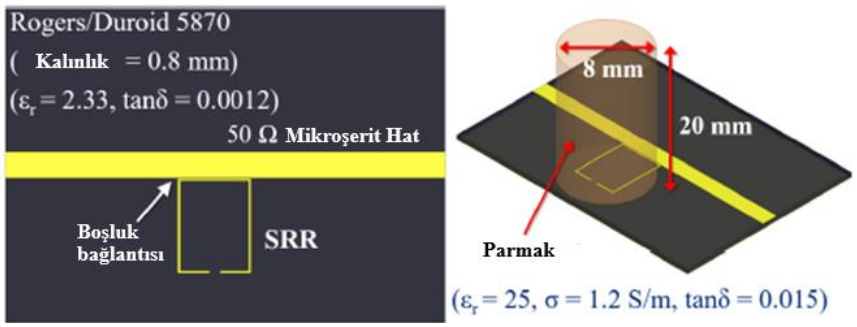

Şekil 3.6. Frekans taramalı kapasitif algılama devresinin blok diyagramı (Sato ve diğ., 2012).

Frekans Taramalı Kapasitif Algılama (FTKA) olarak bilinen daha gelişmiş bir kapasitif dokunma algılama yönteminin blok diyagramı Şekil 3.6'da gösterilmektedir (Sato ve diğ., 2012). Bu yöntemde dokunmatik buton, bir bant durdurucu filtre devresi içinde bir kondansatör görevi görür. Filtre girişine frekansı adım adım artan sinyaller uygulanmaktadır. Filtre çıkışındaki işaretin zarfı bir mikrodenetleyicinin Analog-Dijital Dönüştürücüsü (ADC) tarafından örneklenmektedir. Filtre yanıtını elde etmek için, filtre girişine verilen sinyalin frekans değeri adım adım arttırılmaktadır. Sonrasında her bir frekans değeri için örneklenen filtre çıkışı mikrodenetleyicinin hafızasına kaydedilmektedir. Butona dokunulduğunda kapasitansı artar, bu da filtre yanıtındaki minimum genliğin daha düşük frekanslara doğru kaymasına neden olur. Bu frekans kaymasının tespitiyle dokunma algılama gerçekleşir.

Kullanıcının eli butona yaklaştığında, buton ile insan cismindeki iletken dokular arasında zayıf bir kapasitif bağlantı oluşmaktadır (Sato ve diğ., 2012). Bu bağlantı elektriksel akım için yeni bir ilerleme yolu oluşturmakta ve filtre çıkışına iletilen sinyalin genliğinde değişime neden olmaktadır. İnsan derisi ~1MΩ civarında yüksek direnç değerine sahip

olup (Sato ve diğ., 2012) bu da akımın ilerlemesine engel teşkil eder. Bunun yanında derinin altında kalan dokular ve fizyolojik sıvılar düşük direnç değeri göstererek iletkene benzer davranış sergilerler (Sato ve diğ., 2012). Filtre çıkışının genliği frekans bağımlıdır. Çünkü farklı frekanslarda akımın insan vücudu içerisinde izlediği yol ve geçtiği dokular farklılık göstermektedir. Ek olarak, insan cismi devreyi tamamlamak için dokular ve kemikler aracılığıyla devre toprağına bağlanmakta olup toprak bağlantısı yine kapasitiftir. Bu nedenle hem kullanıcının butona nasıl dokunduğu hem de kullanıcı cisminin toprağa nasıl bağlandığı filtre çıkışındaki elektriksel sinyalin genliğini etkilemektedir.

(Sato ve diğ., 2012)'deki çalışmada "kapasitif profil" ve "filtre yanıtı" aynı anlamda kullanılmaktadır. Şekil 3.6'daki devrede mikrodenetleyici programlanabilir sinyal kaynağının (AD5932) frekansını ayarlamakta ve frekans taraması için frekansı adım adım artan sinyallerin üretimini sağlamaktadır. Frekans taraması; 1 kHz'den başlayıp 17,5 kHz'lik adımlarla 3,5 MHz'de sonlanmaktadır. Frekans taraması; toplamda 200 adet farklı frekansa sahip sinüs dalga üretimiyle tamamlanmaktadır. Sinyal kaynağını tarafından üretilen sinüs işaretin gerilimi bir işlemsel yükselteçle 6,6 Vpp değerine yükseltilmektedir. Filtre devresinde 100 mH indüktans değerine sahip bobin kullanılmakta, dokunma butonu ise devredeki kondansatörü oluşturmaktadır. Filtre çıkışı zarf detektöründen geçirilerek sinüzoidal sinyalin tepe değeri (zarfı) elde edilmektedir. Son olarak Filtre çıkışının zarfı ADC tarafından örneklenip elde edilen sayısal değer mikrodenetleyicinin hafızasına kaydedilmektedir.




Şekil 3.7. Meta-materyal temelli bir dokunma algılama (Memon ve diğ., 2020)

Meta-materyal temelli bir dokunma algılama sistemi (Memon ve diğ., 2020)'de önerilmiş olup Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Bu yöntemde iki adet Ayrık Halka Rezonatörü (Split Ring Resonator SRR) aynı devre kartı üzerine yerleştirilmiştir. Her SRR, farklı

frekanslarda rezonansa girecek şekilde tasarlanmıştır. İki adet SRR kullanımı, sistemin iki dokunma olayını aynı anda algılamasına imkân vermektedir. Bir düğmeye dokunulduğunda, rezonans frekansında bir kayma meydana gelir. Dokunma algılama, bu frekans değişiminin tespit edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. (Sato ve diğ., 2012) ve (Memon ve diğ., 2020)'deki artan devre karmaşıklığı, birden fazla elin dokunması gibi bazı dokunma hareketlerinin tanınmasını, eldiven giyen bir elin tespit edilmesini, kısacası dokunma eylemi hakkında daha fazla bilgi elde edilmesini sağlamaktadır.

# 4. GELİŞTİRİLEN YÖNTEMLER

Bu bölümde, bu tez kapsamında kapasitif algılamayla cinsiyet ve yaş grubu tespiti için geliştirilen yöntemler anlatılmaktadır.

İnsan vücudundaki dokular cinsiyet ve yaşa göre farklılık göstermektedir. Özellikle iletkenliği yüksek olan kas, deri ve kemik dokuları farklılık gösterdiğinden vücut iletkenliğinde de farklık olmasına sebep olmaktadır. Vücut içerisindeki bu iletken dokular arasında en düşük iletkenliğe sahip olan yağ dokuları yer almaktadır. Vücut dokularının elektriksel özelliklerinde dikkate alınması gereken bir diğer konu da frekansa bağlı olarak değişmesidir.

Elektronik devrelerde kullanılan kondansatörler iki iletken plaka (veya birbirine bağlı iletken katmanlar) arası yalıtkan bir malzeme yerleştirilerek üretilmektedir. İletken plakların alanı ve yalıtkan malzemenin elektriksel geçirgenliği kondansatörün kapasitans değerini etkilemektedir. İnsan vücudu içerisinde de yağ dokularının iletkenler dokular arasında bulunması bir biyolojik kondansatör oluşmasına neden olmaktadır.

Bu biyolojik kondansatörün kapasitansı hem cinsiyet ile yaşa göre hem de frekansa göre farklılık göstereceği düşünülerek tez kapsamına geliştirilen ilk yöntemde dokunmatik buton tasarımı (Sato ve diğ., 2012)'de önerilen FTKA yöntemi temel alınarak tasarlanmıştır. FTKA yönteminin (Harrison ve diğ., 2012)'deki çalışmada kullanıcı tanıma amaçlı kullanılması bu yöntemin tercih edilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Kapasitans ölçüm devresi tasarlanırken (Sato ve diğ., 2012)'de önerilen devre yerine daha düşük maliyetli ve daha basit yapılı yeni bir FTKA devresi tasarlandı. Yeni devre dokunma tespitini öz kapasitans ölçümüyle gerçekleştirmekte olup butona dokunulduğunda vücut öz kapasitansı butonun parazitik kapasitansına eklenmektedir. Butona eklenen kapasitansı tüm vücut etkilemektedir. Çünkü vücudun tümü devrenin toprağına giden bir sinyal yolu oluşmasına katkı sağlar.

Kullanıcı ve devre toprağı arasındaki bağlantı şekli, devrenin kapasitans ölçümünü ve dolayısıyla dokunma algılama performansını etkilemektedir. Bu sebepten dolayı, öz kapasitans insan vücudunun çevreyle olan bağlantısından ve kullanıcının butona dokunurken diğer eliyle sergilediği davranıştan etkilenmektedir. Etkilendiği için de

sınıflandırma amacıyla kullanılmasının uygun olmadığı tez kapsamında yürütülen veri toplama süreci sonuncunda anlaşılmıştır.

(Mayrovitz ve diğ., 2016)'daki çalışmada, kol ön kısmının elektriksel geçirgenliğinde cinsiyete göre farklılık olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler dikkate alınarak insan vücudunun tamamından etkilenen bir ölçüm yöntemi yerine dokunan parmağa yakın olan biyolojik dokuların elektriksel özelliklerinden etkilenen bir yöntem kullanmanın uygun olabileceği düşünülmüştür.

Vücudun tamamı yerine sadece kol ön kısmını dokunma algılama devresini etkilemesi için elektriksel sinyaller (elektromanyetik dalgalar) sadece kolun ön kısmında yayılmalıdır. İletkenliği olan bir ortamda EM dalgalar yayıldığında, dalgaların ortam içerisinde ilerleme mesafesi dalgaların frekansıyla ters orantılıdır. Biyolojik dokular iletkenliği olan ortamlarıdır (Gabriel ve diğ., 1996), bu sebeple EM dalgaların frekansı arttıkça biyolojik dokular içerisindeki yayılma mesafesi azalacaktır.

Bu bilgiler dikkate alınarak, dokunmatik butondan kullanıcı vücuduna yüksek frekanslı EM dalgalar ileterek, EM dalgaların yayılımını el ve kol ön kısmında yoğunlaştırmak mümkündür. Bu sayede dokunma algılama devresine en büyük etkiyi el ve koldaki biyolojik dokuların elektriksel özellikleri belirleyecektir.

FTKA yönteminde sadece vücut kapasitansına odaklanılmıştı ve doku farklılıklarının kapasitans farklılığına neden olacağı düşünülmüştü. İnsan vücudunun elektriksel eş devresini temsil eden bir teorik bilgi bulunmaması ve vücudu bir kapasitör gibi düşünerek geliştirilen FTKA temelli yöntemin beklenen sonucu vermemesi tez kapsamında yeni bir elektriksel vücut modeli geliştirilmesini gerektirmiştir.

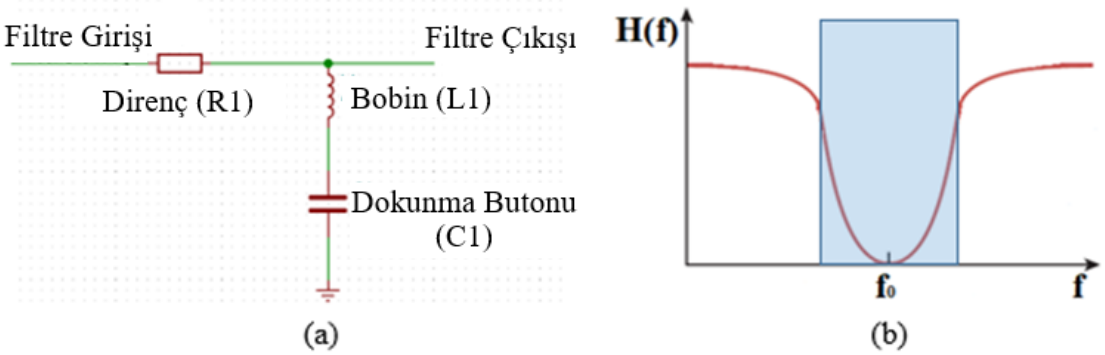
Tez kapsamında ortaya konulan yeni elektriksel vücut modelinde dokuların elektriksel davranışı hakkına hiçbir varsayım bulunmamaktadır. İnsan vücudu, N kapılı bir devre içeren kara kutu gibi ele alınmıştır ve ölçümler sadece iki kapıdan alınmıştır. İnsan vücudu devre modelinin frekansa göre nasıl davranış sergilediği hakkına bilgi edinmek için S-parametre ölçümü kullanılmıştır. Ölçüm için kullanılan 1'inci kapıyı sol başparmak, 2'nci kapıyı ise sağ başparmak temsil etmektedir.

Yeni elektriksel vücut modeli belirlendikten sonra EM dalgaların el ve kolda yoğunlaşacak şekilde yayılmasını sağlamak için dokunmatik butonları içeren yeni devre kartı tasarlanmıştır. Sinyal üretimi ve ölçüm yapmak için bir düşük maliyetli bir VNA kullanılmıştır. Devre kartı üzerine 0,7 cm × 0,7 cm alanına sahip iki adet karesel dokunma butonu yerleştirilip her bir buton VNA'nin bir portuna bağlanmıştır. Butonlar yüksek frekanslarda yapılan ölçümlerde bir prob gibi kullanıldığı için bu yeni yönteme Düzlemsel Prob Yöntemi (DPY) adı verilmiştir. Cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırması amacıyla toplanan verilerden elde edilen sonuçlar bu devrenin hem ayırt edicilik hem de ortamdan etkilenmeme açısından uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Tez kapsamında geliştirilen ve yukarıda özetlenen yöntemler bu bölümün alt başlıklarında detaylıca anlatılmaktadır.

### 4.1. FTKA için Devre Tasarımı

Şekil 4.1.a'daki devre bir bant durduran filtredir. Bant durduran filtreler belirli bir frekans aralığında girişine verilen gerilimi çıkışına iletmez, bu frekans aralığının dışındaki frekanslarda ise filtre girişine verilen gerilim çıkışa iletilir. Filtre çıkışında ölçülen gerilim seviyeleri frekansa bağlı olarak çizdirildiğinde Şekil 4.1.b'deki frekans yanıtı grafiği elde edilir. Mavi ile gösterilen aralık filtrenin durdurma bandıdır. FTKA yönteminde filtre yanıtı kapasitif profil olarak da adlandırılmaktadır.



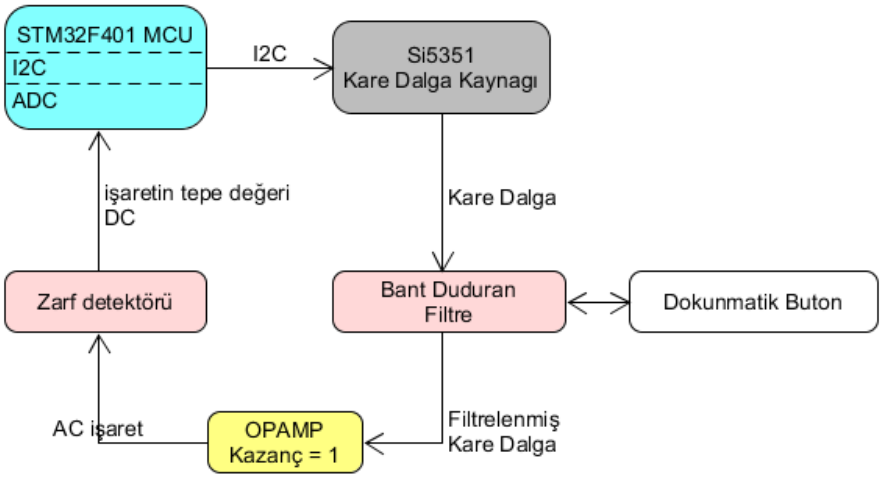

Şekil 4.1. (a) bant durduran filtre şeması (b) bant durduran filtre yanıtı

Şekil 4.1.a'daki devrede filtre durdurma bandının merkez frekansı $f_0$, bobin indüktans değeri $L_1$ ve dokunma butonuyla dokunan kullanıcının oluşturduğu kapasitans değeri $C_1$'e bağlı olup Eşitlik (4.1)'e göre hesaplanmaktadır;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \tag{4.1}$$

Devredeki $R_1$ direnci ise filtre bant genişliğini (Şekil 4.1.b'deki mavi ile gösterilen aralığın genişliğini) belirlemektedir. Butona dokunulduğunda dokunmatik butonun kapasitans değeri artmakta ve filtre merkez frekansının değeri $f_0$ azalmaktadır (filtre yanıtındaki minimum genlik frekans ekseninde sola doğru kaymaktadır).

Frekans taraması Şekil 4.1.a'daki filtre girişine farklı frekanslarda sinüs işaret uygulayıp filtre çıkışındaki işaretin tepe değeri ölçülüp kaydedilerek yapılmaktadır. Bir başlama frekansı, bir durma frekansı ve başlama frekansından durma frekansına ulaşmak için kullanılacak adım sayısı frekans taramasını tanımlanmaktadır.




Şekil 4.2. Si5351 kare dalga kaynağı içeren prototip FTKA devresinin blok diyagramı

Tez kapsamında FTKA yöntemini gerçekleştirmek için ilk etapta blok diyagramı Şekil 4.2'de gösterilen bir prototip devre tasarlanmıştır. Bu devrenin içerdiği ana bileşenler ve devre içindeki işlevleri aşağıda listelenmektedir;

- Mikrodenetleyici (STM32F401): sinyal üretici entegreyi kontrol etme, zarf dedektörü çıkışını örnekleme ve bilgisayara veri gönderme işlevlerini gerçekleştirmektedir.
- Kare dalga kaynağı (Si5351): mikrodenetleyici ile I2C protokolüyle haberleşmektedir. Mikrodenetleyiciden gelen komutlara göre kare dalga üretip üretilen kare dalga sinyalin frekansını değiştirmektedir.

- Dokunmatik buton: karesel şekle sahip iletken yüzeydir. Bant durduran filtrenin bobinine bağlı olup kondansatör işlevi görmektedir.
- Bant durduran filtre: bir direnç, bobin ve dokunmatik butondan oluşmaktadır. Filtre girişi kare dalga kaynağına bağlıdır. Filtre çıkışı birim kazançlı işlemsel yükseltece bağlıdır.
- İşlemsel yükselteç: birim kazançlıdır, devredeki görevi zarf dedektörü giriş empedansının filtre merkez frekansını etkilemesini önlemektir.
- Zarf dedektörü: filtre çıkışındaki işaretin tepe genliğini tutmaktadır. Zarf dedektörünün girişi işlemsel yükseltecin çıkışına, dedektörün çıkışı mikrodenetleyicinin Analog Sayısala Çevirici (Analog to Digital Converter ADC) girişine bağlıdır.

Şekil 4.2'deki devreyi (Sato ve diğ., 2012)'de önerilen devreden farklı yapan yönler aşağıdaki gibidir.

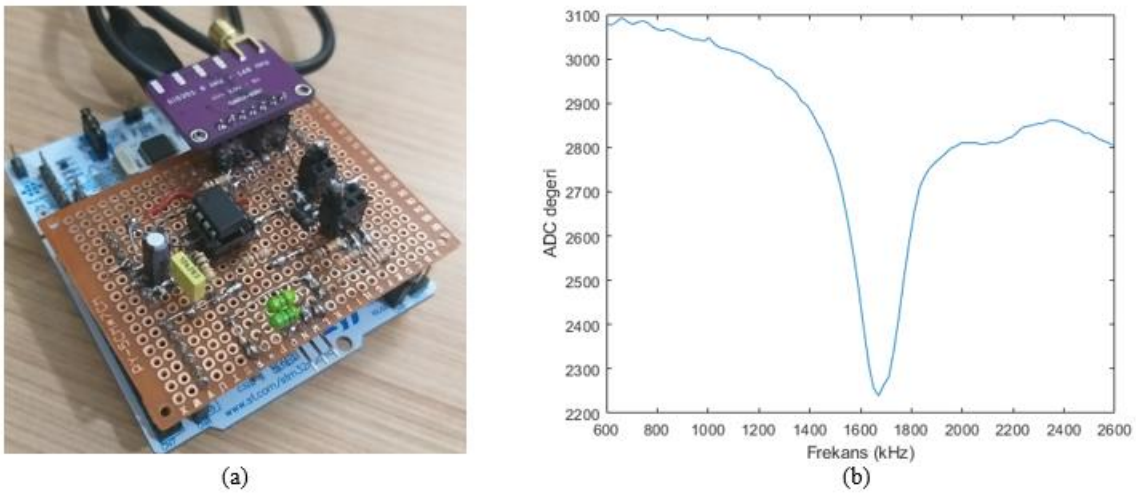
- Sinüs dalga kaynağı yerine kare dalga kaynağı kullanılması yoluyla devre maliyeti ve karmaşıklığın azaltmaktadır.
- İki adet işlemsel yükselteç yerine tek bir "tampon" işlemsel yükselteç kullanılması sayesinde simetrik besleme kaynağına gerek kalmamıştır.

Prototip devrenin çalışma döngüsü aşağıdaki gibidir:

1. Frekans taramasının başlangıç frekansı belirlenir.
2. Mikrodenetleyici kare dalga kaynağına belirlenen frekansta sinyal üretme komutu verir.
3. Kare dalga kaynağı 3,3V genliğinde sinyal üretir ve filtre girişine iletir.
4. Filtre girişine verilen sinyalin frekansına göre çıkışın genliğini belirler.
5. İşlemsel yükselteç filtre çıkışını zarf dedektörü girişine iletir. Zarf dedektörünün filtre yanıtını etkilemesini engeller.
6. Zarf dedektörü filtreden gelen sinyalin tepe değerini tutar ve dedektör çıkışına iletir. Sinyalin tepe değerini işaretin frekansı ve filtrenin yanıtı belirler.
7. Mikrodenetleyici, içerisinde bulunan ADC sayesinde zarf dedektörü çıkışını bir sayısal değere çevirir ve hafızasında tanımlı bir diziye ekler.

8. Diziye eklenen sayısal değer, hali hazırdaki frekans değeri için filtrenin frekans yanıtını temsil eder.
9. 2'nci adımdan itibaren yukarıdaki adımlar frekans taramasındaki tüm frekans adımları için tekrarlanır.
10. Frekans taraması bittikten sonra mikrodenetleyici hafızasında tutulan filtre yanıtı bilgisayara gönderilir.
11. Yeni bir frekans taraması için filtre yanıtını tutan dizideki değerler silinir ve tekrar 1'inci adıma geçilir.

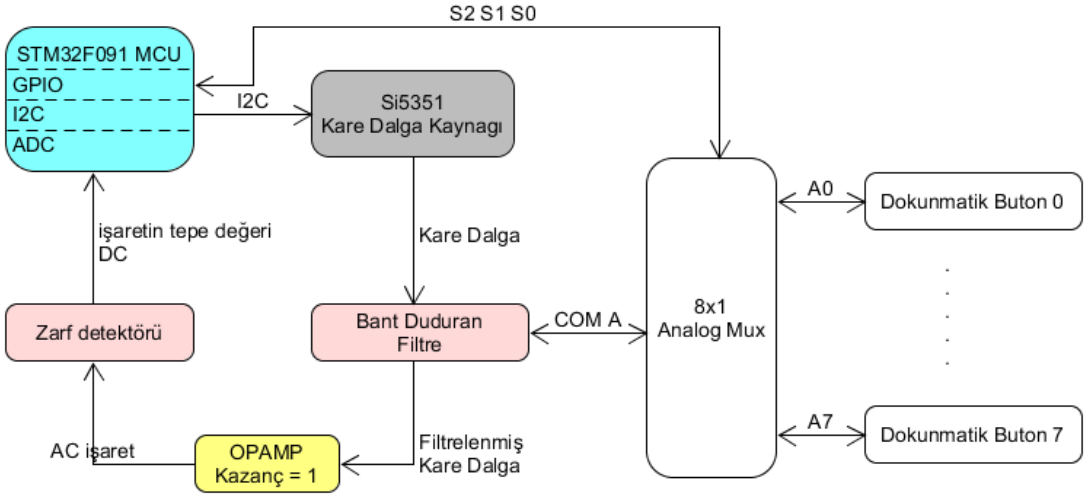
Filtre çıkışındaki işaret yüksek frekanslı işaret olduğundan bu işaretin mikrodenetleyicinin ADC birimi tarafından gerekli hızda örneklenmesi bu birim tarafından desteklenen en yüksek örnekleme frekansı nedeniyle mümkün değildir. Filtre çıkışında sinyal özelliklerinden FTKA için gerekli olan tek şey işaretin genliğidir. FTKA için çıkış işaretinin frekans ile faz gerekmediğinden filtre çıkışını örneklemeye gerek yoktur. Yani her bir frekans adımı için çıkış işareti tepe değerinin (maksimum genliğinin) tutulması yeterlidir. Zarf detektörü çıkış olarak girişindeki işaretin tepe değerine eşit bir gerilim üretmektedir ve FTKA için gerekli olan işlevi sağlamaktadır.




Şekil 4.3. FTKA temelli çalışan dokunmatik buton için (a) tasarlanan prototip devre ve (b) elde edilen filtre yanıtı

Şekil 4.3'te prototip devre ve bu devreden elde edilen filtre yanıtının (kapasitif profilin) grafiği gösterilmektedir. Bu prototip üzerinde bant durduran filtre yanıtı düzgün bir şekilde elde edildikten sonra baskı devre (Printed Circuit Board-PCB) tasarımı

gerçekleştirilmiştir. Baskı devrenin blok diyagramı Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Bu devre birden fazla farklı özellikte dokunmatik buton içerecek şekilde tasarlanmıştır. Filtre devresindeki bobine birden fazla dokunmatik buton bağlamak için, buton ile bobin arasında analog çoklayıcı entegresi (74HC4051) kullanılmıştır. Analog çoklayıcı (Mux) entegresindeki seçme pinleri sayesinde mikrodenetleyici bobine hangi butonun bağlanacağını belirlemektedir (Nexperia, 2021). Analog çoklayıcı sayesinde sekiz farklı buton tasarımını bu devre kartı ile denemek mümkünken devrede beş farklı konfigürasyonda buton tasarımı denenmiştir.



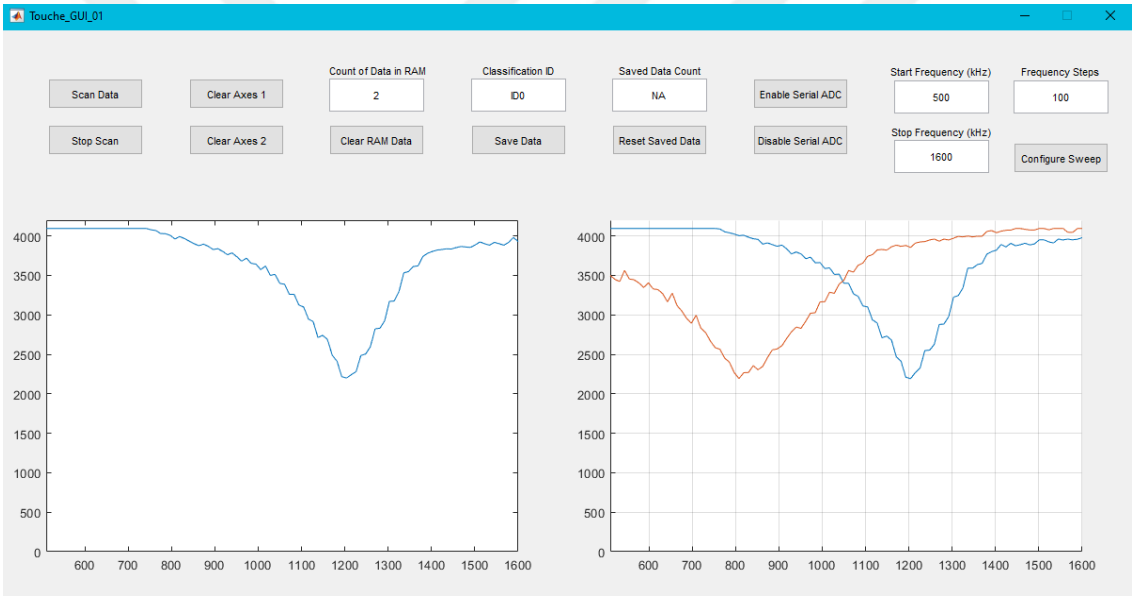

Şekil 4.4. FTKA temelli çalışan dokunmatik butonlar için üretilen baskı devrenin blok diyagramı



Şekil 4.5. FTKA temelli çalışan dokunmatik butonlar için üretilen baskı devre kartı

Kare şekle sahip dokunmatik butonların boyutları farklı olup butonlardan ikisinin butonun üzeri yalıtkanla kaplanmış, üç buton ise hiçbir açık iletken halde bırakılmıştır. Şekil 4.5'te üretimden gelen baskı devre gösterilmektedir.

FTKA devresiyle toplanan verilerin bilgisayar ortamında görselleştirilmesi, kaydedilmesi, işaret işleme ve sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirilmesi için bir grafiksel kullanıcı arayüzü (Graphical User Interface GUI) tasarımına gerek duyulmuştur. GUI tasarım için MATLAB GUIDE kullanıldı. Devre kartı ile toplanan veriler devredeki mikrodenetleyicinin UART arayüzü ile bilgisayara gönderilmektedir. Bilgisayar tarafında ise TTL/USB dönüştürücü kullanılarak mikrodenetleyiciden gönderilen veriler arayüz programına aktarılmaktadır.




Şekil 4.6. FTKA devresiyle veri toplama için tasarlanan kullanıcı arayüzü.

Devreyi kontrol eden mikrodenetleyicinin gömülü yazılımını değiştirmeden bilgisayar aracılığı ile frekans taramasına ilişkin parametreleri ayarlayabilmek için AT komut setine benzer bir komut seti hazırlanmıştır. Bu komut seti ASCII karakterler ile çalışacak şekilde hazırlanmış olup aşağıdaki ayarlamaların yapılmasını sağlamaktadır:

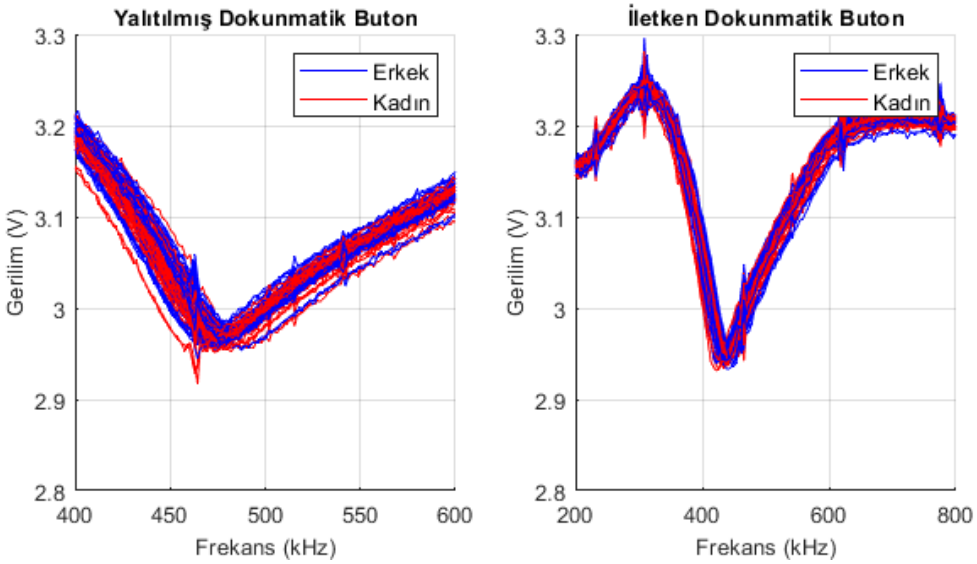
- Frekans taramasının başlangıç frekansını belirleme.
- Frekans taramasının bitiş frekansını belirleme.
- Frekans taramasının adım sayısını belirleme.

Bilgisayar tarafında bu parametreler belirlenip oluşturulan komut seti ile mikrodenetleyiciye iletildikten sonra mikrodenetleyici frekans taraması yapıp kapasitif profilleri belleğine kaydetmektedir. Kapasitif profillerin bilgisayara hızlı bir şekilde gönderilmesi için veri transferinde ASCII karakterler yerine 16-bitlik ikili (binary) sayılar kullanılmıştır. FTKA için tasarlanan arayüz Şekil 4.6'da gösterilmektedir, arayüzün sağladığı diğer işlevler:

- Seri port açma/kapama.
- Frekans taramasını başlatma komutu verme.
- Mikrodenetleyiciden veri akışını başlatma/sonlandırma
- Bilgisayara aktarılan verileri görselleştirme/karşılaştırma.
- Sınıflandırıcı eğitiminde kullanma amacıyla gelen verilere sınıf etiketi atama.
- Gelen verileri etiket bilgisiyle kaydetme/silme.

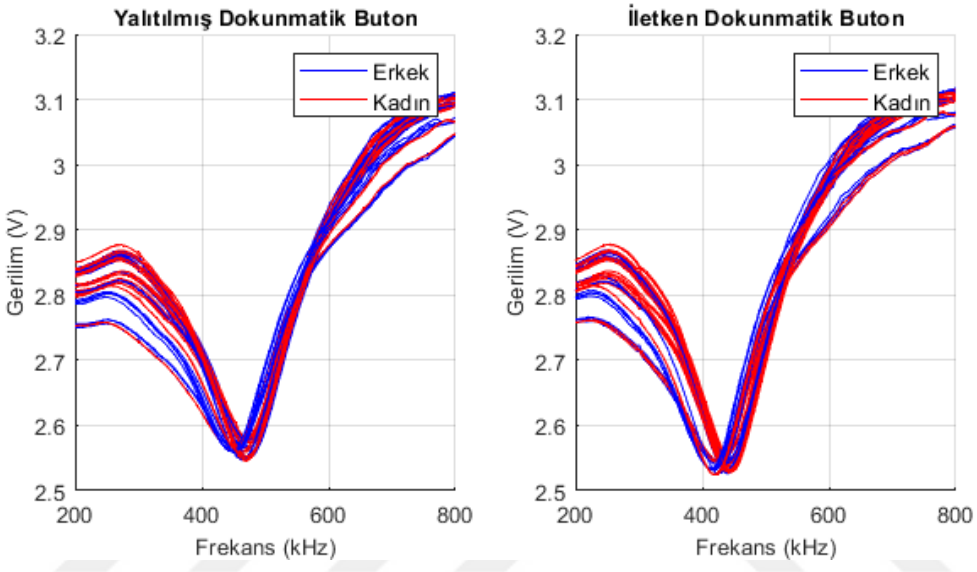
### 4.2. FTKA için Üretilen Devre Kartıyla Veri Toplama

Şekil 4.5'teki baskı devre kartında 5 adet buton bulunmaktadır. Butonların arasında, birisi yalıtılmış diğeri iletken olan 0,5 cm x 0,5 cm alan sahip yan yana yerleştirilmiş iki buton bulunmaktadır.

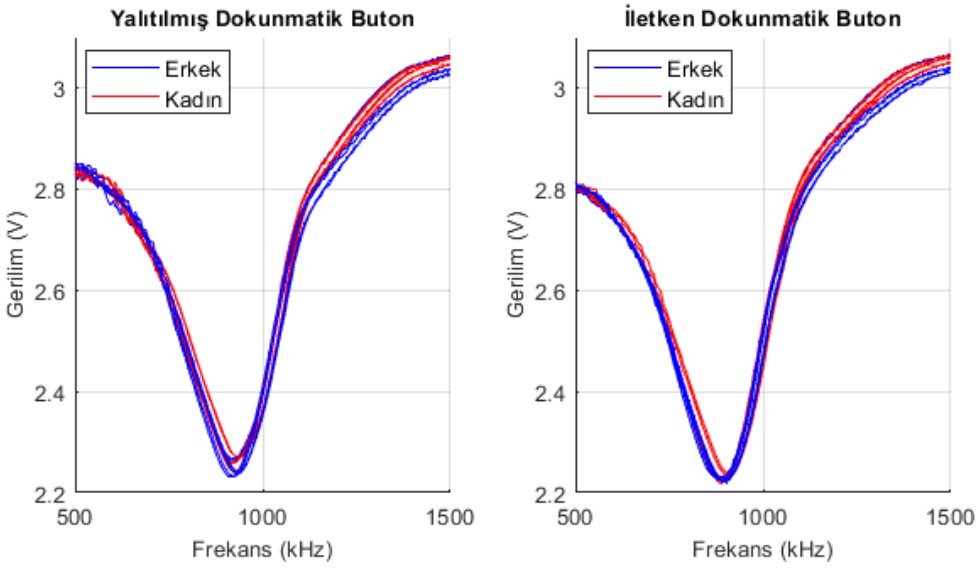



Şekil 4.7. 1'inci veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları

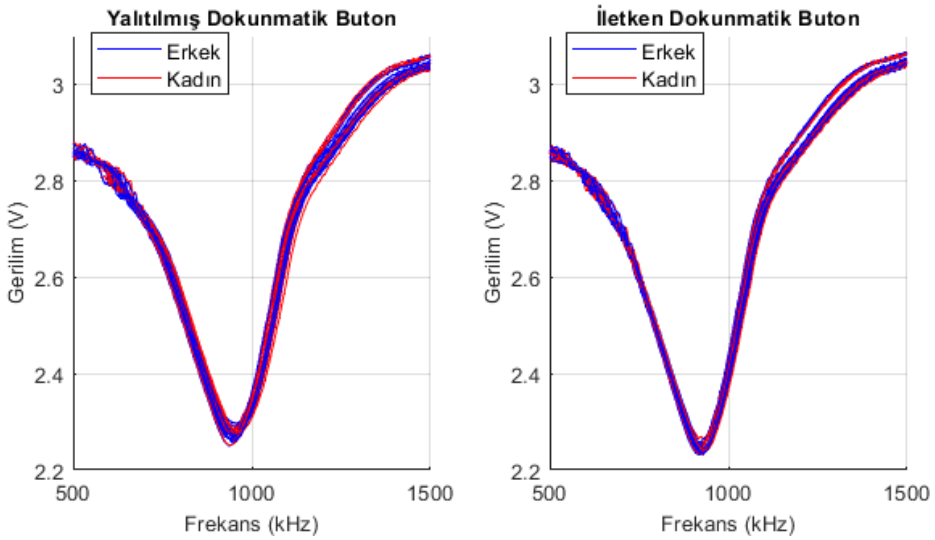
Veri toplama sürecinin ilk etabında bu butonların ikisi de kullanıldı. Cinsiyet sınıflandırması amacıyla farklı: zaman, ortam ve katılımcı sayılarıyla veri toplandı. Her bir veri toplamada kullanılan FTKA devresiyle ilgili bilgiler sırayla Tablo 4.1'de listelenmektedir. Tablo 4.1'de FTKA devresindeki bant durduran filtrenin direnci R1 ile, bobini L1 ile ifade edilmektedir. Elde edilen FTKA filtre yanıtları sırayla Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmektedir.




Şekil 4.8. 2'nci veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları




Şekil 4.9. 3'üncü veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları




Şekil 4.10. 4'üncü veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları

Tablo 4.1. FTKA yöntemiyle yapılan veri toplamalardaki devre durumu

| | | 1'inci veri toplama | 2'nci veri toplama | 3'üncü veri toplama | 4'üncü veri toplama | 5'inci veri toplama |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bant Durduran Filtre** | **Direnci (R1)** | 1kΩ | 1kΩ | 1kΩ | 1kΩ | 1kΩ |
| | **Bobini (L1)** | 1mH | 1mH | 1mH \|\| 470µH | 1mH \|\| 470µH | 470µH |
| **Devre Beslemesi (USB kablo ile)** | | Bilgisayardan | Bilgisayardan | Power Bank'ten | Power Bank'ten | Power Bank'ten |
| **Yalıtılmış Buton** | **Başlama frekansı** | 400 kHz | 200 kHz | 500 kHz | 500 kHz | Yok |
| | **Durma frekansı** | 600 kHz | 800 kHz | 1500 kHz | 1500 kHz | Yok |
| | **Adım sayısı** | 150 adım | 150 adım | 150 adım | 150 adım | Yok |
| | **Adım başı frekans artması** | 1,33 kHz | 4 kHz | 6,67 kHz | 6,67 kHz | Yok |
| **İletken Buton** | **Başlama frekansı** | 200 kHz | 200 kHz | 500 kHz | 500 kHz | 1250 kHz |
| | **Durma frekansı** | 800 kHz | 800 kHz | 1500 kHz | 1500 kHz | 2250 kHz |
| | **Adım sayısı** | 150 adım | 150 adım | 150 adım | 150 adım | 150 adım |
| | **Adım başı frekans artması** | 4 kHz | 4 kHz | 6,67 kHz | 6,67 kHz | 6,67 kHz |
| **Toplam Tarama süresi** | | ~200 ms | ~200 ms | ~200 ms | ~200 ms | ~200 ms |
| **Veri aktarma yöntemi** | | UART TTL dönüştürücü | UART TTL dönüştürücü | Bluetooth modül | Bluetooth modül | Bluetooth modül |
| **Erkek sayısı** | | 21 | 12 | 3 | 7 | 11 |
| **Kadın sayısı** | | 14 | 11 | 3 | 7 | 11 |

Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te FTKA devresiyle veri toplama sonuçları özetlenmektedir. İlk üç veri toplamada iletken buton verileri yalıtkan butona göre cinsiyet sınıfları arası daha fazla kapasitans farkı verdiği için daha iyi ayırt edicilik sağlamaktadır. 4'üncü veri toplamada iletken buton verilerinin ayırt ediciliği yoktur. Yapılan veri toplamaların tümünde iletken buton verileri tutarlıdır: erkek sınıfının ortalama kapasitansı daima kadın sınıfı ortalama kapasitansından daha büyük veya eşittir ama yalıtkan buton verileri tutarlı değildir. Yalıtkan butonla ile yapılan 1'inci veri toplamada kadın sınıfı ortalama kapasitansı erkek sınıfı kapasitansından büyüktür sonraki üç veri toplamadaysa durum tam tersidir. İletken buton tutarlı verileri sağladığı için 5'inci veri toplamada sadece iletken buton kullanılmıştır.

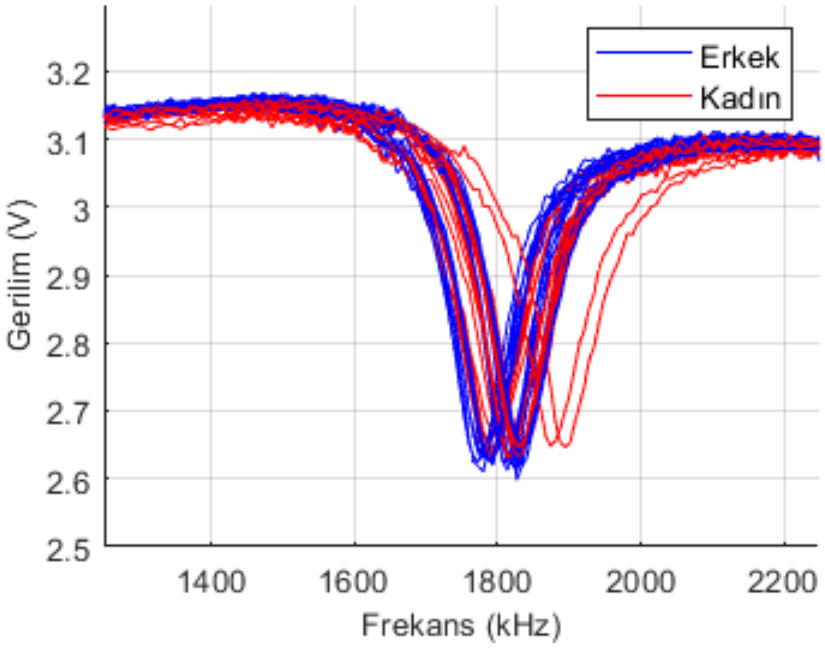
Tablo 4.2. Yalıtkan dokunmatik butonla yapılan veri toplama sonucu (cinsiyet)

| | **1'inci veri toplama** | **2'nci veri toplama** | **3'üncü veri toplama** | **4'üncü veri toplama** | **5'inci veri toplama** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Erkek sınıfı ortalama merkez frekansı [kHz]** | 476,51 | 463,42 | 923,93 | 946,08 | - |
| **Kadın sınıfı ortalama merkez frekansı [kHz]** | 475,59 | 467,78 | 926,17 | 948,76 | - |
| **Minimum Genlik (Erkek) [V]** | 2,96 | 2,56 | 2,24 | 2,27 | - |
| **Minimum Genlik (Kadın) [V]** | 2,95 | 2,56 | 2,25 | 2,27 | - |
| **Erkek sınıfı ortalama kapasitansı [pF]** | 111,55 | 117,94 | 92,80 | 88,51 | - |
| **Kadın sınıfı ortalama kapasitansı [pF]** | 111,98 | 115,75 | 92,35 | 88,01 | - |

Tablo 4.3. İletken dokunmatik butonla yapılan veri toplama sonucu (cinsiyet)

| | **1'inci veri toplama** | **2'nci veri toplama** | **3'üncü veri toplama** | **4'üncü veri toplama** | **5'inci veri toplama** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Erkek sınıfı ortalama merkez frekansı [kHz]** | 434,32 | 432,04 | 891,49 | 924,16 | 1810,7 |
| **Kadın sınıfı ortalama merkez frekansı [kHz]** | 435,85 | 438,31 | 895,97 | 924,16 | 1822,6 |
| **Minimum Genlik (Erkek) [V]** | 2,94 | 2,53 | 2,22 | 2,24 | 2,62 |
| **Minimum Genlik (Kadın) [V]** | 2,94 | 2,53 | 2,22 | 2,24 | 2,64 |
| **Erkek sınıfı ortalama kapasitansı [pF]** | 134,28 | 135,69 | 99,68 | 92,76 | 16,44 |
| **Kadın sınıfı ortalama kapasitansı [pF]** | 133,33 | 131,84 | 98,68 | 92,76 | 16,22 |

3’üncü veri toplamada elde edilen verilerde diğerlerinden farklı olarak 1300 kHz ile 1500 kHz arasında kadın sınıfı verilerinin genliği erkek sınıfı verilerinden büyüktür (ilk önce kadınlardan sonra erkeklerden veri alındı). Bu durum diğer veri toplamalarda elde edilen sonuçlar ile çeliştiği için sebebi araştırılmış ve devrede kullanılan analog çoklayıcı (74HC4051) entegresinden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. 74HC4051 entegresi filtre yanıtı genliğinde rasgele bir kaymaya neden olmaktadır. Bu sebeple 5’inci veri toplamada, analog çoklayıcı entegresi devreden sökülüp yerine 0,5 cm × 0,5 cm alana sahip iletken buton kısa bir bakır tel ile filtre devresine direkt bağlandı.




Şekil 4.11. 5’inci veri toplama sonucunda elde edilen filtre yanıtları

Şekil 4.11’de gösterilen 5’inci veri toplamada 11 erkek ve 11 kız katılımıyla elde edilen sonuçlar:

- Erkek sınıfı ortalama: filtre merkez frekansı 1810,7 kHz, minimum genlik 2,62 V ve kapasitans 16,44 pF değerindedir.
- Kadın sınıfı ortalama: filtre merkez frekansı 1822,6 kHz, minimum genlik 2,64 V ve kapasitans 16,22 pF değerindedir.
- Önceki veri toplamalara göre her iki cinsiyet sınıfı için ölçülen kapasitans değeri oldukça azalmıştır. Bu fark analog çoklayıcı devresinden kaynaklıdır.
- Önceki veri toplamalara göre cinsiyet sınıfları arasındaki kapasitans farkı azalmıştır.

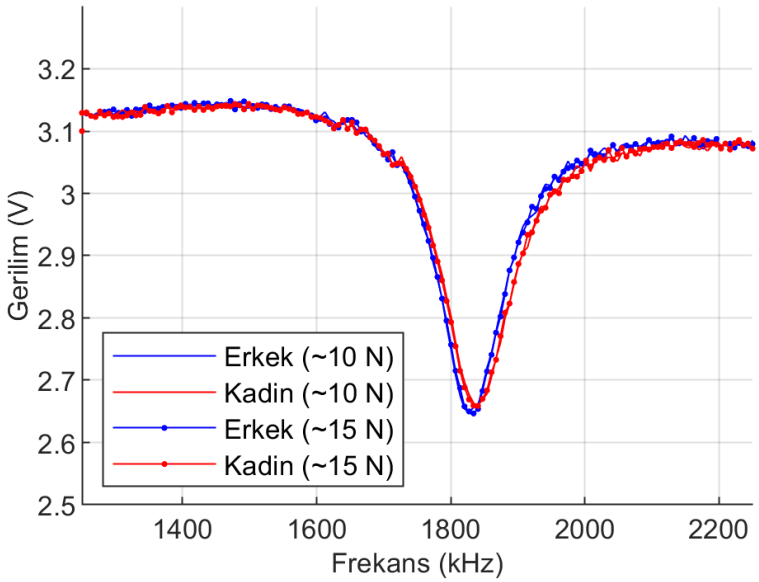
- Daha düşük indüktans değerine sahip bir bobin kullanıldığı için iki sınıf arası filtre merkez frekans farkı artmış, bu da devrenin ayırt ediciliğini arttırmıştır.

### 4.3. Frekans Taramalı Kapasitif Algılamayı Etkileyen Faktörler

Farklı ortamlarda ve farklı katılımcılardan toplanan verilerde kadın ile erkek sınıflarının ortalama kapasitans değerlerindeki tutarsızlık sebebiyle sistemin beklenen şekilde çalışmadığı anlaşılmıştır. Tutarsızlığa neden olan etkenleri tespit etmek, ortam ve davranış şeklinin filtre yanıtını nasıl etkilediğini anlamak amacıyla yeni veriler toplanmıştır. Bu çerçevede Tablo 4.1'de belirtilen 5'inci devre konfigürasyonu kullanılarak veriler toplanmıştır. Veri toplamaya 3 erkek ile 3 kadın dahil edilip ve aşağıdaki senaryoların filtre yanıtına etkisi irdelenmiştir:

- Dokunma kuvveti farklılığı
- Aynı ortamda farklı zamanlarda alınan veriler
- Farklı ortamlarda alınan veriler
- Dokunan kişi davranışlarının etkisi.

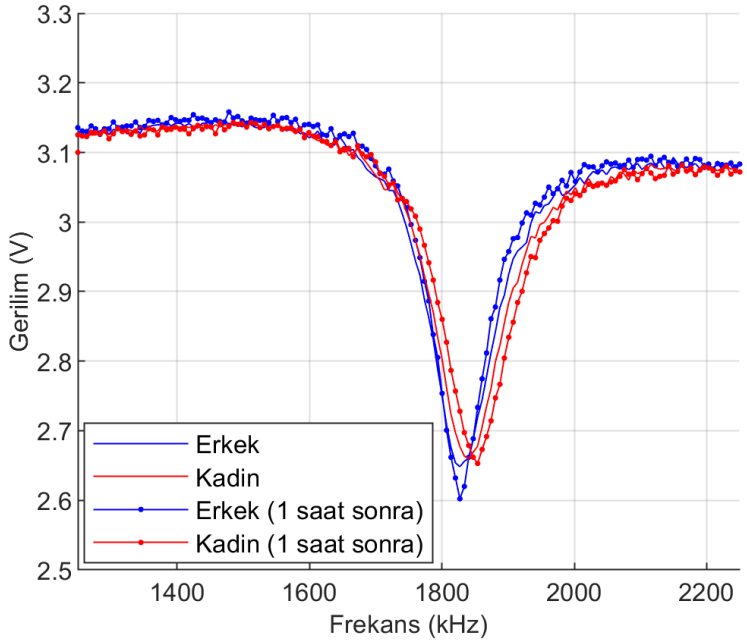
Dokunma Şiddetinin Etkisi: Bu deneyde katılımcılardan iki kez veri toplanmıştır. Katılımcıların ilk dokunmada butona rahat bir şekilde basmaları (yaklaşık 10 N kuvvet uygulayarak) ile ikinci dokunmada butona sert basmaları (yaklaşık 15 N kuvvet uygulayarak) istenmiştir.




Şekil 4.12. FTKA devresinde dokunma şiddetinin kapasitif profile etkisi

Şekil 4.12'de bir erkek ve bir kadın katılımcının rahat dokunma verisi düz çizgi ve sert dokunma verisi noktalı çizgiyle gösterilmektedir. Tek iletken buton ile veri toplama yapıldığında aynı kişiden aynı ortamda alınan verilerin dokunma şiddetinden etkilenmediği görülmüştür.

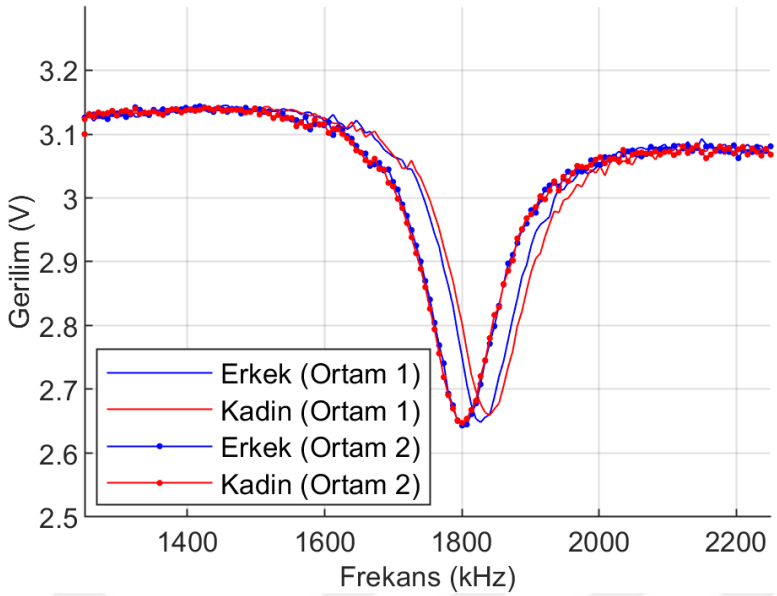
Veri Toplama Zamanın Etkisi: Bu deneyde katılımcılardan iki farklı zamanda (1 saatlik zaman farkı) veri toplanmış olup dokunma sırasında butona rahat bir şekilde basmaları istenmiştir. Şekil 4.13'te bir erkek ve bir kadın katılımcının aynı ortamda yaptıkları ilk dokunma verisi düz çizgi ve ikinci dokunma verisi noktalı çizgiyle gösterilmektedir.




Şekil 4.13. Farklı zamanlarda dokunmanın kapasitif profile etkisi

Bu grafiklerden de görüldüğü üzere aynı kişilerden farklı zamanlarda alınan verilerde farklılık olduğu açıktır. Bunun nedeni araştırıldığında bu durumun devreye besleme sağlayan USB kabloyla katılımcıların arasındaki mesafe değişikliğinden (10 cm gibi az bir mesafe farkı olsa da) kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.

Farklı Ortamların Etkisi: Bu deneyde katılımcılardan iki farklı ortamda veri alınmış, dokunmada dokunma sırasında butona rahat bir şekilde basmaları istenmiştir. Şekil 4.14'te bir erkek ve bir kadın katılımcıdan ilk ortamda alınan dokunma verisi düz çizgi ve ikinci ortamda alınan dokunma verisi noktalı çizgiyle gösterilmektedir.




Şekil 4.14. Farklı ortamlarda dokunmanın kapasitif profile etkisi

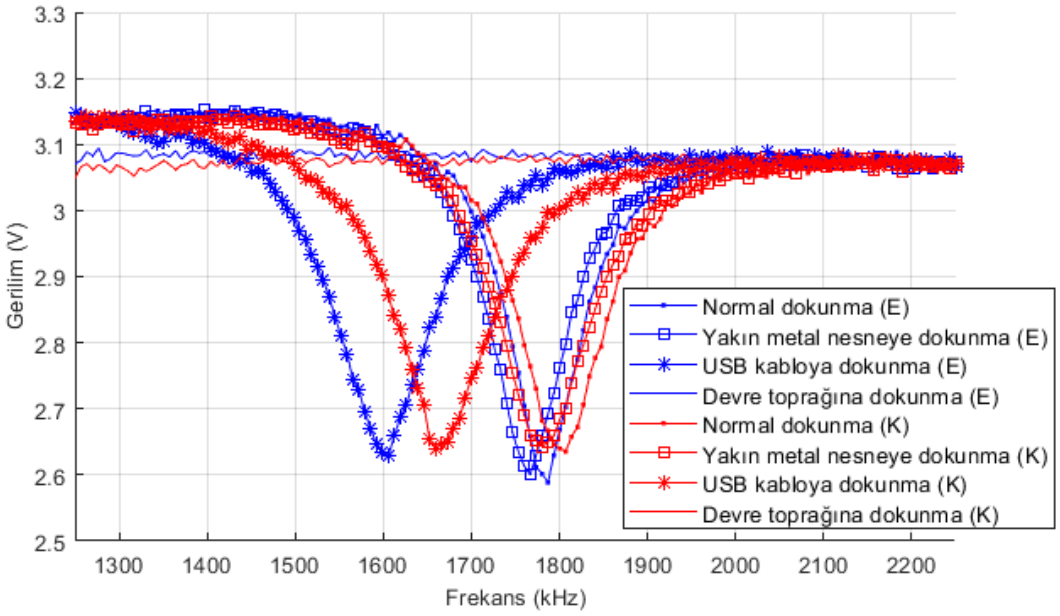
İlk ortamda erkek verisine ait filtre merkez frekansı kadın verisinin merkez frekansından daha düşük bir değerde olup aynı durum ikinci ortamda da geçerlidir. İkinci ortamdaki kadın verisinin merkez frekansı ilk ortamdaki erkek merkez frekansından daha düşüktür. Böyle bir tutarsızlık ilk ortam için eğitilecek bir sınıflandırıcının farklı bir ortamda yanlış karar vermesine neden olacaktır. Aynı kişilerden farklı ortamlarda alınan verilerdeki farklılığın nedeni araştırıldığında, bunun nedeninin farklı zamanlarda dokunma durumunda olduğu gibi devreye besleme sağlayan USB kabloyla katılımcıların arasındaki mesafe değişikliğinden kaynaklı olduğu kanaatine varılmıştır.

Dokunma Davranışlarının Etkisi: Bu deney kapsamında katılımcılardan aynı ortamda veri alınırken, sol baş parmakla dokunmatik butona normal şekilde (rahat) dokunmaları ve sağ elleriyle sırayla aşağıdaki davranışları yapmaları istenmiştir.

1. Hiçbir yere dokunmama (Şekil 4.15'te noktalı çizgi).
2. Yakındaki bir metal nesneye dokunma (Şekil 4.15'te kareli çizgi).
3. Devreye besleme veren USB kabloya dokunma (Şekil 4.15'te yıldızlı çizgi).
4. Devrenin toprağına dokunma (Şekil 4.15'te düz çizgi).

Kullanıcı bir eliyle butona dokunurken diğer eliyle sergilediği davranış türü kapasitif profili oldukça etkilemektedir. Bu durumda yapılan gözlemler aşağıdaki gibidir.

- Sağ el ile hiçbir yere dokunamama ve yakın bir metal nesneye dokunma durumlarında erkek verisinin filtre merkez frekansı kadın merkez frekansına göre daha düşük değerdedir.
- Devre toprağına dokunulduğunda bant durduran filtre yanıtı bozulmakta ve erkek ile kadın verileri ayırt edilememektedir.
- USB kabloya dokunma durumundaysa sağ elin kabloyu kavradığı alan arttıkça kapasitans artmaktadır. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi kadın sınıfı filtre merkez frekansı erkek sınıfı merkez frekansından daha düşük değerdedir ve FTKA devresiyle cinsiyet tespitini tutarsız hale getirmektedir.




Şekil 4.15. Farklı dokunma davranışlarının kapasitif profile etkisi

FTKA devresini tutarsız yapan etkenleri tespit amacıyla yapılan denemelerin sonucu olarak:

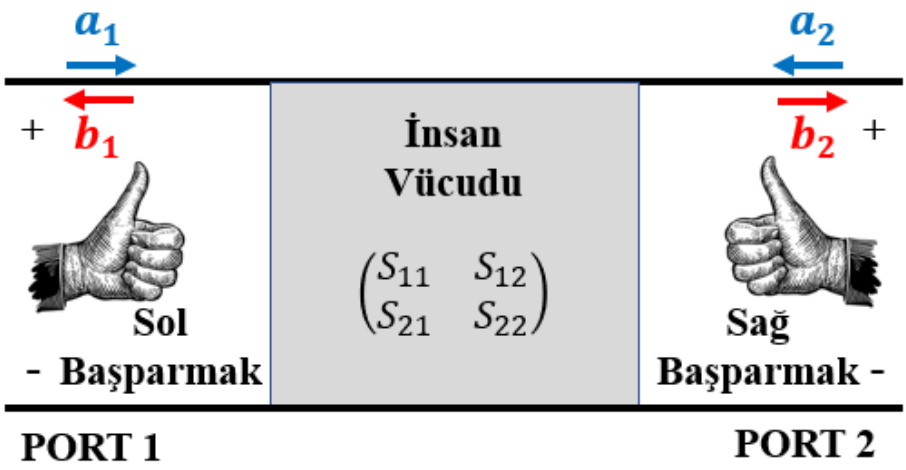
1. Cinsiyet sınıflandırma açısından kapasitif profilin farklı ortamların her biri için kendi içinde tutarlı olduğunu anlaşılmıştır.
2. Farklı davranış şekilleri için aynı durumun geçerli olmadığı anlaşılmıştır (bazı davranış şekilleri sistemi tutarsız yapmaktadır).
3. FTKA devresinin düzgün ve tutarlı sonuç vermesi için irdelenen etkenlerin değişmediği katı bir veri toplama ortamında çalışması gerekmektedir.

Kullanıcı belirleme/ayırt etme amacıyla (Harrison ve diğ., 2012)'de yapılan çalışmada da benzer dezavantajlar ve kısıtlamalar anlatılmaktadır. Bu yöntem ortam değişikliği veya kapasitif sensörü içeren aleti kullanma şekli değiştiğinde kapasitif profildeki değişimler ile kullanıcıları tanımda işe yaramamaktadır. Ancak bu yaklaşımın kullanıcıları aynı koşullar altında ayırt etmek için kullanılması mümkündür. Kullanıcı tanımadaki başarısızlık nedenlerinin cinsiyet veya yaş grubu belirlemede de geçerli olduğu tez kapsamında yapılan denemeler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu sebeple, (Harrison ve diğ., 2012)'de belirlenen kısıtlamalar bu tez kapsamında FTKA yöntemiyle elde edilen sonuçların geçerliliğine destekleyici niteliktedir.

### 4.4. Dokunma Algılama için Yeni Yaklaşım: Düzlemsel Prob Yöntemi

FTKA temelli yöntem ile yapılan çalışmaların başarısızlık nedenleri bir önceki alt bölümde irdelenmişti. İrdeleme sonucunda, öz kapasitans ölçümünün tek başına yeterli olmadığı ve yeni bir yöntem geliştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. FTKA devresinde karşılaşılan problemlerin tekrarlanmaması için geliştirilecek yeni yöntemin sağlaması gereken özellikler aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Dokunma kuvvetinden etkilenmeme
- Davranış şeklinden etkilenmeme
- Ortam değişikliğinden etkilenmeme
- Sadece dokunan parmağa yakın bölgelerdeki biyolojik dokuların elektriksel karakteristiğinden etkilenme.




Şekil 4.16. İnsan vücudunun N kapılı devre modelinde ölçüm için kullanılan iki kapı.

Bu amaçla yeni bir yöntem geliştirilmesi, insan vücudu için yeni bir modelleme yapma ve elektriksel ölçümleri kolaylaştıracak devre tasarımını gerektirmiştir.

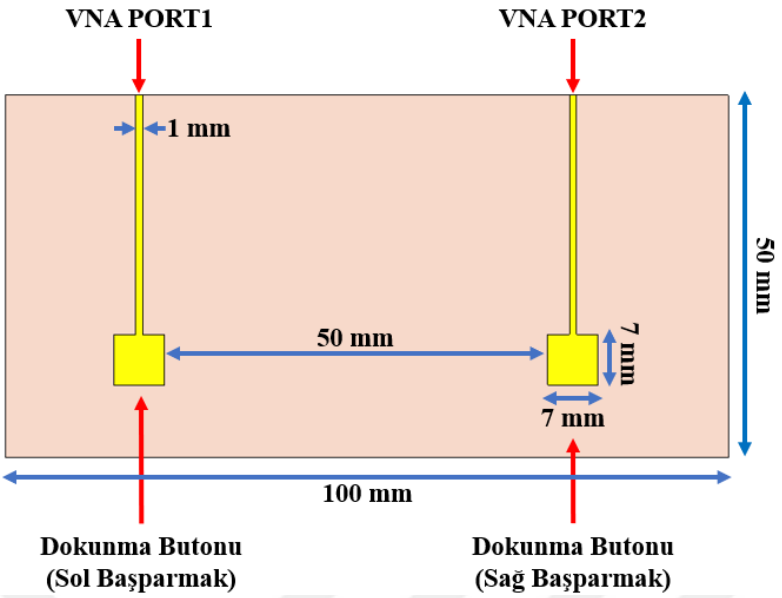
FTKA yöntemi rezonans temelli olup içinde temel olarak bant durduran filtre özelliği veren bir rezonatör devresi bulunmaktadır. Kullanıcı butona dokunduğunda filtredeki LC rezonatörün kapasitansını etkilemekte ve kapasitans değişiminin tespit edilmesiyle dokunma eylemi algılanmaktadır.

Bu tez kapsamında insan vücudunu bir devreye eklenen basit bir kondansatör gibi modellemesi yerine Şekil 4.16'da gösterildiği gibi ölçüm için sadece iki kapısı kullanılan N kapılı bir devre olarak modellenmesi yaklaşımı önerilmektedir. Bu modele göre insan vücudunun elektriksel davranışı S-parametre ölçümleriyle karakterize edilmektedir. Bu yaklaşımla insan vücudunun elektriksel eşdeğer devresini oluşturan devre elemanlarıyla ilgili hiçbir varsayım yapılması da gerekmemektedir.

Şekil 4.16'daki iki kapılı ölçüm modelinin giriş kapısı (PORT 1) kullanıcının sol başparmağı ve çıkış kapısı sağ başparmak olarak belirlendi. Giriş ve çıkış kapısını belirlemek için kolun başka bölgeleri de kullanılabilirdi ama tüketici elektroniği kullanıcıları genellikle sağ ve sol ellerini kullandıkları için bu şekilde seçim yapıldı. Şekil 4.16'da $a_j$, VNA portu $j$'den kullanıcının parmağına giden dalga ve $b_i$ ise kullanıcının parmağından VNA portu $i$'ye giden dalgayı göstermektedir.

VNA cihazları S-parametre ölçümlerinde, frekansı belirli bir aralıkta adım adım değiştirip ölçüm yapmaktadır. VNA cihazları oldukça pahalı ve büyük hacimli olduklarından tüketici elektroniğinde kullanılmamaktadır. Ama günümüzde Uzakdoğu menşeli NanoVNA v2 isimli vektör ağ analizörü ucuzluğu ve elle taşınabilir küçüklükte olması nedeniyle amatör telsizciler tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. NanoVNA v2 ile yapılan ölçümlerin dinamik aralığı antenler ve filtreler için kabul edilebilir seviyede olduğundan bu tez çalışmasında kullanılması uygun bulunmuştur (Hunt ve diğ., 2023).

VNA ile insan vücudu koaksiyel kabloyla direkt bağlanamayacağı için aradaki elektriksel bağlantıyı sağlayacak bir prob tasarımı gerekmektedir. Bu kapsamda boyutları Şekil 4.17'de gösterilen düzlemsel prob çifti geliştirilmiştir.




Şekil 4.17. Düzlemsel prob çiftinin boyutları

Geliştirilen yeni devre kartı ve içerdiği bileşenlerin işlevi ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

- Devre kartında iki adet SMA konnektör bulunmaktadır.
- VNA PORT1'e bağlanan SMA konnektör ile alınan sinyaller, kart üzerine yerleştirilen 1 mm genişliğinde iletken (bakır) yol ile 7 mm × 7 mm alana sahip karesel bir yamaya iletilmektedir.
- Kart üzerindeki diğer iletken yol ve karesel yama aynı boyutlarda olup ikinci SMA konnektör ile VNA PORT2'ye bağlanmaktadır.
- Kart üzerindeki iletken yol ile yama bir düzlemsel prob oluşturmaktadır.
- Düzlemsel problardaki kare şeklindeki yamalar dokunmatik butonları oluşturmaktadır.
- Devre kartı 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 malzemeden üretilmiştir ve kartın alt kısmı tamamen bakır ile kaplıdır (toprak düzlemi).

Yama boyutlarının başparmak ucuna göre çok küçük veya büyük yapılması, parmak ucunun farklı bölgeleriyle yamanın farklı bölgelerinin kesişimine neden olmaktadır. Parmak ucuyla yamanın kesişim bölgesine göre ölçümler değişeceğinden yama alanı parmak ucunun alanına göre orta değerde tutuldu (ne büyük ne de küçük) (STMicroelectronics, 2023).

Düzlemsel problar, geliştirilen yöntemin özgün kısmını oluşturduğu için bu yöntem Düzlemsel Prob Yöntemi (DPY) olarak adlandırılmıştır. DPY'nin çalışmasıyla ilgili bazı bilgiler aşağıda listelenmiştir:

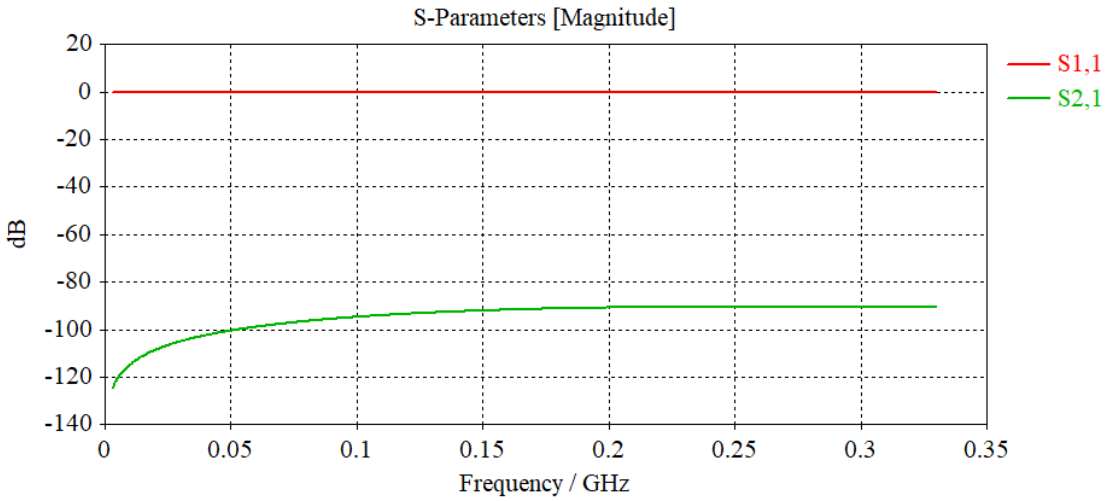
- VNA, PORT1'den frekansı adım adım değişen sinyaller göndermektedir.
- VNA, düzlemsel problardan PORT1'e geri yansıyan ve PORT2'ye iletilen sinyallerin genlik ve fazını ölçmektedir.
- Düzlemsel problar, kullanıcının sol başparmağıyla PORT1'e bağlanacak SMA konnektör, sağ başparmağıyla PORT2'ye bağlanacak SMA konnektör arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır.
- SMA konnektörler RG316 koaksiyel kablolarla VNA cihazının portlarına bağlanmaktadır.
- VNA, iki frekans bandında ölçüm yapmakta ve her bir frekans bandı için 101 frekans adımı kullanmaktadır.
- Taranan birinci frekans bandı Yüksek Frekans bandıdır (High Frequency HF Band "3-33" MHz).
- Taranan ikinci frekans bandı Çok Yüksek Frekans bandı (Very High Frequency VHF band "30-330" MHz).

Frekans bantları seçilirken VNA tarafından üretilen sinyallerin serbest uzaya ışıma yapmadan Şekil 4.17'deki probların karesel yamalarına iletilmesi dikkate alınmıştır. Düzlemsel probların HF ve VHF frekans bantlarında bir prob gibi çalıştığını garanti altına almak için CST MWS programıyla aşağıdaki simülasyonlar yapıldı:

- PORT1'den verilen sinyalin PORT2'ye iletim ve PORT1'e doğru geri yansıma oranını belirlemek için S-parametre simülasyonu (Şekil 4.18).
- PORT1'den verilen sinyalin düzlemsel probun karesel bölgesine kadar ulaştığını göstermek amacıyla elektrik alan simülasyonu (Şekil 4.19).
- Düzlemsel probun karesel yamalarının bir mikroşerit anten gibi çalışmadığını garanti altına almak için uzak alan simülasyonu (Şekil 4.20).

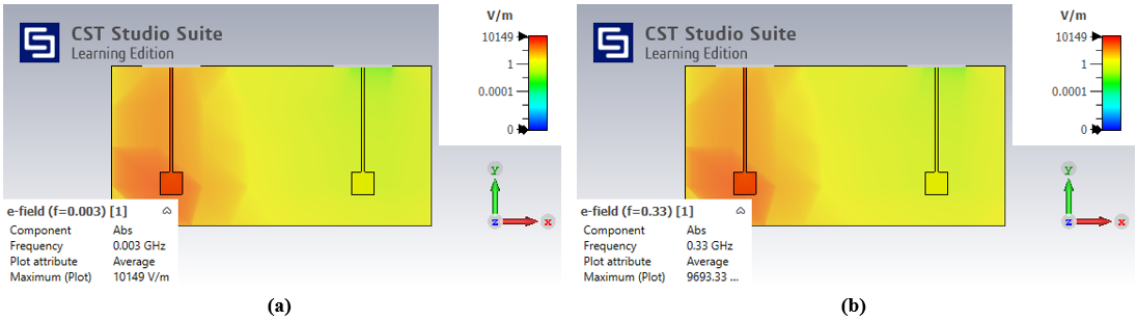
Şekil 4.18'deki S-parametre simülasyonu HF ve VHF bantlarının tümünde VNA PORT1'den verilen sinyalin PORT2'ye iletilmeyip ($|S_{21}| \leq -85$ dB) PORT1'e doğru geri yansıdığını ($|S_{11}| \simeq 0$ dB) göstermektedir. Böylece düzlemsel prob çiftindeki

karesel yamalara dokunma olduğunda PORT1'e doğru geri yansıma seviyesindeki azalma ve PORT2'ye doğru iletim seviyesinde artış tamamen kullanıcı vücudunun elektriksel karakteristiğine bağlı olacaktır.




Şekil 4.18. Düzlemsel prob çiftinin S-parametre simülasyon sonucu

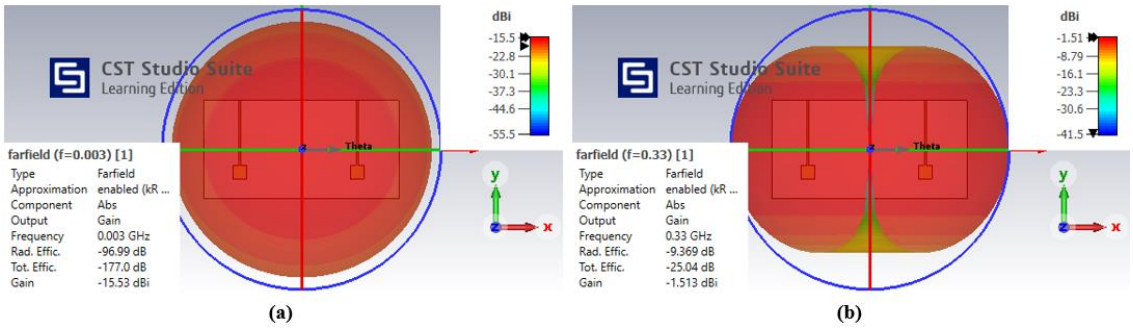
Şekil 4.19'daki elektrik alan simülasyonu PORT1'den gönderilen sinyalin 1 mm kalınlığındaki iletken hat boyunca karesel yama kadar düzgün bir şekilde iletildiğini göstermektedir. 330 MHz frekansında ortalama elektrik alan şiddeti 3 MHz frekansındaki alan şiddetine göre bir miktar azalmıştır. PORT1'den PORT2'ye herhangi bir iletim olmadığı için PORT2'ye bağlı olan karesel yamada elektrik alan şiddeti oldukça düşüktür.




Şekil 4.19. Düzlemsel prob çiftinin elektrik alan simülasyonu: (a) 3MHz ve (b) 330MHz

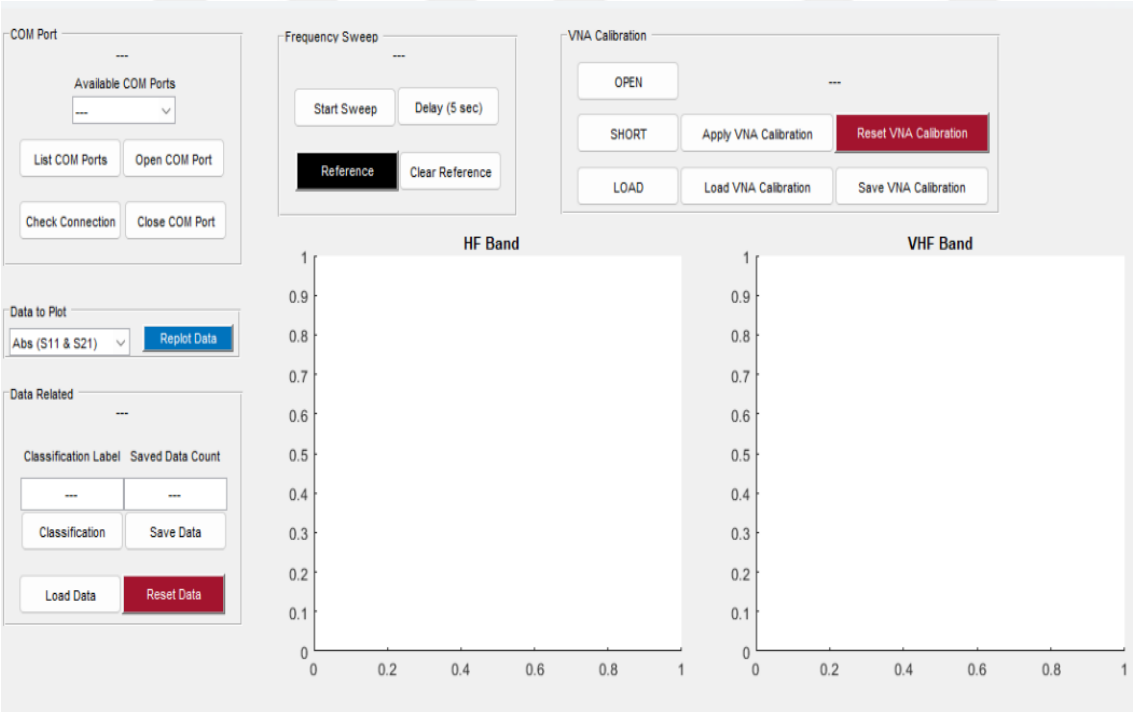
Şekil 4.20'de gösterilen uzak alan simülasyonundan, 3 MHz ve 330 MHz frekanslarında düzlemsel prob maksimum kazancının sırayla -15 dBi ve -1,5 dBi değerinde olduğunu anlaşılmaktadır. Bu değerlerin 0dBi'dan küçük olması düzlemsel prob çiftinin anten gibi

çalışmadığını göstermektedir. 330 MHz'deki kazanç değerinin 3 MHz'ye göre yüksek olması bir miktar ışıma olduğunu göstermekte olup bu sebeple Şekil 4.19.b'deki elektrik alan şiddeti azalmıştır.




Şekil 4.20. Düzlemsel prob çiftinin uzak alan simülasyonu: (a) 3MHz ve (b) 330MHz

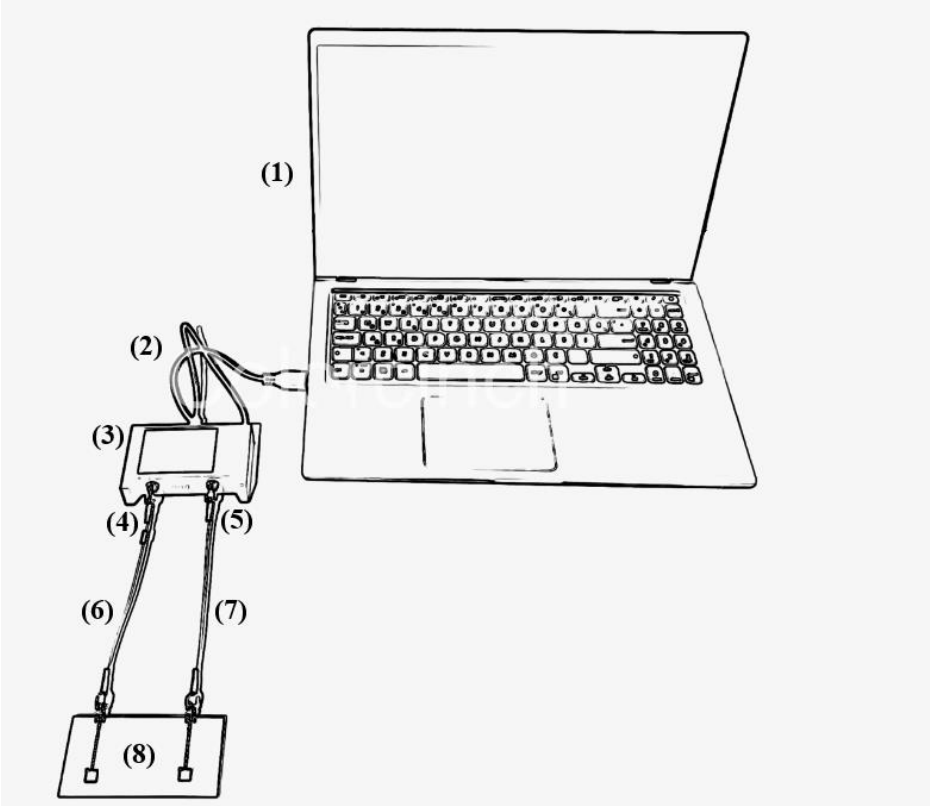
Simülasyon sonuçları ile; düzlemsel problara verilen sinyallerin HF ve VHF bantlarında karesel yamalar düzgün iletildiği, dış ortama ışımadığı ve karesel yamalara dokunulduğunda S-parametrelerin kullanıcı vücudunun elektriksel özelliklerine göre değişeceği garanti altına alınmıştır.




Şekil 4.21. NanoVNA ile düzlemsel prob çiftinden veri toplama için tasarlanan MATLAB GUI

NanoVNA ile bilgisayar USB sanal seri port ile haberleşmektedir (USB Virtual Com Port VCP). Şekil 4.21'de veri toplama amacıyla geliştirilen kullanıcı arayüzü gösterilmektedir. Bu arayüzün işlevleri aşağıda listelenmiştir.

- Seri port bulma ve açma/kapatma işlemleri.
- VNA'i yönetmek.
- HF bandında 101 ve hemen sonrasında VHF bandında 101 toplam 202 adımlık frekans taramasını başlatmak.
- VNA tarafından bilgisayara gönderilen S-parametre ölçümlerini görselleştirmek
- Veri etiketleme ve kaydetmek.
- Koaksiyel kablo ve düzlemsel probların S-parametre ölçümüne etkisini dengelemek için SOL kalibrasyon işlemleri (SHORT OPEN LOAD standart yükleri ile VNA PORT1'in kalibrasyonu).

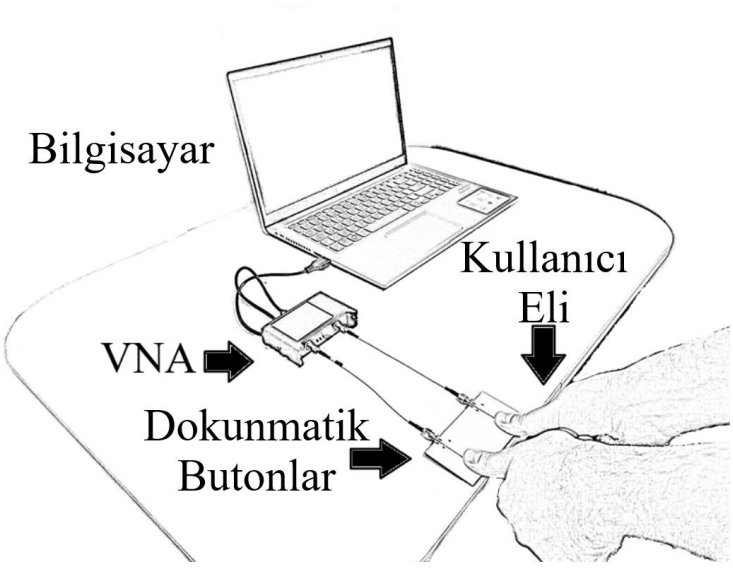



Şekil 4.22. Tez kapsamında geliştirilen Düzlemsel Prob Yönteminin uygulama senaryosu

Şekil 4.22 DPY için geliştirilen sistemi grafiksel olarak özetlemektedir. Sistemin bileşenleri aşağıda listelenmiştir:

1. Bilgisayar: VNA kontrolü, veri toplama, veri kaydetme, görselleştirme ve sınıflandırıcı eğitimi gibi işlevleri sağlamaktadır.
2. USB kablo: VNA ile bilgisayar arasındaki haberleşmeyi sağlamaktadır.
3. VNA (NanoVNA v2): S-parametre ölçümünü gerçekleştirmektedir.
4. VNA PORT1: sinyal üretmekte ve geri yansıyan sinyalleri ölçmektedir ($S_{11}$ parametresini ölçer).
5. VNA PORT2: sinyal üretmez, sadece iletilen sinyalleri ölçmektedir ($S_{21}$ parametresini ölçer).
6. Koaksiyel kablo: türü RG316, uzunluğu 15 cm. Sol düzlemsel prob ile PORT1 arası bağlantıyı sağlamaktadır.
7. Koaksiyel kablo: türü RG316, uzunluğu 15 cm. Sağ düzlemsel prob ile PORT2 arası bağlantıyı sağlamaktadır.
8. Düzlemsel probları içeren devre kartı (Şekil 4.17).

Şekil 4.23'te kullanıcılardan veri toplamada kullanılan kurulum gösterilmektedir. Veri toplama sırasında hem sol hem de sağ başparmakla DPY kartındaki dokunmatik butonlara aynı anda basılmıştır. Sonrasında Şekil 4.21'deki GUI kullanılarak, VNA'nın bir frekans taraması başlatıp ölçüm yapması sağlanmıştır. Frekans taramasını tamamladıktan sonra ölçüm verileri bilgisayara VNA tarafından gönderilmiştir. Ölçüm verileri bilgisayara ulaştıktan sonra görselleştirme ve sınıflandırma işlemleri için etiket atama işlemleri yapılmıştır.




Şekil 4.23. Veri toplama kurulumu

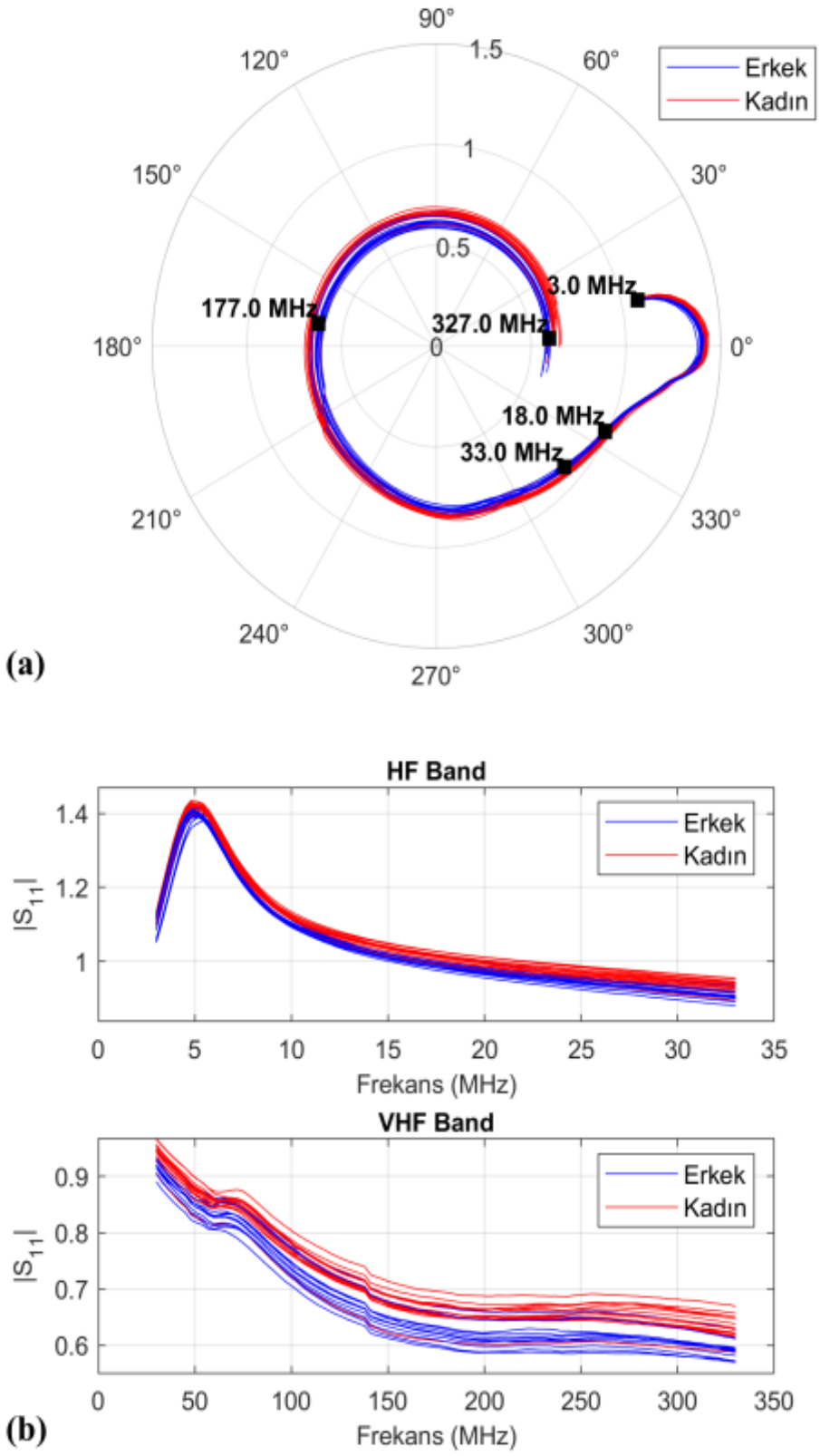
### 4.5. DPY ile Cinsiyet Sınıflandırma

Düzlemsel Prob Yönteminin cinsiyet sınıflandırmada yararlı olup olmadığı tespit etmek için 12 erkek ve 15 kadının katılımıyla veri toplanmıştır. Şekil 4.23'te gösterildiği gibi, katılımcılardan sol başparmaklarıyla PORT1'e ve sağ başparmakla PORT2'ye bağlanan karesel yamaların tamamını kaplayacak şekilde butonlara dokunması istenmiştir. Toplanan $S_{11}$ verileri Şekil 4.24'te Smith Chart grafiğiyle gösterilmektedir, $S_{11}$ verileri sol başparmaktan VNA PORT1'e geri yansıyan sinyallerin genlik ve faz bilgilerini içermektedir. Şekil 4.25'te toplanan $S_{21}$ verilerinin genliği gösterilmektedir, $S_{21}$ verileri ise VNA PORT1 den sol başparmağa, sol başparmaktan iki kolu geçip sağ başparmağa ulaşan ve nihayetinde sağ başparmaktan VNA PORT2'ye iletilen sinyallerin genlik ve faz bilgisini içermektedir.

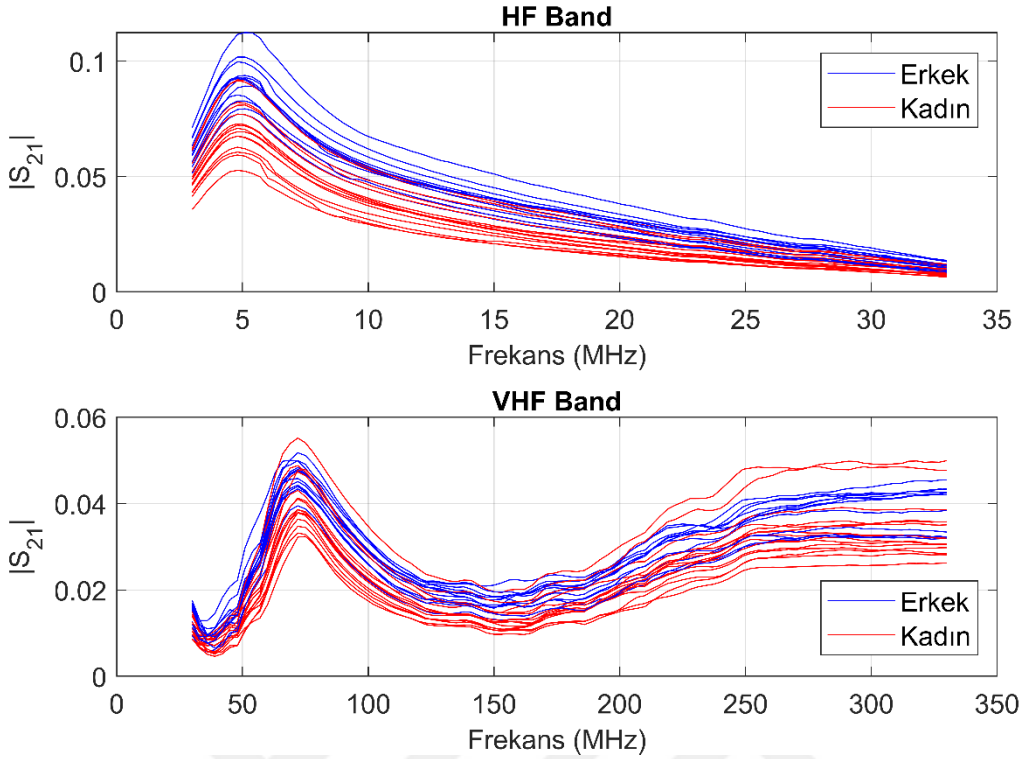
Smith Chart, kompleks yansıma katsayısını Γ ($S_{11}$ parametresini) görselleştirmektedir. Ek olarak, yansıma katsayısını veren yükün normalize empedansını grafik üzerinden hızlı ve kolayca hesaplanmasını da sağlamaktadır (Ulaby ve Ravaioli, 2015) (Pozar, 2012). Smith grafiğindeki yatay eksen yansıma katsayısının reel bileşenini, dikey eksen yansıma katsayısının sanal bileşenini göstermektedir. Yasıma katsayısı Smith grafiğinde çizildikten sonra yansıma katsayısının: orijinden uzaklığı yansıma katsayısının genliğini ve yatay eksenle yaptığı açı yansıma katsayısının fazını gösterir.

Smith grafiğinde çizdirilen $S_{11}$ parametresinin hangi frekansa denk geldiği kolayca gösterilememektedir. Fikir vermesi amacıyla bazı frekansların grafikte nereye denk geldiği Şekil 4.24.a'daki siyah kareler ile belirtildi. Şekil 4.24.b'deki $S_{11}$ verileri incelendiğinde, HF/VHF bantlarının neredeyse tamamında cinsiyete göre farklılık olduğu görülmektedir. En belirgin farklılık HF bandının "4-6" MHz ve VHF bandının "200-330" MHz aralığındadır.

Şekil 4.25'te $S_{21}$ parametresinin genliği HF/VHF bantları için ayrı ayrı grafikler ile gösterilmektedir. HF bandındaki verilerin tümünde cinsiyete göre bir farklılık olduğu görülmektedir. En belirgin farklılık ise "5-15" MHz aralığındadır. VHF bandındaki verilerde cinsiyet sınıfları arasında bir karışma olduğu görülmekte olup verilerdeki en belirgin farklılık "50-150" MHz aralığındadır.




Şekil 4.24. DPY ile cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S_{11}$ verileri: (a) Smith grafiği ve (b) genlik grafiği



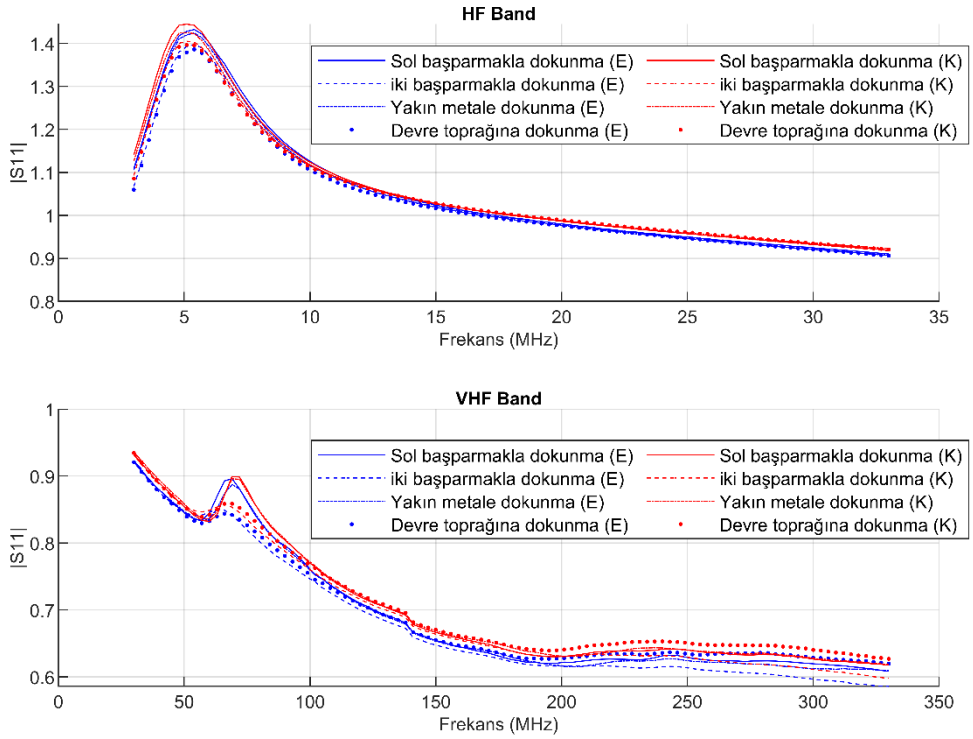

Şekil 4.25. DPY ile cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S_{21}$ genlik verileri.

DPY yaklaşımı ile yapılan bu ilk deneyler cinsiyet ayrımı konusunda umut vaat etmektedir. Bu yaklaşımımın farklı durumlardaki performansı takip eden alt bölümlerde detaylı şekilde irdelenmiştir.

### 4.6. Dokunma Davranışlarının S-parametre Ölçümlerine Etkisi

Farklı dokunma davranışlarının S-parametre ölçümlerine etkisini incelemek için 3 erkek ve 3 kadının katılımıyla yeni bir veri toplama deneyi yapılmıştır. Veri toplama sırasında katılımcıların sol başparmaklarıyla VNA PORT1'e bağlı butona dokunulurken sağ el ile aşağıda listelenen davranışları yapması istenmiştir.

- Serbest bırakma, Şekil 4.26'da düz çizgi ile gösterilmektedir.
- PORT2'ye bağlı butona dokunma, Şekil 4.26'da kesik çizgi ile gösterilmektedir.
- Yakın bir metal nesneye dokunma, Şekil 4.26'da noktalı çizgi ile gösterilmektedir.
- Devre toprağına bağlı olan SMA konnektörün dış iletkenine dokunma, Şekil 4.26'da çizgisiz nokta ile gösterilmektedir.

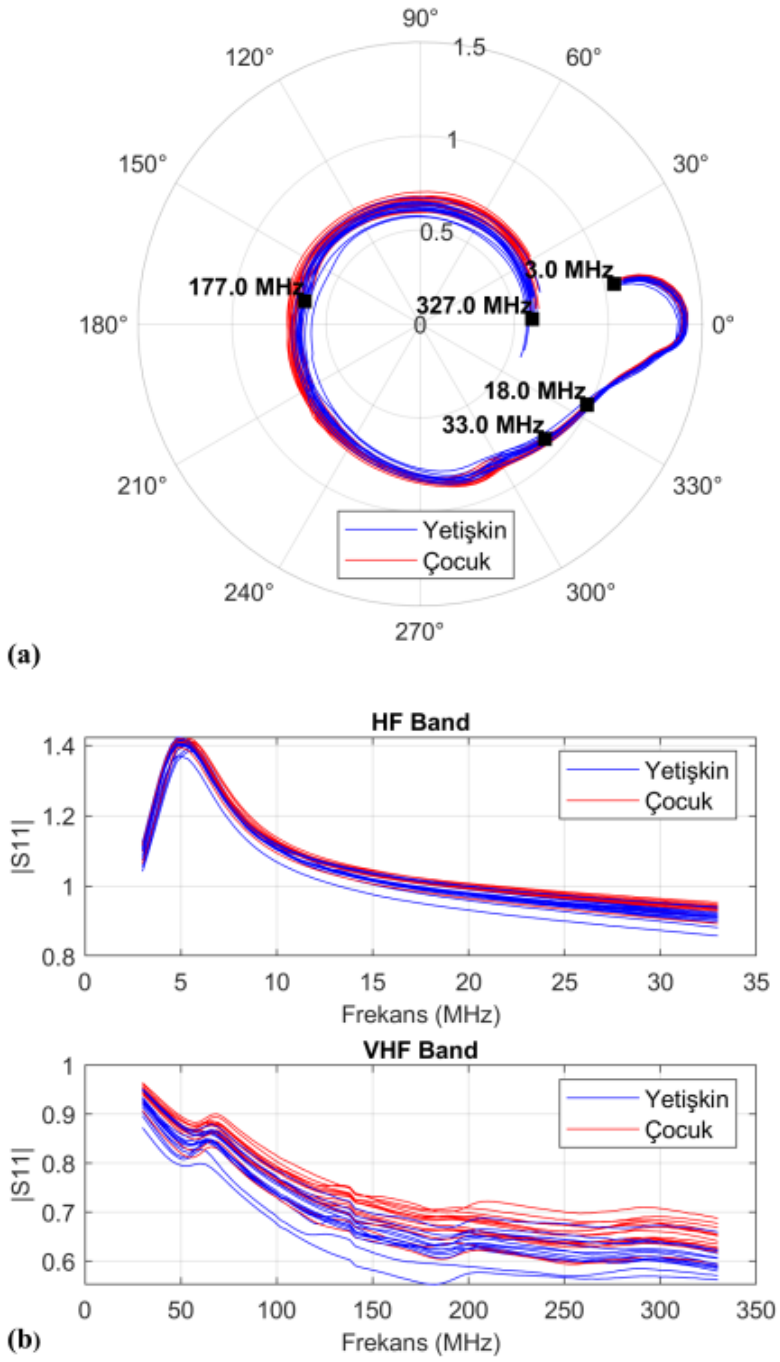



Şekil 4.26. Farklı dokunma davranışlarının S-parametre ölçümlerine etkisi.

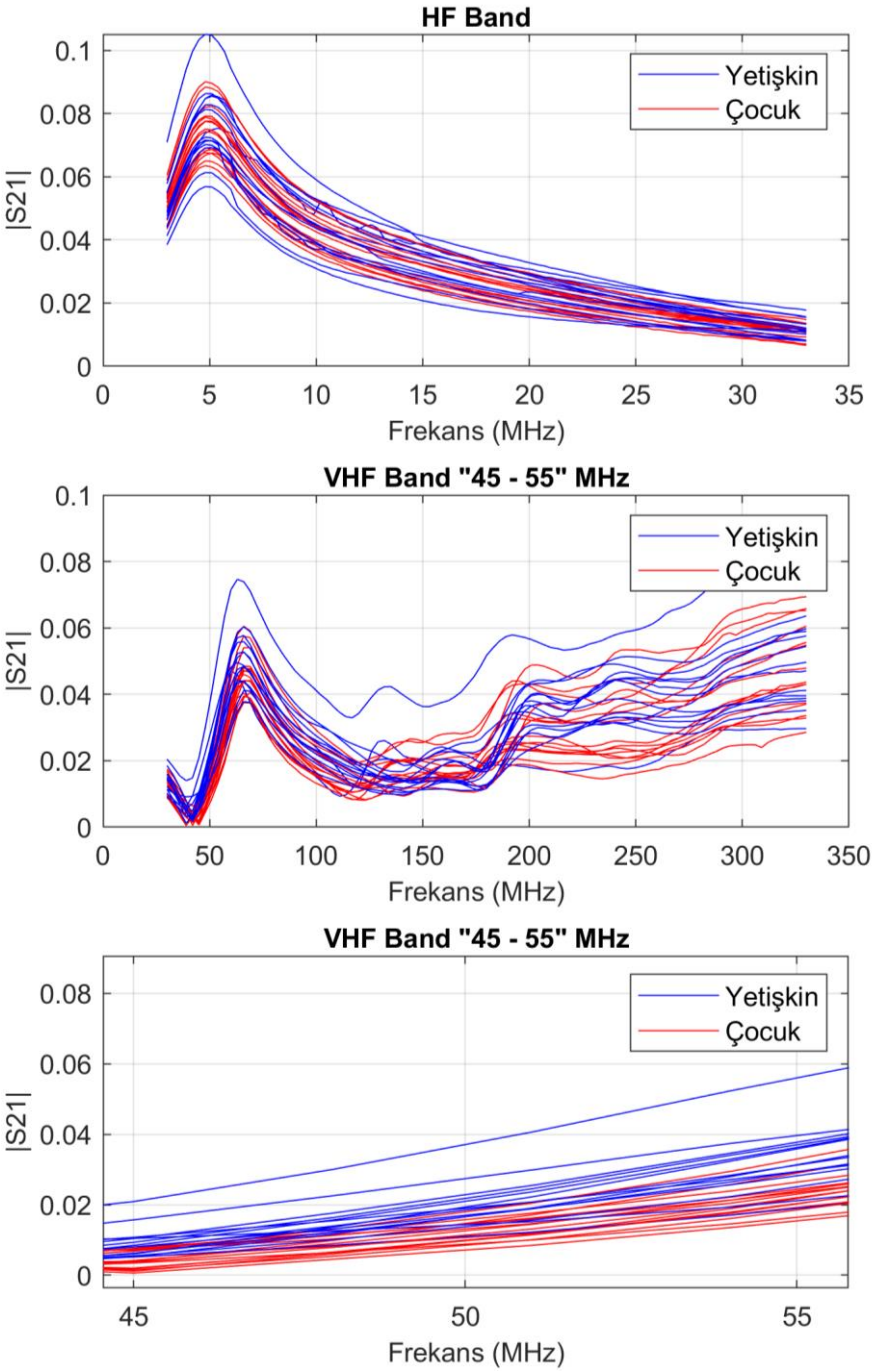
Şekil 4.26'daki veriler incelendiğinde yapılan davranışlara göre ölçülen $S_{11}$ değerinde farklılık olduğu görülmektedir. Her bir davranış türü için cinsiyet sınıfları birbirinden ayrıt edilmektedir. HF bandının "4-6" MHz aralığındaki veriler, farklı davranışların neden olabileceği sınıflar arası karışmaya bir örnektir. Her bir davranış türünün kendi içinde kadın sınıfı $S_{11}$ genliği erkek sınıfı $S_{11}$ genliğinden daha büyüktür. Farklı davranış türleri arası erkek $S_{11}$ genliğiyle kadın $S_{11}$ genliği arasında aynı durum geçerli olmamaktadır. Örnek olarak: sadece sol başparmakla dokunma davranışına ait erkek sınıfı $S_{11}$ genliği iki başparmakla dokunma davranışına ait kadın sınıfı $S_{11}$ genliğinden daha büyük değerdedir.

FTKA yöntemindeki kapasitif profillerde davranış farklılığından etkilenmeyen aralıklar bulunmamaktaydı. DPY ile ölçülen S-parametrelerde ise sağ başparmakla yapılan farklı davranışlar sınıflar arası karışmaya neden olsa da HF/VHF bantlarındaki bazı frekans aralıklarında ("20-30" MHz, "30-50" MHz ve "145-175" MHz) sınıflar arası karışma yoktur. Aynı sınıfa ait verilerde farklı davranışlar için ölçülen $S_{11}$ genliği oldukça yakın değerdedir. Öyle ki davranış farklılığından kaynaklanan $S_{11}$ değişimi ihmal edilebilir seviyededir. Bu frekans aralıkları davranış şeklinden bağımsız sınıflandırıcı eğitimi için

uygundur ve tezin “4.4. Dokunma Algılama için Yeni Yöntem Geliştirme (Düzlemsel Prob Yöntemi)” bölümünde anlatılan yeni yöntemin sağlaması gereken özelliklerden “Davranış şeklinden etkilenmeme” özelliğini sağlamaktadır. VHF bandının 200 MHz’den yüksek frekanslarında davranış şeklinden etkilenmenin tekrar başladığı görülmektedir.




Şekil 4.27. DPY ile yaş grubu sınıflandırması için toplanan $S_{11}$ verileri: (a) Smith grafiği ve (b) genlik grafiği




Şekil 4.28. DPY ile yaş grubu sınıflandırması için toplanan $S_{21}$ genlik verileri.

## 4.7. DPY ile Yaş Grubu Sınıflandırma

Yaş grubu (Çocuk/Yetişkin) sınıflandırması amacıyla 15 çocuk ile 14 yetişkinden oluşan bir gruptan veri toplanmıştır. Katılımcılardan Şekil 4.23'te gösterildiği gibi sağ ve sol başparmaklarıyla ilgili butonlara dokunmaları istenmiştir.

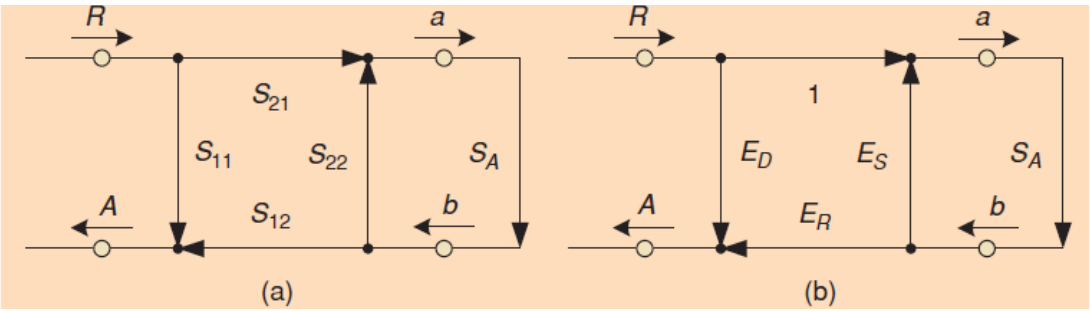
Şekil 4.27.a'daki Smith grafiğinde çizdirilen $S_{11}$ verileri; yetişkin sınıfı için mavi ve çocuk sınıfı için kırmızı renkle gösterilmektedir. Şekil 4.27.b'de HF bandının "5-30" MHz aralığında ve VHF bandının tamamında $S_{11}$ verilerinde yaş grubuna göre farklılık bulunmaktadır. Çocuk sınıfı $S_{11}$ genliği yetişkin sınıfı $S_{11}$ genliğinden daha büyük değerdedir.

Toplanan $S_{11}$ ve $S_{21}$ verilerinin bazı frekans aralıklarında yaş grubuna göre farklılık olduğu tespit edilmekle birlikte, cinsiyet sınıflandırması için toplanan verilerde sınıflar arası daha belirgin bir farklılık elde edilmişti.

Şekil 4.28'deki $S_{21}$ genlik grafiğinde yetişkin sınıfı mavi ve çocuk sınıfı kırmızı renkle çizdirilmiştir. HF bandının tamamında sınıflar arası bir farklılık bulunmamaktadır. Ancak VHF bandının "45-55" MHz aralığında sınıflar arası farklılık bulunmaktadır. Yetişkin sınıfı $S_{21}$ genliği çocuk sınıfından daha büyük değerlidir.

### 4.8. VNA Port 1 Kalibrasyonu

VNA ile ölçüm yapılırken test edilen devrenin VNA portlarına bağlanma şekli önemlidir. Devreyi portlara bağlayan koaksiyel kablonun boyu veya kablo içerisindeki yalıtkan malzeme değiştiğinde VNA ölçümlerinde farklık oluşmaktadır. Kablo uzunluğu, VNA tarafından ölçülen faz değerinin frekansa bağlı olarak değişmesine neden olmaktadır. Hiçbir kablo kayıpsız olmadığından kablo girişinden çıkışına iletilen elektromanyetik enerjide bir miktar zayıflama oluşmakta ve bu durum VNA tarafından ölçülen genlik değerini etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı bir devreyi VNA portlarına doğrudan bağlama ile bir koaksiyel kablo aracılığıyla bağlama durumlarında ölçülen S-parametrelerinde farklılık oluşmaktadır.




Şekil 4.29. VNA ölçüm hataları (Rumiantsev ve Ridler, 2008)

Buna ek olarak VNA içerisindeki elektronik devreler yüksek frekanslarda mükemmel çalışmamakta ve ölçülen S-parametrelerine Şekil 4.29'da gösterilen hatalar eklenmektedir (sadece PORT 1 dikkate alınmıştır) (Rumiantsev ve Ridler, 2008):

- VNA içerisindeki yönlü bağlacın (directional coupler) ideal olmamasından kaynaklı hata $E_D$ (directivity).
- VNA port empedansıyla test edilen devrenin giriş empedansının uyumlu olmamasından kaynaklı hata $E_S$ (source match).
- Test edilen devreden VNA portuna doğru yansıyan elektromanyetik dalgalar VNA içerisinde ölçülene kadar birçok iletim yolundan geçmektedir (VNA yönlü bağlacı ve varsa koaksiyel kablo kayıpları dahil). İletim yollarının kayıplı olması ve faz ölçümünün frekansa bağlı olarak değiştirmesinden kaynaklanan yansıma izleme hatası $E_R$ (reflection tracking) oluşmaktadır.

Aynı devreden tüm koşullar altında aynı S-parametre değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Ölçümde farklılığa neden olan VNA hataları genellikle sistematik hatalar olup ölçüm yapmadan önce ayarlama (kalibrasyon) yapılarak hataların etkisi telafi edilmektedir.

PORT1'den yapılan $S_{11}$ ölçümündeki hatalar Eşitlik (4.2) kullanılarak telafi edilmektedir (Rumiantsev ve Ridler, 2008):

$$S_{11A} = \frac{S_{11M} - E_D}{E_S(S_{11M} - E_D) + E_R} \tag{4.2}$$

$S_{11A}$ devrenin gerçek $S_{11}$ parametresi, $S_{11M}$ VNA ile ölçülen $S_{11}$ parametresi, $E_D$ yönlülük hatası (directivity), $E_S$ kaynak uyumu hatası (source match) ve $E_R$ yansıma izleme hatasıdır (reflection tracking).

Eşitlik (4.2)'nin sağ tarafında üç adet değeri bilinmeyen parametre bulunmaktadır ($E_D$, $E_S$ ve $E_R$). Bu değerleri belirlemek için üç adet eşitlik içeren bir denklem sistemi oluşturulmalıdır. VNA kalibrasyonunun amacı Eşitlik (4.2)'i çözmek için gerekli denklem sistemini aşağıdaki gibi oluşturmaktır;

1. Gerçek $S_{11A}$ değeri bilenen üç adet basit devre kullanma. Bu devreler VNA portunun sonuna bağlandığı için port sonlandırması (port termination) veya standart yükler olarak da adlandırılır. VNA PORT1 kalibrasyonu için genellikle Açık Devre (Open), Kısa Devre (Short) ve Uyumlu Yük (Load) sonlandırmaları kullanılmaktadır (SOL kalibrasyonu).
2. SOL sonlandırmaların her bir için $S_{11M}$ ölçümü yapılır ve $S_{11A}$ değeriyle birlikte Eşitlik (4.2)'ye yazılarak üç adet denklem elde edilir.
3. Denklem sisteminin çözümüyle $E_D$, $E_S$ ve $E_R$ hata değerleri elde edilir ve VNA hafızasında tutulur.
4. VNA tek bir frekans için ölçüm yapabilmektedir. Ancak genellikle belirli bir frekans aralığında tarama yaparak çalıştırılır. Bu sebeple yukarıdaki adımlar her bir frekans adımı için tekrarlanmaktadır.

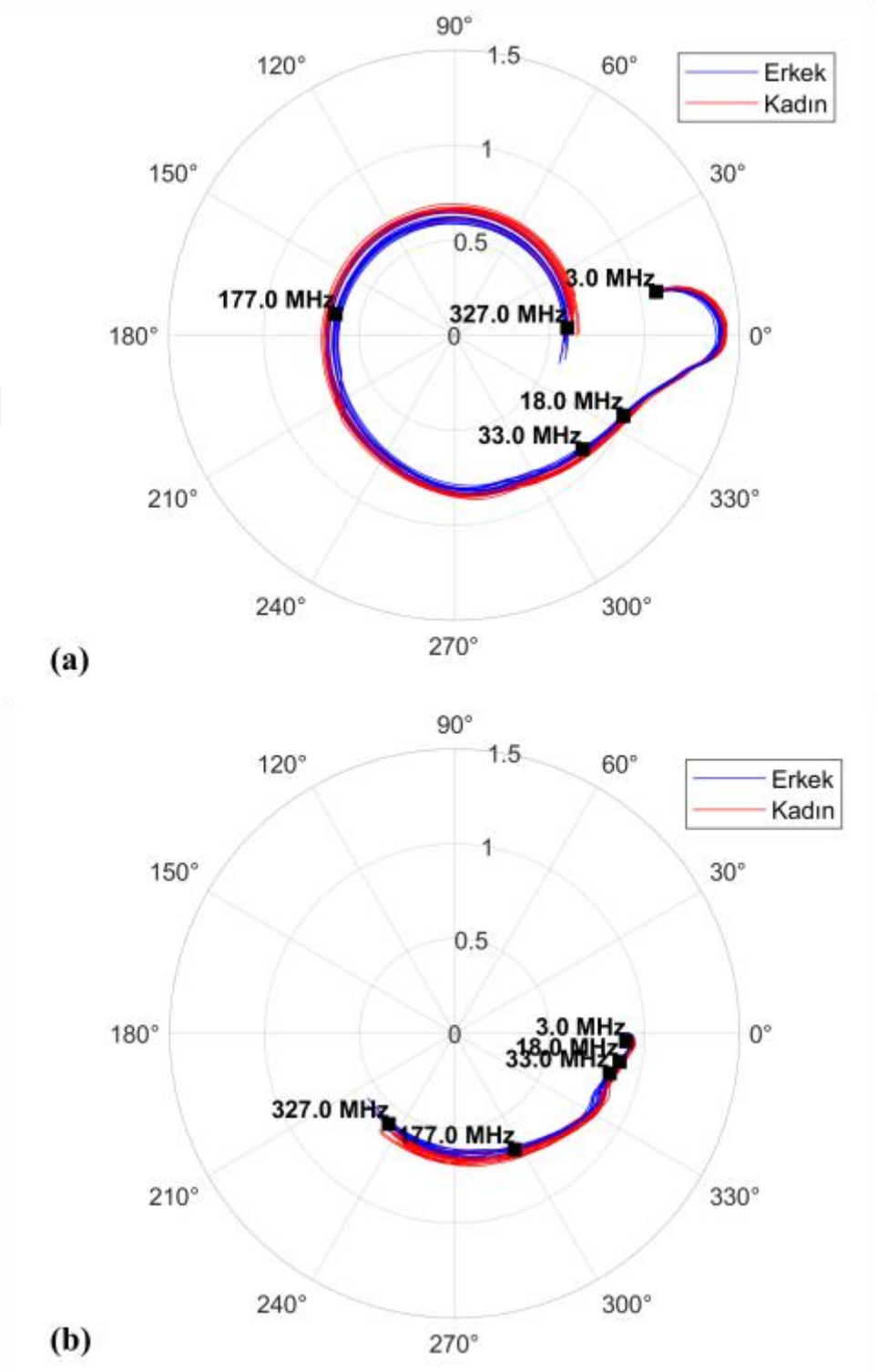
Tez kapsamında geliştirilen yaklaşımda VNA, düzlemsel prob çiftine iki koaksiyel kabloyla bağlanmaktadır. VNA kalibrasyonu için öncelikle koaksiyel kabloların düzlemsel problara bağlı tarafı sökülmüştür. Sonrasında, PORT1'e bağlı koaksiyel kablonun düzlemsel proba bağlanan ucuna SOL sonlandırmalar bağlanarak kalibrasyon yapılmıştır (kablonun diğer ucu VNA PORT1'e bağlıdır). Bu sayede hem VNA'nın iç yapısından hem de koaksiyel kablodan kaynaklı hataların elimine edilmesi hedeflenmiştir. Bu aşamada HF bandında 101 ve VHF bandında 101 toplam 202 frekans adımı için $E_D$, $E_S$ ve $E_R$ hesaplanıp bilgisayara kaydedilmiştir. $E_D$, $E_S$ ve $E_R$ elde edildikten sonra cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S_{11}$ verilerindeki VNA hataları Eşitlik (4.2) kullanılarak telafi edilmiştir. VNA hataları giderildikten (VNA kalibrasyonu yapıldıktan) sonra elde edilen Smith grafiği Şekil 4.30'da gösterilmektedir.

Karakteristik empedansı $Z_0$ olan bir iletim hattı $Z_L$ değerinde bir yük ile sonlandırıldığında yansıma katsayısı Γ Eşitlik (4.3)'teki gibi hesaplanmaktadır ($z_L = Z_L / Z_0$ hat empedansına göre normalize edilmiş yük empedansıdır) (Pozar, 2012);

$$\Gamma = S_{11} = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{z_L - 1}{z_L + 1} \tag{4.3}$$

Smith grafiğinde yatay eksenin değeri kompleks yansıma katsayısının reel kısmını dikey eksen ise sanal kısmını ifade etmektedir. Kayıpsız iletim hattının karakteristik empedansı

$Z_0$ reeldir. Kayıpsız bir iletim hattı reel bir yük ile sonlandırıldığında yansıma katsayısı da reeldir ve Smith grafiğinin reel (yatay) ekseni üzerinde konumlanır.




Şekil 4.30. Cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S_{11}$ verilerinin VNA kalibrasyonu sonucu: (a) kalibrasyonsuz veriler ve (b) kalibrasyonlu veriler.

Smith grafiğinin reel ekseni haricinde bulunan herhangi bir yansıma katsayısı Γ (veya $S_{11}$ parametresi) iletim hattı sonuna bağlanan yükün sanal bileşeni olduğunu gösterir. Eşitlik (4.3)'e göre Γ'nın sanal bileşeni pozitif ise $Z_L$ sanal bileşenin pozitif değerli olduğunu gösterir ve Γ'nın sanal bileşeni negatif ise $Z_L$ sanal bileşenin negatif değerli olduğunu gösterir.

İndüktif bir yükte empedansın sanal kısmı pozitif, kapasitif yükte ise negatif değerli olur. Bu sebeple yansıma katsayısı Γ; Smith grafiğinde yatay eksenin üstündeki bölgede bulunuyorsa iletim hattının indüktif bir yükle sonlandığını ve yatay eksenin altındaki bölgede bulunuyorsa iletim hattının kapasitif bir yükle sonlandığını göstermektedir.

Düzlemsel probları NanoVNA'ye bağlayan koaksiyel kablo kısa (15cm uzunluğunda) olduğu için kayıpsız olarak değerlendirilebilir ($Z_0$ reel). DPY ile toplanan $S_{11}$ verileri, VNA kalibrasyonu sonrasında Şekil 4.30.b'de yatay eksenin altındaki bölgede bulunmaktadır. Bu sebeple, butona dokunan kullanıcının elektriksel açıdan kapasitif yük gibi davrandığını anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, DPY ile yapılan S-parametre ölçümleriyle kapasitif dokunma algılama gerçekleştirildiği söylenebilir.

### 4.9. Veri Toplamaya Katılacak Kişi Sayısının Belirlenmesi

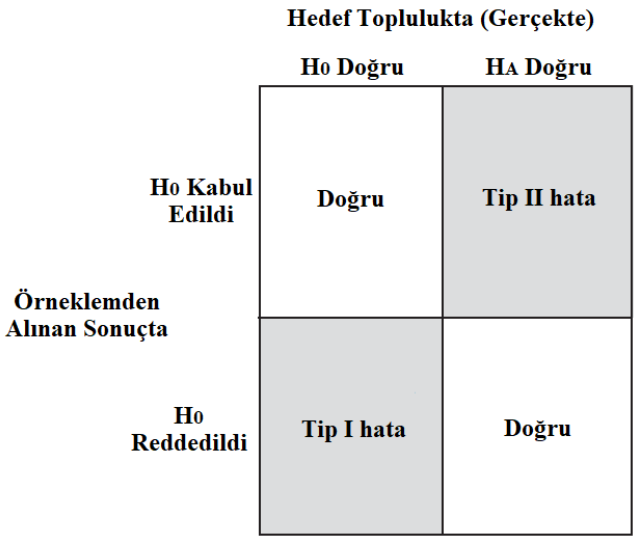
Yapılan tıbbı araştırmalarda yeni bir teşhis yönteminin doğruluğunu veya yeni bir tedavi yönteminin yararını kanıtlamak için hastalar üzerinde denemeler yapılması gerektirmektedir. Bu tarz denemelerde söz konusu insan olunca katılımcı sayısı belirleme ciddi önem taşımaktadır. Gerekenden fazla katılımcıyla denemler yapmak etik açıdan uygun olmayabilir. Bunun yanında gerekenden az sayıda katılımcıyla deneme yapmak şans eseri yanlış sonuçlar alınmasına neden olabilir. Bu sebeple tıbbi araştırmalarda yapılan klinik denemelere katılımcı sayısını belirlemede istatistiksel güç analizi (Statistical Power Analysis) yaygın olarak kullanılmaktadır (Jones ve diğ., 2003) (Eng, 2003).

Güç analizi yapmak için deneyle ilgili bazı tanımlamaların yapılması gerekmektedir:

- Sıfır hipotez ($H_0$): yapılan deneyle kanıtlanması beklenen bilgi.
- Alternatif hipotez ($H_A$): sıfır hipotezin yanlış olması durumunda deneyden beklenen sonuç.

Şekil 4.31'de hipotez testi için yapılan bir deneyden elde edilecek olası sonuçlar gösterilmektedir. Deney yapıldıktan sonra iki tip hata oluşabilmektedir. Güç analiziyle katılımcı sayısı belirlemede bu hatların maksimum tolere edilebilir değeri deneyi yapmadan önce belirlenmelidir:

- Tip I hata ($\alpha$): sıfır hipotezin gerçekte var olmasına rağmen katılımcılardan oluşan örneklemde açığa çıkmama durumunda oluşan hata.
- Tip II hata ($\beta$): sıfır hipotezin gerçekte var olmamasına rağmen katılımcılardan oluşan örneklemde varmış gibi sonuç alındığı durumunda oluşan hatadır ve deneyin istatistiksel gücünü hesaplamada kullanılır $Power = 1 - \beta$.




Şekil 4.31. Hipotez testi için yapılan bir deneyin olası sonuçları

İki katılımcı grubuyla yapılan klinik deneyleri üç türe ayırmak mümkündür (Jones ve diğ., 2003) (Eng, 2003):

1. Sürekli verileri karşılaştıran deneyler: sürekli bir sayısal değerin karşılaştırılması ve deney grupları arasında bir farklılık olup olmadığını tespit etmeyi hedefleyen deneyler.
2. Kategorik verileri karşılaştıran deneyler: deneydeki her bir guruptan beklenen sonuç bir oranla ifade edildiğinde iki grup arasındaki oran farkını tespit etmeyi hedefleyen deneyler.
3. Teşhis amaçlı yapılan deneyler: önerilen yeni bir yöntemin önceden var olan yöntemlere göre performansını tespit etmeyi hedefleyen deneylerdir.

Tez kapsamında geliştirilen DPY, parmak ucu ve kolun ön kısmındaki dokuların elektriksel geçirgenliğinde cinsiyete göre olası bir farklılığı ölçerek cinsiyet sınıflandırmasını gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Tezin sıfır hipotezi $H_0$: S-parametrelerinde cinsiyete göre bir farklılığın olmasıdır.

Tezde çözülmesi amaçlanan problem istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde, iki gruba (erkek/kadın) ait sürekli bir sayısal değerin karşılaştırmasından ibaret olduğu anlaşılmaktadır. Bu da (Eng, 2003)'te anlatılan "sürekli verileri karşılaştıran" klinik test kapsamına girmekte olup iki grup için gerekli toplam katılımcı sayısı Eşitlik (4.4)'e göre hesaplanmaktadır:

$$N = \frac{4\sigma^2\left(z_{crit} + z_{pwr}\right)^2}{D^2} \tag{4.4}$$

Bu eşitlikte $N$: toplam katılımcı sayısını. $\sigma$: her bir grubun standart sapmasını (iki grubun standart sapmasının eşit veya yakın değerde olduğu varsayılmaktadır). $z_{crit}$: $1 - \alpha/2$ değerine denk gelen ters kümülatif dağılım fonksiyonu değerini (Inverse Cumulative Distribution Function ICDF). $z_{pwr}$: deney istatistiksel gücünün ters kümülatif dağılım fonksiyonu değerini ve son olarak $D$: deneyde kanıtlanması beklenen iki grup arası farklılığı göstermektedir.

Yapılacak deneyin hedefi, iki grup arası $D$ kadar bir farklılığın varlığını kanıtlamaktır. Bu farklılığın miktarı ya literatürdeki benzer çalışmalardan yararlanarak ya da deneyi tasarlayan kişinin öngörüsüyle belirlenmektedir. Standart sapma $\sigma$ değeri de aynı şekilde belirlenmektedir. Tip I hata $\alpha$ ve istatistiksel güç $(1 - \beta)$ deneyi kurgulayanlar tarafından belirlenmektedir.

DPY devresiyle yapılacak veri toplama için $\alpha = \beta = 0.05$ olarak belirlendiğinde $z_{crit} = 1{,}960$ ve $z_{pwr} = 1{,}645$ olur. Eşitlik (4.4)'te kullanılması gereken $\sigma$ ile $D$ parametreleri hakkında öngörü elde etmek amacıyla önceden toplanan S-parametre verileri kullanılmıştır. Sınıflandırma problemine göre $\sigma$ ile $D$ parametreleri değişeceğinden cinsiye ve yaş grubu sınıflandırmaları için ayrı ayrı hesaplandı.

Hesaplamalar ilk önce cinsiyet sınıflandırması için yapılmıştır. Bu kapsamda 12 Erkek ile 15 kadının katılımıyla toplanan S-parametre verileri kullanılmıştır. Sonrasında, hesaplamalar yaş grubu sınıflandırması için gerçekleştirilmiş olup bu aşamada 15 çocuk ile 14 yetişkinin katılımıyla toplanan S-parametre verileri kullanılmıştır.

Eşitlik (4.4)'te kullanılması gereken $\sigma$ ile $D$ parametrelerini hesaplamak için bir MATLAB kodu yazıldı. Yazılan kodda her bir frekans adımı için;

1) Erkek/kadın sınıfının ayrı ayrı $S_{11}$ genlik ortalaması hesaplandı.
2) İki sınıf ortalamasının farkı alınarak $D$ parametresinin değeri belirlendi (bu değer her bir frekans adımı için değişmektedir).
3) Erkek/kadın sınıfının ayrı ayrı standart sapması ($\sigma$) hesaplandı (bu değer yine her bir frekans adımı için değişmektedir).
4) Önceki adımlarda bulunan değerler Eşitlik (4.4)'e göre katılımcı sayısı hesaplamada $\sigma$ ve $D$ yerine kullanıldı.
5) Önceki adımlar $S_{11}$ fazı ve $S_{21}$ genliği için tekrarlandı.

Yukarıda cinsiyet sınıfları için anlatılan adımlar yaş grubu sınıfları (çocuk/yetişkin) için de tekrarlanmıştır. Hata değerleri $\alpha = \beta = 0.05$ olarak belirlendikten sonra Eşitlik (4.4)'e göre hesaplanan toplam katılımcı sayısının maksimum değerleri Tablo 4.4'te, minimum değerleri Tablo 4.5'te gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Toplanan verilerin istatistiksel anlamlı olması için gereken maksimum katılımcı sayısı.

| **Sınıflar** | **Ölçülen Nicelik** | **Frekans (MHz)** | **Katılımcı Sayısı** |
|---|---|---|---|
| Cinsiyet | S11 genliği | 6,9 | 58 |
| Cinsiyet | S11 Fazı | 6 | 4,0292e+06 |
| Cinsiyet | S21 genliği | 249 | 158 |
| Yaş grubu | S11 genliği | 3 | 182 |
| Yaş grubu | S11 Fazı | 195 | 818 |
| Yaş grubu | S21 genliği | 75 | 1,5880e+07 |

Tablo 4.4 ve 4.5'e göre cinsiyet sınıflandırması için gerekli katılımcı sayısı yaş grubu için gereken sayıdan azdır. Katılımcı sayısı, sınıflandırıcı eğitiminde kullanılacak özniteliklere göre değişmektedir. Bir öznitelik vektörü için gerekli katılımcı sayısını, vektör içerisinde en çok katılımcı gerektiren öznitelik belirlemektedir. Bazı öznitelikler

milyonlar mertebesinde katılımcı gerektirirken bazıları 15 kişiden az katılımcı gerektirmektedir.

Tablo 4.5. Toplanan verilerin istatistiksel anlamlı olması için gereken minimum katılımcı sayısı.

| Sınıflar | Ölçülen Nicelik | Frekans (MHz) | Katılımcı Sayısı |
|---|---|---|---|
| Cinsiyet | S11 genliği | 5,1 | 12 |
| Cinsiyet | S11 Fazı | 3 | 12 |
| Cinsiyet | S21 genliği | 12,6 | 12 |
| Yaş grubu | S11 genliği | 181 | 54 |
| Yaş grubu | S11 Fazı | 3 | 72 |
| Yaş grubu | S21 genliği | 48 | 32 |

## 4.10. HF/VHF Frekans Bantlarındaki Elektriksel Sinyallerin İnsan Cismine Etkisi

Tablo 4.6'da HF, VHF ve UHF bantlarının kapsadığı frekans aralıkları verilmektedir. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) düşük ve yüksek frekanslı (Ahlbom ve diğ., 1998) elektromanyetik alanlara maruz kalan insan vücudunun zarar görmemesi için referans alan değerleri ve bu alanları taşıyan iletim hattıyla direkt bir temas olma durumu için referans akım değerleri belirlemiştir.

Tablo 4.6. HF, VHF ve UHF bantlarının Frekans aralıkları.

| Frekans Bandı | Kapsadığı Frekans Aralığı (MHz) |
|---|---|
| HF | 3 – 30 |
| VHF | 30 – 300 |
| UHF | 300 – 3000 |

Tablo 4.7. Maksimum temas akım değerleri (Ahlbom ve diğ., 1998)

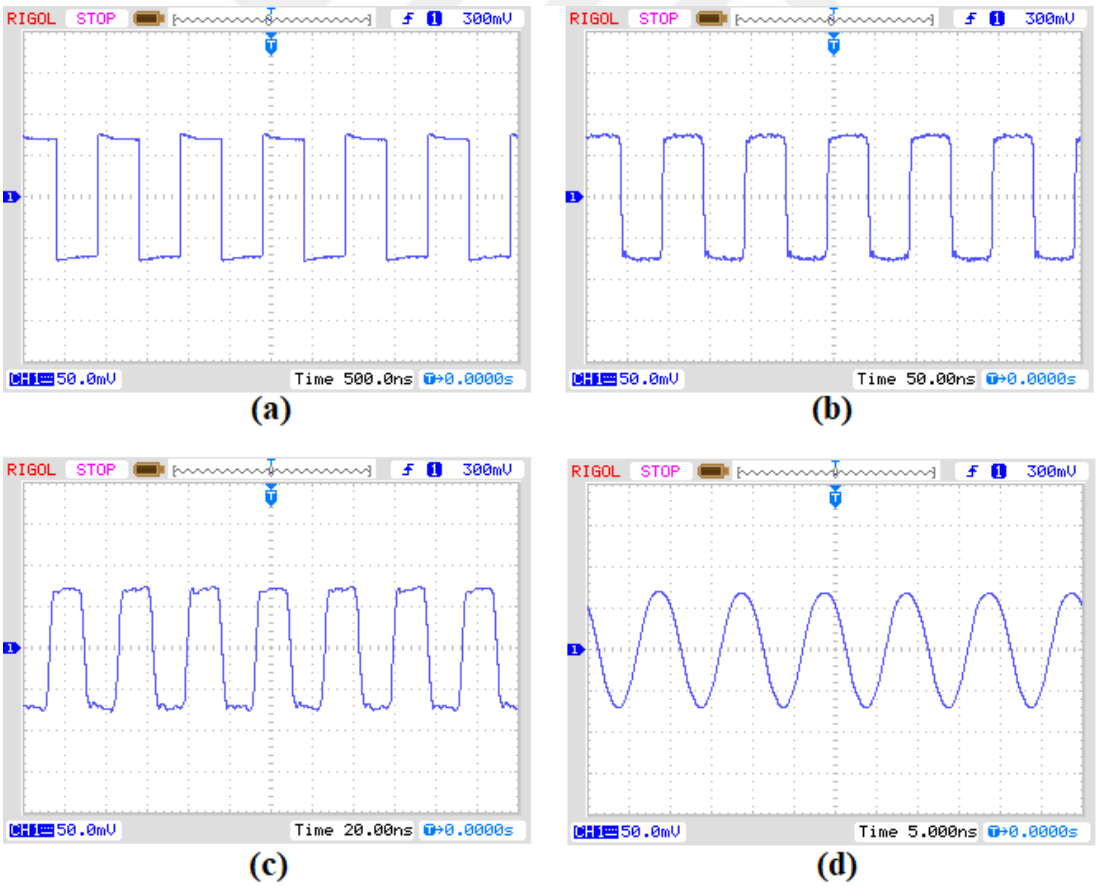
| Maruz Kalma Özellikleri | Frekans Aralığı | Maksimum Temas Akımı (mA) |
|---|---|---|
| Mesleki Maruziyet | 2,5 kHz'e kadar | 1,0 |
| | 2.5–100 kHz | 0,4*f* |
| | 100 kHz–110 MHz | 40 |
| Genel Halk Maruziyeti | 2,5 kHz'e kadar | 0,5 |
| | 2.5–100 kHz | 0,2*f* |
| | 100 kHz–110 MHz | 20 |

*f*, kHz cinsinden frekanstır

Olası temas durumunda insan vücuduna zarar vermeyecek şekilde belirlenen maksimum temas akım değerleri farklı frekans arlıkları için (Ahlbom ve diğ., 1998)'den alınan Tablo

4.7'de listelenmektedir. Tablo 4.7'deki $f$'li ifadeler tablonun altında belirtildiği gibi kHz cinsinden frekans değeridir. Örnek olarak 3 kHz frekansındaki bir temas akımının genel halk maruziyeti için maksimum değeri 0,2×3 = 0,6 mA değerindedir. Bu değerden fazlası insan dokularına zarar vermektedir. "100 kHz – 110 MHz" frekans aralığında ise insana zarar vermeyecek maksimum akım 20 mA'e eşit sabit bir değer olarak belirlenmiştir.

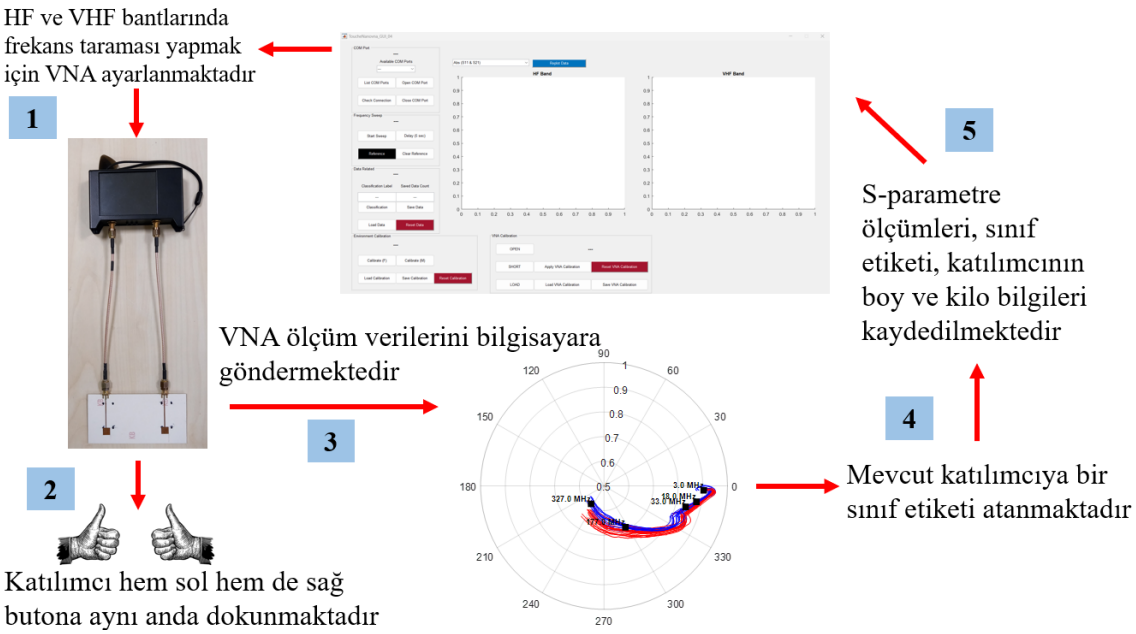
NanoVNA v2'nin PORT1'i 50Ω'luk yüke sonlandırıldığında, yük üzerinde oluşan gerilim sinyali 1, 10, 30 ve 100 MHz frekansları için Şekil 4.32'de gösterilmektedir. Osiloskop görsellerinden ölçülen gerilimler kullanılarak NanoVNA v2'nin PORT1'den bastığı güç hesaplandığında 10 MHz için 112,5 µW (-9,48 dBm) değeri elde edilmektedir. 112,5 µW gücü 1,5 mA'lik akıma denk gelmektedir. Bu akım değeri Tablo 4.7'de verilen 20 mA akım değerinden çok küçüktür. İnsan vücudunun direnci 50 Ω'dan büyük olduğu için akım değeri daha da az olacaktır. Dolayısıyla (Ahlbom ve diğ., 1998)'e göre DPY devresinin insan sağlığına zarar vermeyeceği anlaşılmaktadır.




Şekil 4.32. NanoVNA v2 PORT1 gerilimi (50 Ω yük): (a) 1 MHz, (b) 10 MHz, (c) 30 MHz ve (d) 100 MHz

### 4.11. Veri Toplama Prosedürü

DPY ile yeterli istatistiksel güce sahip deneysel sonuçlar elde etmek için katılımcı sayısının tezin başında planlanan göre arttırmak gerekmiştir. Çok sayıda katılımcı bulma kolay olmadığından veri toplama işlemini hızlı bir şekilde yapmak üzere katılımcıları toplamadan önce bir veri toplama prosedür planlaması yapılmıştır. Şekil 4.33'te veri toplama prosedürünün grafiksel özeti gösterilmektedir. Veri toplama prosedürü aşağıda belirtildiği gibi sekiz adımdan oluşacak şekilde tasarlandı:




Şekil 4.33. DPY ile veri toplama prosedürünün grafiksel özeti

1) HF ve VHF bantlarında frekans taraması yapmak için VNA ayarlanmaktadır. Her frekans taraması için VNA'dan 202 ölçüm verisi alınmaktadır (3 MHz'den 33 MHz'e 101 adım sonrasında 30 MHz'den 330 MHz'e 101 adım). Her ölçüm verisi tek bir frekans değeri için $S_{11}$ genliğini, $S_{11}$ fazını ve $S_{21}$ genliğini içermektedir.
2) Katılımcıya hem sol hem de sağ butonlara aynı anda normal bir şekilde (yaklaşık 10 N kuvvetle) dokunmasını söylenmektedir.
3) VNA cihazının bir frekans taraması başlatması ve ölçüm verilerini bilgisayara göndermesi için komut verilmektedir.

4) Bilgisayar uygulaması kullanılarak mevcut katılımcıya bir sınıf etiketi (ground truth) atanmaktadır (çalışma amacımıza göre sınıf etiketi erkek/kadın veya çocuk/yetişkin olmaktadır).
5) Frekans taraması bittikten sonra; bilgisayar uygulaması kullanılarak frekans tarama verileri, sınıf etiketi, katılımcının boy ve kilo bilgileri kaydedilmektedir.
6) Katılımcıya ellerini kaldırması ve ardından aynı anda hem sol hem de sağ butonlara daha kuvvetli bir şekilde (yaklaşık 15 N kuvvetle) tekrar dokunması söylenmektedir.
7) 3'üncü adımdan 5'inci adıma kadar olan işlemlerin tekrarlanmasıyla bir katılımcıdan veri toplama işlemi tamamlanmaktadır.
8) Başka katılımcılardan veri toplamak için, 2'nci adımdan 7'nci adıma kadar olan işlemler son katılımcıya gelene kadar tekrarlanarak veri toplama işlemi tamamlanmaktadır.

# 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Önceki bölümde tez kapsamında geliştirilen iki dokunma algılama devresi açıklanmıştı. İlk geliştirilen devre FTKA temelli çalışmakta olup filtre yanıtı (kapasitif profil) kullanıcının bulunduğu ortamdan ve davranış şeklinden oldukça etkilenmektedir. Tezde geliştirilen ikinci yaklaşımda hem yeni bir insan vücudu elektriksel modeli hem de S-parametre ölçümleriyle dokunma algılama yöntemi ortaya konulmuştur. İkinci devredeki dokunmatik butonlar S-parametre ölçümü için bir prob işlevi gördüğünden yöntemin adı Düzlemsel Prob Yöntemi (DPY) olarak belirlenmişti.

DPY ile cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırması için toplanan ilk verilerde sınıflar arası farklılık gözlemlenmiş ve bu yaklaşımın tezin amacını gerçekleştirmek için uygun olduğu anlaşılmıştı. DPY kullanılarak farklı davranış şekilleri ile ilgili veri toplama süreci sonucunda elde edilen sonuçlar bazı frekanslarda S-parametre ölçümlerinin davranış şeklinden etkilendiğini göstermişti. Önceki bölümde, S-parametre ölçümlerinin davranış şeklinden etkilenmediği frekans aralıklarının tespit edilmesi nedeniyle bu bölümde yapılan deneyler doğrudan DPY üzerine kurgulanmıştır.

Bu bölümde anlatılan deneysel sonuçlar DPY yaklaşımının/devresinin:

- Cinsiyet sınıflandırması için uygun olduğunu göstermekte,
- Cinsiyet sınıflandırması için elde edilen sonuçların katılımcıların vücut kitle endeksinden bağımsız olduğunu kanıtlamakta,
- S-parametre ölçümlerinin kullanıcı el sıcaklığı ve butona basarken uygulanan kuvvete bağlı olarak bir miktar değiştiği ama cinsiyet sınıflandırmasını etkilemediğini kanıtlamakta,
- S-parametre ölçümlerinin buton boyutu ile butonlar arası uzaklığa göre değiştiği ama cinsiyet sınıflandırmasını etkilemediğini göstermekte,
- Aynı kişiler tarafından farklı zamanlarda yapılan dokunmalardan elde edilen S-parametre ölçümlerinde farklılık olduğu ve bu farklılığın cinsiyet sınıflandırmasını etkilemediğini kanıtlamakta,
- Cinsiyet sınıflandırması için elde edilen sonuçların anlamlı olması için yeteri istatistiksel gücü sağladığını göstermekte ve

- S-parametre ölçümlerinin tek parmakla dokunma yapıldığında da cinsiyet sınıflandırması için kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Bu bölüm kapsamında anlatılan deneysel çalışmalarda ayrıca:

- DPY kullanılarak elde edilen verilerin sınıflandırma doğruluğunu arttırmak için öznitelik seçimi yapılmış,
- DPY kullanılarak elde edilen veriler ile eğitilen sınıflandırıcıların ortamdan en az seviyede etkilenmesi için öznitelik seçimi yapılmış,
- Cinsiyet sınıflandırması için DPY ile FTKA karşılaştırması gerçekleştirilmiş,
- DPY ile elde edilen sınıflandırma performansının literatürdeki benzer yöntemler ile karşılaştırması yapılmış,
- Yaş grubu sınıflandırması için toplanan verilerin istatistiksel güç analizi gerçekleştirilmiş,
- Yaş grubu verilerine cinsiyet bilgisi dahil edilerek S-parametre verileri incelenmiş ve
- UHF ve L frekans bantlarında DPY ile toplanan S-parametre verilerinin cinsiyet sınıflandırması için uygunluğu değerlendirilmiştir.

Veri seti oluşturulurken veri toplama süreci uzun vakit almaktadır. İlk etapta "Veri Seti #1" oluşturulurken DPY'nin cinsiyet sınıflandırması için faydalı olup olmayacağı belirsiz olduğu için veri toplama süreci basit tutulup katılımcılardan sadece butona dokunma istenmiştir. Veri Seti #1 oluşturulduktan sonra analiz edilip DPY'nin cinsiyet sınıflandırması için uygun olabileceği anlaşılmıştır.

Sonraki süreçte DPY'nin performansını analiz etmek için farklı ortam ve koşullar altında veri toplama gerekmiştir. Ancak veri toplamaya katılım için zorlayıcı/teşvik edici bir sebep olmadığı ve katılım tamamen gönüllülük esasına dayalı olduğu için her seferinde aynı katılımcılarla veya aynı sayıda katılımcıyla veri toplamak mümkün olmamıştır. Bu sebeple farklı veri toplama koşullarının DPY üzerinde etkisi incelemek için yapılan denemeler az sayıda katılımcıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında yapılan özgün veri toplamalardan elde edilen veri setleri ile ilgi bilgiler Tablo 5.20'de detaylıca açıklanmıştır. Ancak el sıcaklığı ve nemindeki farklılık, farklı zamanlarda dokunma, farklı buton konfigürasyonlarında dokunma ve farklı dokunma

kuvvetlerinin etkisi incelemek için yapılan denemelere sadece 2 erkek ve 2 kadın katıldığı için bu denemeler Tablo 5.20'ye veri setleri olarak yazılmamıştır.

Makine öğrenmesindeki sınıflandırıcıların içerdiği parametre sayısı eğitim verisinin sayısını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Kompleks veya iç yapısında çok sayıda parametrenin değerini belirlemeyi gerektiren (derin sinir ağı gibi) bir sınıflandırıcıyı eğitmek için çok sayıda eğitim verisine ihtiyaç duyulur.

Tez kapsamında sınıflandırıcı eğitimi için toplanan veriler az sayıda olduğu için derin sinir ağıları tercih edilmiş ve klasik makine öğrenmesi yöntemlerine odaklanılmıştır. Klasik makine öğrenmesi yöntemleri arasında DVM en iyi sınıflandırma performansını veren yöntemlerden olduğu için tercih edilmiştir.

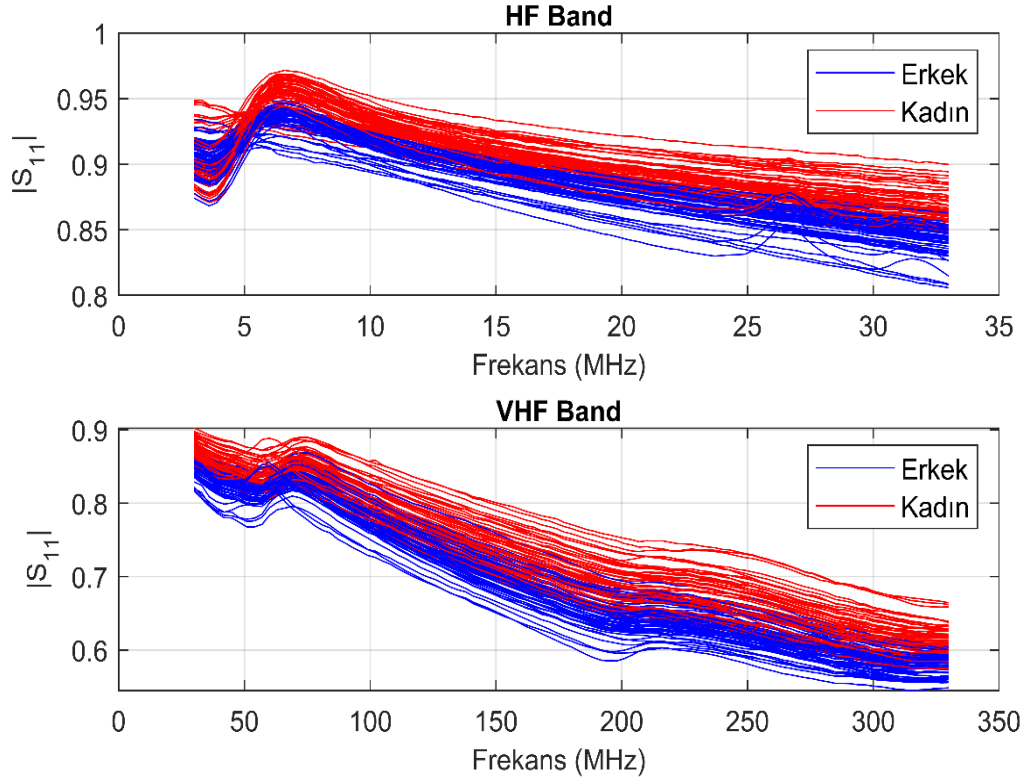
DVM eğitimi bir dışbükey optimizasyon problemi gibi ele alındığı için tek bir optimum çözüm bulunmaktadır. Bu optimumu bulma iteratif işlemler gerektirse de çok katmanlı algılayıcı eğitimindeki iteratif işlemlerden daha kolaydır (Alpaydin, 2020).

Ek olarak, sınıflandırıcıyı bilgisayarda çalıştırma yerine mikrodenetleyicide çalıştırmak istenildiğinde kullanılacak sınıflandırıcının gerektirdiği hesaplama gücünün az olması gerekmektedir. DVM sınıflandırıcının çıkışı destek vektörlerin etkisinin toplamı olarak yazılabilir (Alpaydin, 2020).

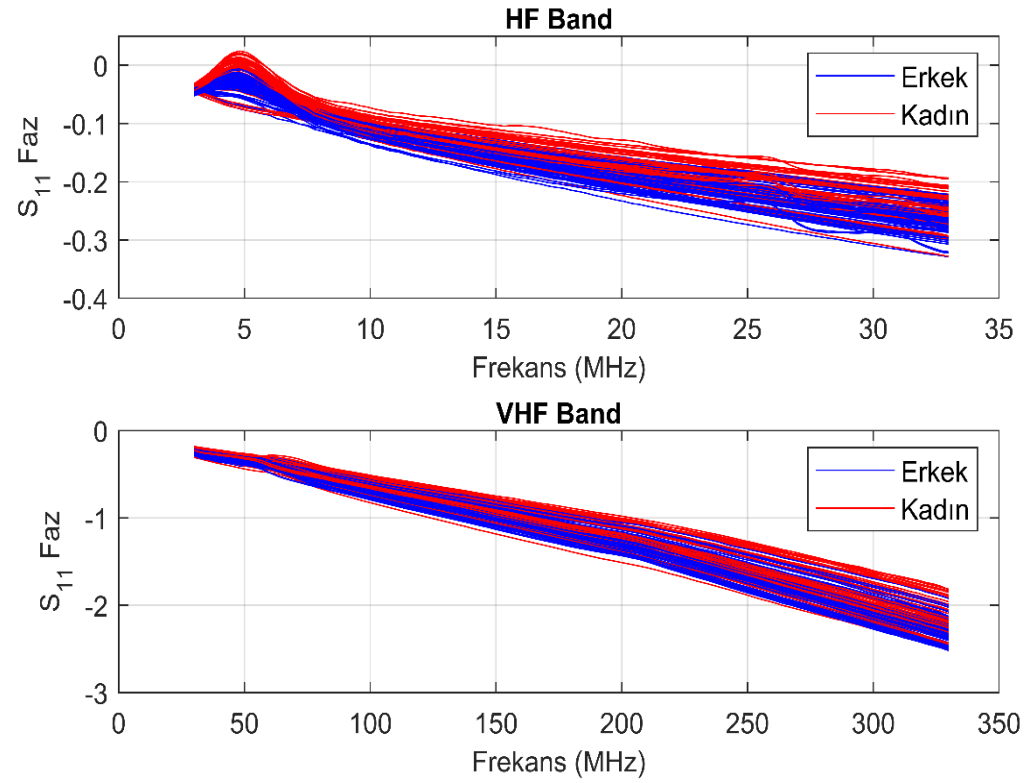
Bu açıdan da DVM yapay sinir ağı ve makine öğrenmesine kullanılan diğer sınıflandırıcılara göre üstünlük sağlamaktadır. Çünkü eğitilmiş DVM sınıflandırıcıyı yeni veriler üzerinde test etmek için kullanılan karar mekanizmasını gerçeklemek basit olduğu için bir mikrodenetleyicide kolayca çalıştırılabilir.

### 5.1. Cinsiyet Sınıflandırması için Veri Toplama

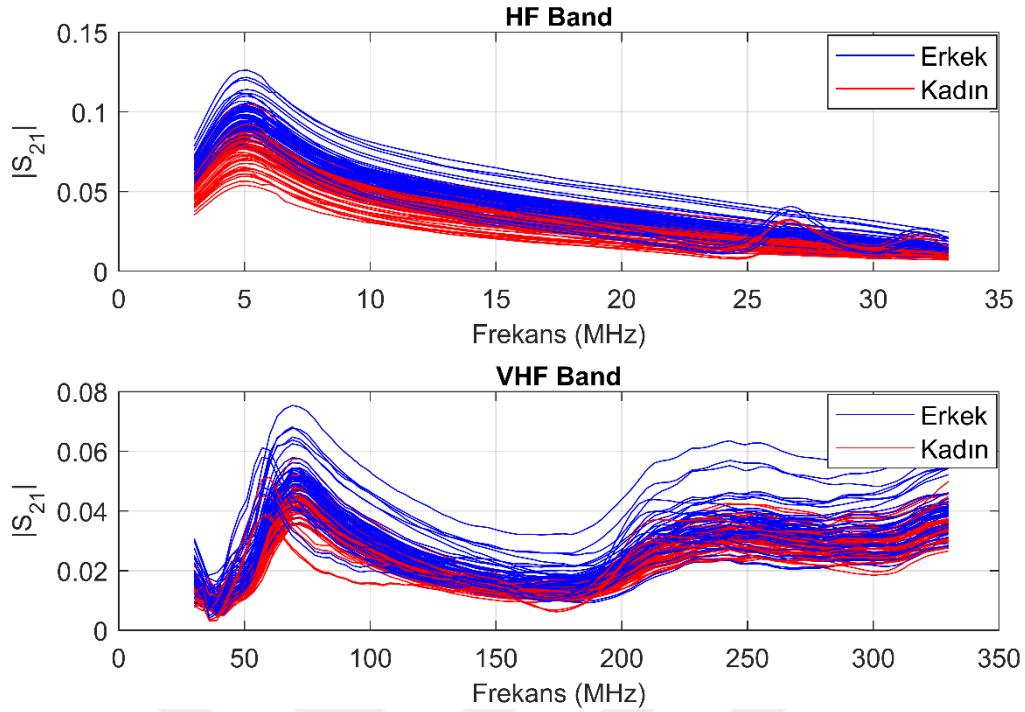
Veri toplama süreci Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilmiştir. Veri toplama, "18-28" yaş aralığındaki 98 erkek ve 28 kadın katılımcıyla gerçekleştirildi. Katılanlar arasından, 28 erkek ve 28 kadından toplanan $S_{11}$ genliği, $S_{11}$ fazı ve $S_{21}$ genlik verileri sırayla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te göstermektedir (erkek verileri mavi, kadın verileri kırmızı renklidir).




Şekil 5.1. DPY kullanılarak 56 katılımcıdan toplanan $S_{11}$ genlik verileri.




Şekil 5.2. DPY kullanılarak 56 katılımcıdan toplanan $S_{11}$ faz verileri.




Şekil 5.3. DPY kullanılarak 56 katılımcıdan toplanan $S_{21}$ genlik verileri.

Bu şekiller incelendiğinde, cinsiyet sınıfları arasında bir farklılık olduğu; kırmızı eğrilerin bir tarafta, mavi eğrilerin başka bir tarafta gruplandığı açıkça görülmektedir (özellikle $S_{11}$ genlik verilerinde dikkat çekmektedir). Şekillerin analizi, bu tez kapsamında geliştirilen DPY ile S-parametre ölçümünün cinsiyet sınıflandırmasındaki etkinliğini göstermektedir.

$S_{11}$ fazlarının tümü (radyan birimlerinde) negatif değerli olup kapasitif bir yükün varlığını göstermektedir. Kullanıcı butona dokunduğunda elektriksel açıdan kapasitif yük gibi davranmaktadır. Bu da önerilen yöntemin kapasitif bir dokunmatik algılama sistemi olarak çalıştığını göstermektedir. HF bandındaki $S_{21}$ genlik verilerinde cinsiyetler arası iyi bir ayrımın olduğunu görülmektedir. Ancak bu ayrım VHF bandının bazı frekans aralıklarında bozulmaktadır.

S-parametre ölçümlerin görsel analizi sonrası bu verilerin makine öğrenmesi algoritmaları ile hangi doğrulukla ayırt edilebileceğini tespit etmek üzere sınıflandırıcı eğitimleri yapılmıştır. Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te cinsiyet sınıfları arasında belirgin bir fark ortaya çıktığından, sınıflandırıcılar için $S_{11}$ genliği, $S_{11}$ fazı ve $S_{21}$ genliği doğrudan öznitelik olarak kullanılmıştır.

Her frekans taraması 202 ölçüm verisi içermektedir. Ölçüm verilerinin her biri, bir frekansa ilişkin $S_{11}$ genliğini, $S_{11}$ fazını ve $S_{21}$ genliğini içermektedir. Böylece her frekans taraması için 606 öznitelik oluşmaktadır. Öznitelikler bu şekilde belirlendikten sonra 28 erkek ve 28 kadın katılımcının verileriyle makine öğrenmesi sınıflandırıcıları eğitilmiştir. Eğitimde 606 özniteliğin hepsi kullanılmış olup elde edilen 5 kat çapraz doğrulama sonuçları Tablo 5.1'de listelenmektedir.

Tablo 5.1. Cinsiyet sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama)

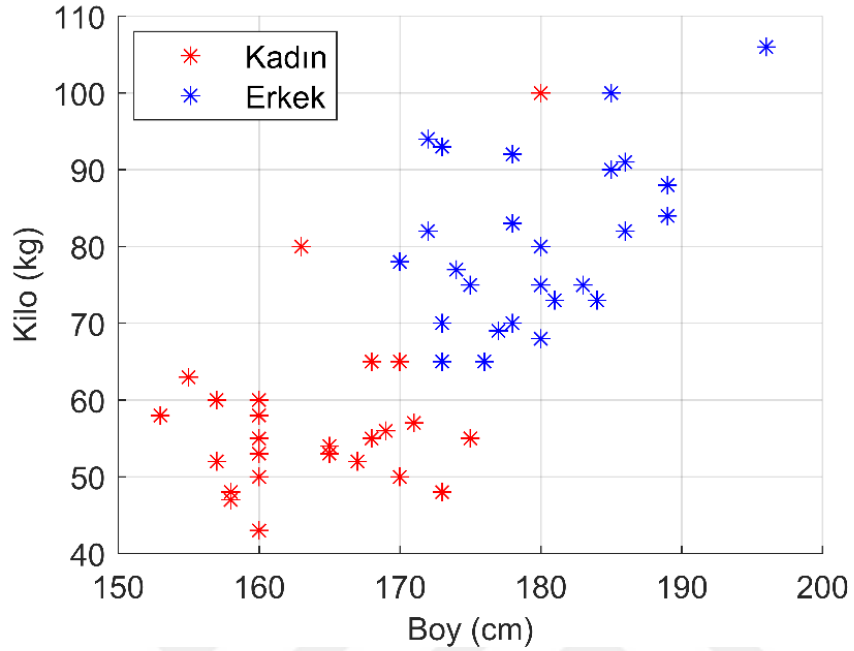
| | DPY | | FTKA | | Öznitelik seçimi yapıldıktan sonra DPY | | Öznitelik seçimi yapıldıktan sonra FTKA | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ortalama Doğruluk | Standart Sapma | Ortalama Doğruluk | Standart Sapma | Ortalama Doğruluk | Standart Sapma | Ortalama Doğruluk | Standart Sapma |
| Lineer DVM | %90,2 | %1,9 | %67,6 | %2,9 | %92,0 | %1,9 | %79,2 | %1,7 |
| Karesel DVM | %80,6 | %2,8 | %67,2 | %2,8 | %90,5 | %1,6 | %75,6 | %1,6 |
| Kübik DVM | %69,1 | %5,8 | %71,6 | %4,0 | %90,9 | %1,5 | %72,3 | %2,5 |
| Gaussian DVM | %50,3 | %2,5 | %49,5 | %0,7 | %87,6 | %2,2 | %73,3 | %2,4 |
| KNN (k=3) | %88,8 | %1,7 | %73,7 | %2,1 | %90,3 | %1,5 | %73,1 | %1,7 |
| Karar Ağacı | %87,8 | %1,7 | %66,6 | %3,8 | %86,6 | %2,5 | %70,0 | %3,0 |

## 5.2. Katılımcı Verilerinin Analizi

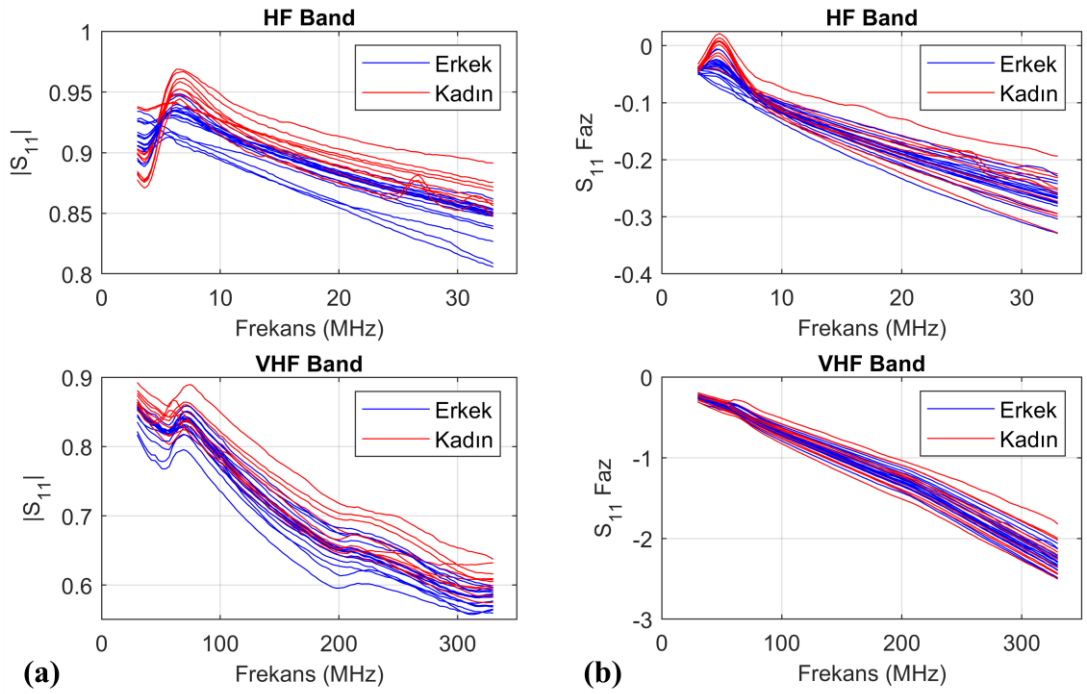
Bölüm 5.1'deki açıklanan deneyin katılımcılarının boy ve kilo bilgileri Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Erkek katılımcıların boy ve kilo değerlerinin kadınlara göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Geliştirilen DPY yaklaşımının kilo, boy veya hacim bazlı bir ayrım yapmadığını ve Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'teki S-parametre ölçümlerindeki farklılıkların katılımcıların cinsiyetinden kaynaklandığını göstermek üzere bazı ek analizler gerçekleştirilmiştir.

Aynı boydaki erkek ve kadınlardan alınan S-parametre verileri Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilmektedir, katılımcıların boylarıyla ilgili bilgiler Tablo 5.2'de verilmektedir. S-parametre verileri incelendiğinde bazı verilerin karıştığı görülmektedir ama kadın sınıfına

ait verilerin bir tarafta ve erkek sınıfına ait verilerin diğer tarafta gruplandığı ve sınıflar arası ayrımın devam ettiği anlaşılmaktadır.

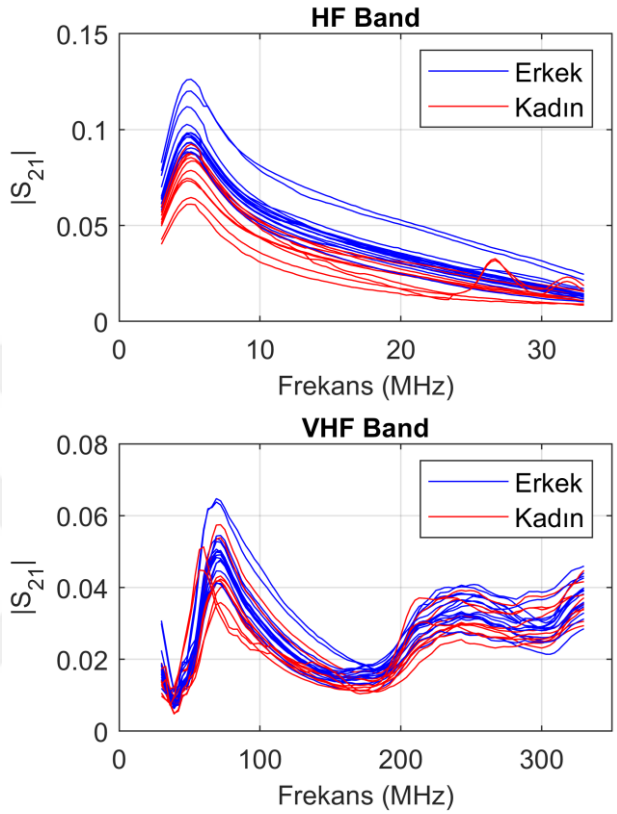



Şekil 5.4. Katılımcıların boy ve kilo verileri.




Şekil 5.5. Aynı boydaki katılımcıların: (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ faz verileri

Tablo 5.1'deki Lineer DVM ile bu veriler test edildiğinde elde edilen doğruluk %90 değerindedir. Böylece katılımcı boyunun cinsiyet sınıflandırmasını etkilemediği anlaşılmaktadır.




Şekil 5.6. Aynı boydaki katılımcıların $S_{21}$ genlik verileri

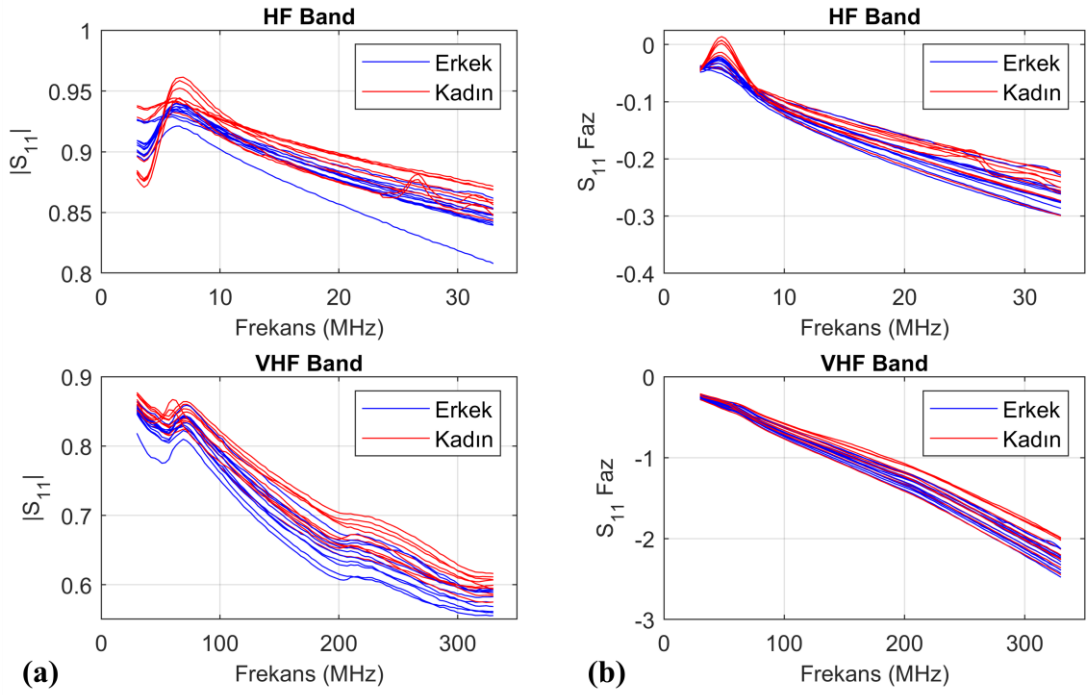
Tablo 5.2. Aynı boydaki katılımcıların bilgisi

| Katılımcı # | Cinsiyet | Boy | Kilo |
|---|---|---|---|
| 1 | Erkek | 180 | 80 |
| 2 | Erkek | 180 | 80 |
| 3 | Erkek | 180 | 68 |
| 4 | Erkek | 180 | 75 |
| 5 | Kadın | 180 | 100 |
| 6 | Erkek | 173 | 93 |
| 7 | Erkek | 173 | 70 |
| 8 | Erkek | 173 | 65 |
| 9 | Kadın | 173 | 48 |
| 10 | Erkek | 170 | 78 |
| 11 | Kadın | 170 | 65 |
| 12 | Kadın | 170 | 65 |
| 13 | Kadın | 170 | 50 |

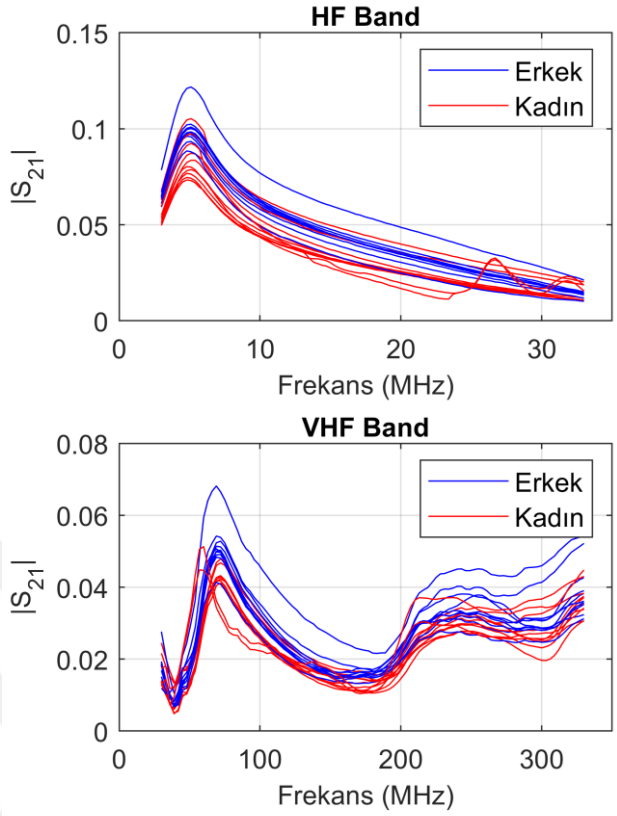
Aynı ağırlıktaki erkek ve kadın katılımcıların S-parametre verileri Şekil 5.7 ve 5.8'de gösterilmektedir. Katılımcıların kilolarıyla ilgili bilgiler Tablo 5.3'te verilmektedir. Katılımcı boylarının analizinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde bazı kadın sınıfı verilerin erkek sınıfı veriler ile karıştığı görülmektedir. Ancak her bir sınıfa ait veriler bir tarafta gruplanmakta ve sınıflar arası ayrım devam etmektedir. Tablo 5.1'deki Lineer DVM ile bu veriler test edildiğinde elde edilen doğruluk %88 değerindedir. Böylece katılımcı kilosunun cinsiyet sınıflandırmasını etkilemediği anlaşılmaktadır.

Tablo 5.3. Aynı kilodaki katılımcıların bilgisi

| Katılımcı # | Cinsiyet | Boy | Kilo |
|---|---|---|---|
| 1 | Erkek | 185 | 100 |
| 2 | Kadın | 180 | 100 |
| 3 | Erkek | 180 | 80 |
| 4 | Erkek | 180 | 80 |
| 5 | Kadın | 163 | 80 |
| 6 | Erkek | 176 | 65 |
| 7 | Erkek | 173 | 65 |
| 8 | Kadın | 168 | 65 |
| 9 | Kadın | 170 | 65 |
| 10 | Kadın | 170 | 65 |

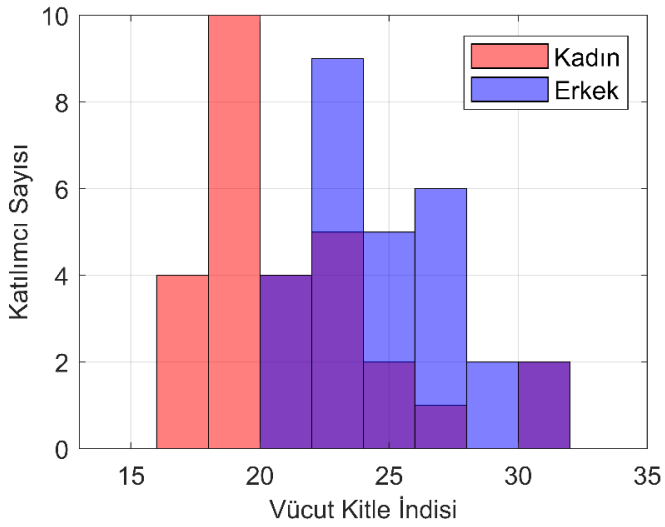



Şekil 5.7. Aynı kilodaki katılımcıların: (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ faz verileri




Şekil 5.8. Aynı kilodaki katılımcıların $S_{21}$ genlik verileri

S-parametre ölçümlerindeki farklılığın cinsiyete bağlı olduğunu kanıtlamak için ek olarak katılımcıların Vücut Kitle İndeksini (Body Mass Index BMI) hesaplanmıştır. Şekil 5.9'da BMI değer aralıklarına göre katılımcı sayısı gösterilmektedir.




Şekil 5.9. Katılımcıların BMI verileri.

Erkek ve kadın katılımcıların “25-28” ve “30-32” BMI aralıklarında kesişme bulunmaktadır. Kesişen BMI aralıklarından seçilen 14 erkek ve 14 kadın verisi kullanılarak Tablo 5.1’de verilen sınıflandırıcılar tekrar eğitilmiştir. Bu verilerin 5 katlı çapraz doğrulama sonuçları Tablo 5.4’te listelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, BMI değerleri benzer olan erkek ve kadınlarda DPY yaklaşımı ile cinsiyetler arasında farkın tespit edilebildiğini göstermektedir. Neticede S-parametre ölçümlerinin vücut büyüklüğü ile ilişkili olmadığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 5.4. Aynı BMI aralığında olan katılımcıların sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama)

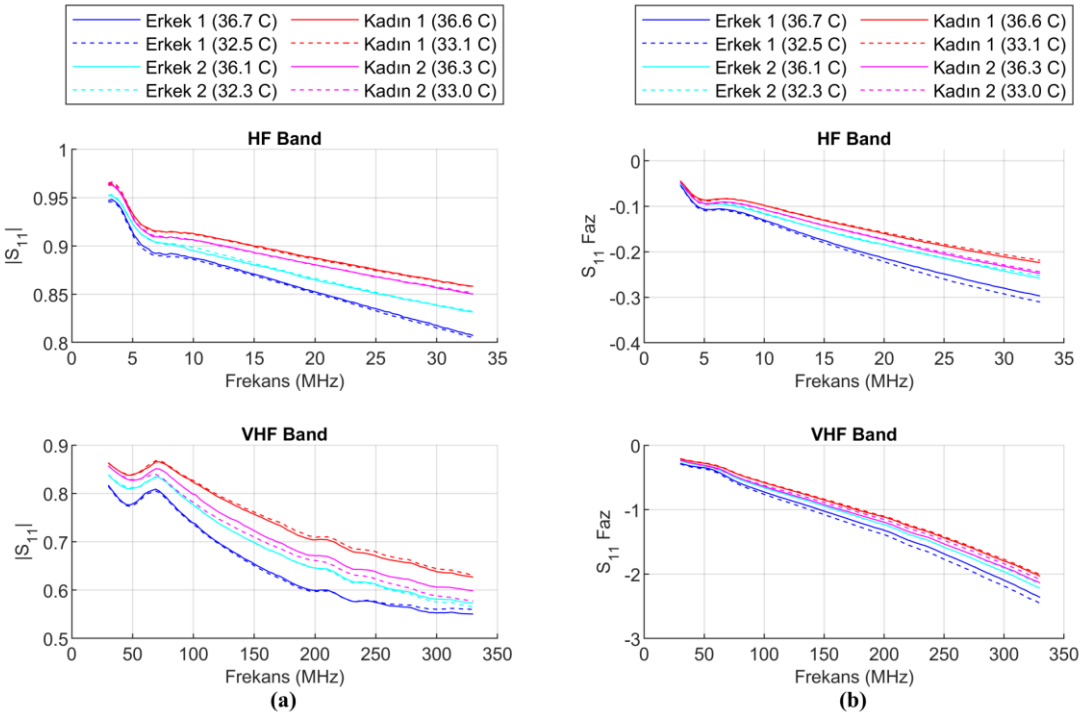
| Sınıflandırıcı | Ortalama Doğruluk | Standart Sapma |
|---|---|---|
| Lineer DVM | %90,4 | %1,7 |
| Karesel DVM | %86,4 | %3,2 |
| Kübik DVM | %79,7 | %9,0 |
| Gaussian DVM | %46,5 | %0,4 |
| KNN (k=3) | %86,1 | %2,6 |
| Karar Ağacı | %86,6 | %2,9 |

(Mayrovitz ve diğ., 2016)’daki çalışmada, önkol bölgesindeki “deriden yağa” Doku Dielektrik Sabitinin (Tissue Dielectric Constant TDC) erkekler ve kadınlar arasında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında önerilen DPY devresinde, elektriksel sinyaller hem sol hem de sağ kolun “önkol” bölgelerinden geçerek sol başparmaktan sağ başparmağa iletilmektedir. Bu nedenle, (Mayrovitz ve diğ., 2016)’da yapılan tespit ile aynı sebepten dolayı DPY devresinde S-parametresi ölçümlerinin erkekler ve kadınlar arasında farklılık gösterdiği düşünülmektedir.

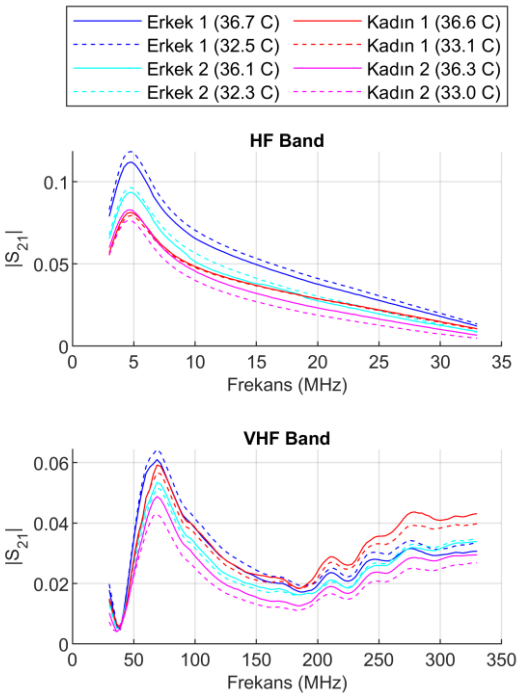
### 5.3. El Sıcaklığının Etkisi

El sıcaklığının S-parametre ölçümleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla iki erkek ve iki kadın katılımcıdan veri toplanmıştır. S-parametre verileri her katılımcıdan iki kez alınmıştır. İlk S-parametre ölçümü için öncelikle her katılımcının el sıcaklığını ölçüldü. Katılımcılara düğmelere dokunmalarını söylendi; ardından S-parametre ölçümleri ve sıcaklık değerleri kaydedildi. İkinci S-parametresi ölçümü için, her katılımcının 10 saniye boyunca buz içeren bir şişeyi dokunması istendi. Katılımcılar suyu temizlemek için elini sildikten sonra elin sıcaklığı ölçüldü. Bundan sonra, her katılımcıya düğmelere dokunmasını söylendi ve ardından S-parametresi ölçümleri ve sıcaklık değerleri

kaydedildi. Böylece, her katılımcıdan iki sıcaklık durumu için veri toplandı: biri “normal el” için diğeri “soğuk el” için.




Şekil 5.10. Farklı el sıcaklıklarında ölçülen (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ fazları.

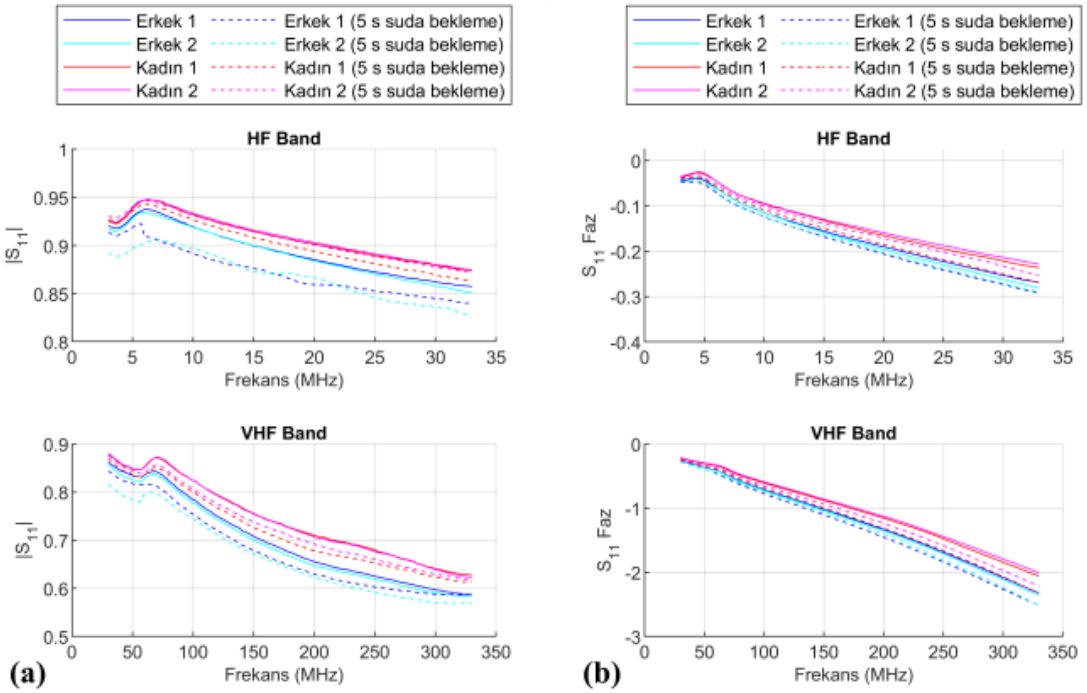



Şekil 5.11. Farklı el sıcaklıklarında ölçülen $S_{21}$ genlikleri

Şekil 5.10 ve 5.11'de toplanan $S_{11}$ genlikleri, $S_{11}$ fazları ve $S_{21}$ genlikleri sırayla gösterilmektedir. Bu şekillerin analizi, sıcaklık değişimi etkisinin HF bandındaki $S_{11}$ genliği için ihmal edilebilir ve VHF bandındaki $S_{11}$ genliği için küçük değerde olduğunu ortaya koymaktadır. $S_{11}$ fazı ve HF bandında $S_{21}$ genliği için sıcaklık değişiminin etkisi küçük değerdedir. Cinsiyet sınıfları arasındaki ayrım, $S_{11}$ genliği, $S_{11}$ fazı ve HF bandında $S_{21}$ genliği için açıkça görülmektedir. Ancak bu ayrım VHF bandındaki $S_{21}$ genliği için ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle, S-parametrelerdeki cinsiyet sınıflarına bağlı olan farklılığın el sıcaklığı farkından kaynaklı olmadığı anlaşılmaktadır.

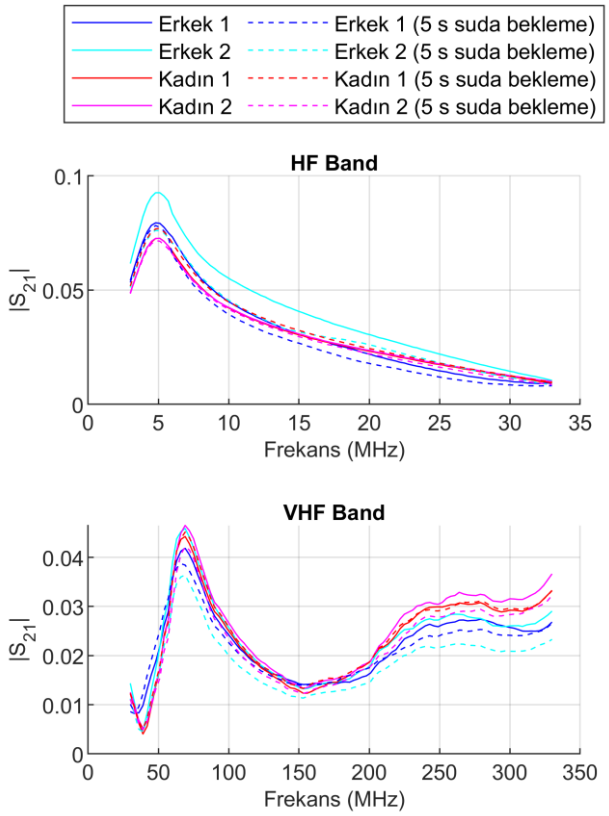
### 5.4. El Neminin Etkisi

Nemli ortamların etkisinin analiz etmek için 2 erkek ve 2 kadının katılımıyla yeni S-parametre ölçümleri yapıldı. Bu kapsamda her bir katılımcıdan 2 kez veri alındı; ilkinde her katılımcıdan direkt veri alındı, ikincisinde katılımcılardan veri almadan önce her katılımcı başparmağını 5 saniye su dolu bir bardağa batırdı sonrasında hemen butonlara dokunup veri alındı (parmaklardaki ıslaklık hiçbir şekilde silinmedi). Bu deneyde elde edilen veriler Şekil 5.12 ve 5.13'te gösterilmektedir.




Şekil 5.12. Farklı el nemi oranlarında ölçülen (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ fazları.

Ellerin nemli olması S-parametre ölçümlerini etkilemektedir. Etkilenme miktarı katılımcıdan katılımcıya değişmekle birlikte cinsiyet sınıflarının karışmasına neden olacak seviyede bir değişim oluşmamıştır.

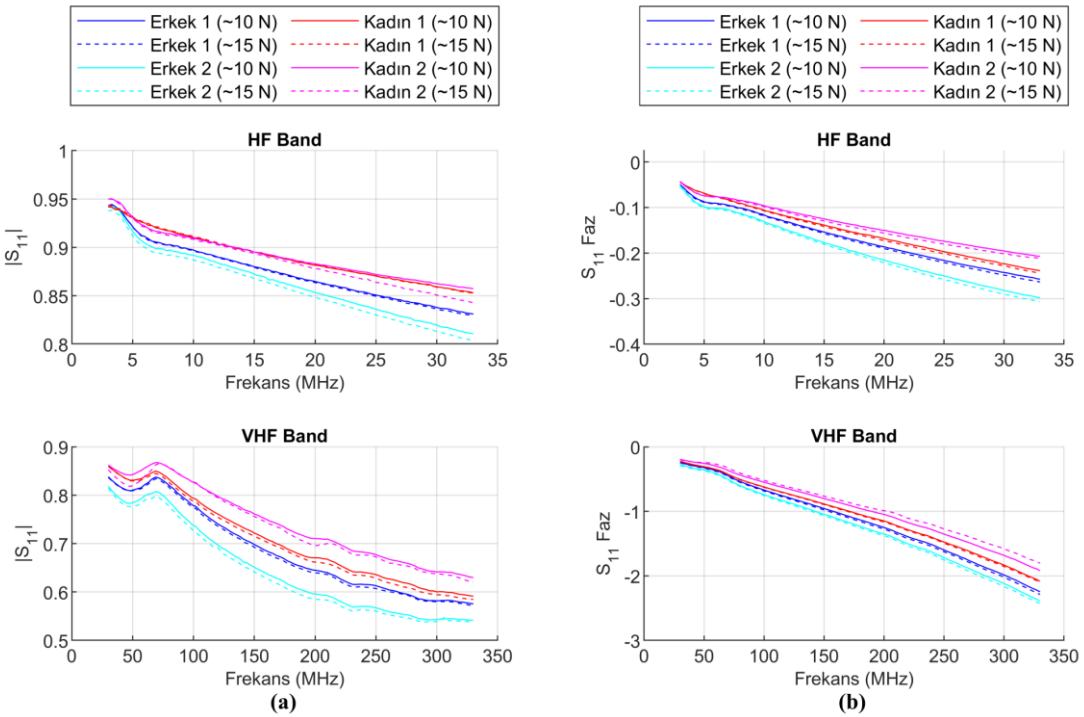



Şekil 5.13. Farklı el nemi oranlarında ölçülen $S_{21}$ genlikleri

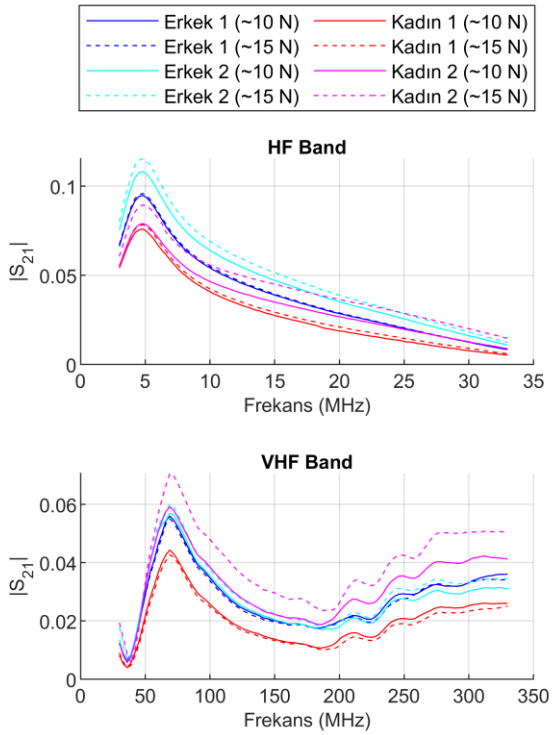
## 5.5. Dokunma Kuvvetinin Etkisi

Dokunma kuvvetinin S-parametre ölçümleri üzerindeki etkisini araştırmak için iki erkek ve iki kadın katılımcıdan veri toplanmıştır. Her katılımcıdan sol ve sağ başparmaklarıyla aynı anda butonlara dokunmaları istendi. Her katılımcı butonlara yaklaşık 10 N kuvvet uygulayarak dokundu (normal dokunma) ve ardından butonlara 15 N kuvvet uygulayarak dokundu (sert dokunma). Uygulanan kuvveti ölçmek için dokunmatik butonların altına bir ölçek (tartı) yerleştirildi.

Şekil 5.14 ve 5.15'te sırayla bu süreçte toplanan $S_{11}$ genlikleri, $S_{11}$ fazları ve $S_{21}$ genlikleri gösterilmektedir.




Şekil 5.14. Farklı dokunma kuvvetlerinde (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ fazları.




Şekil 5.15. Farklı dokunma kuvvetlerinde $S_{11}$ genlikleri.

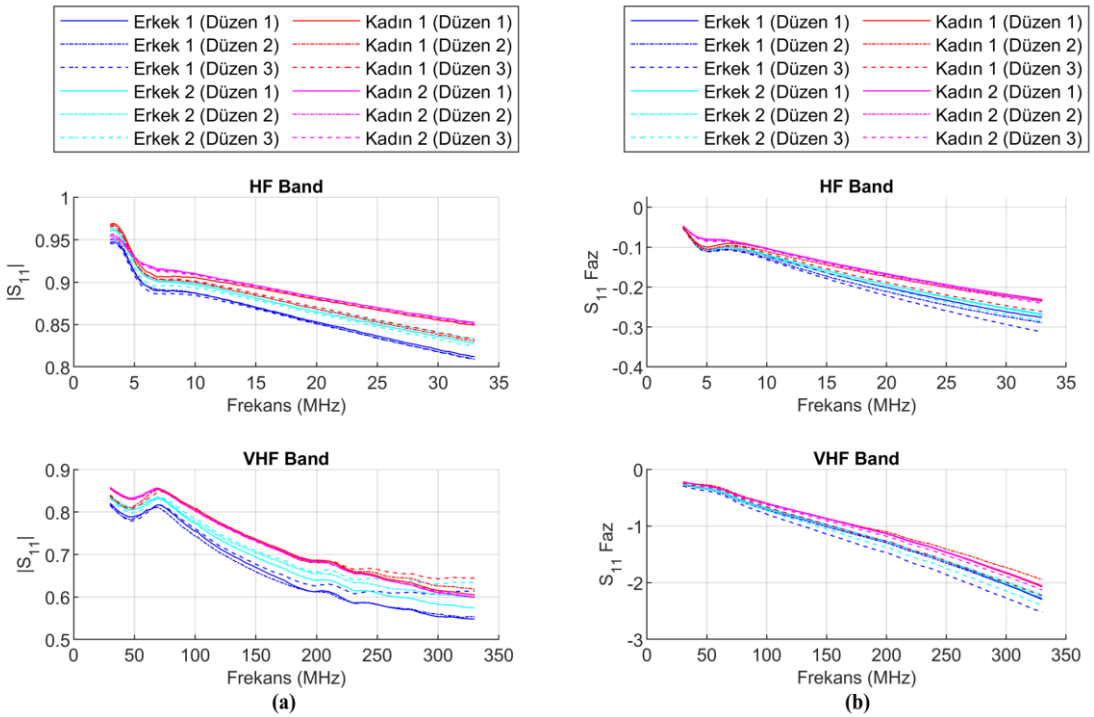
Şekil 5.14'ün analizi, $S_{11}$ genlik ve fazının dokunma kuvvetinden hafifçe etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu etkinin miktarı bir kullanıcıdan diğerine değişse de cinsiyet sınıfları arasındaki farklılık etkilenmemektedir. Şekil 5.15'in analizi, dokunma kuvveti etkisinin $S_{21}$ genliğinde, özellikle VHF bandında daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. "5.1. Cinsiyet Sınıflandırması için Veri Toplama" bölümünde, cinsiyet sınıfları arasındaki farklılığın $S_{21}$ genliğinin bazı frekans aralıklarında, özellikle VHF bandında bozulduğunu açıklanmıştı. Şekil 5.13'te elde edilen sonuçlar bu açıklamayla örtüşmektedir.

$S_{11}$ parametresi ve "3-10" MHz frekans aralığında $S_{21}$ genliği butona uygulanan dokunma kuvveti nedeniyle dikkate değer bir değişime uğramamaktadır. Maksimum sınıflandırma doğruluğunu elde etmek için Tablo 5.5'te listelenen öznitelikler arasından yalnızca son iki öznitelik dokunma kuvvetinden ciddi şekilde etkilenmektedir (son iki öznitelik $S_{21}$ genliğinin "3-10" MHz aralığında değildir). Bu sebeple, dokunma kuvvetindeki herhangi bir farkın cinsiyetler arasında girişime neden olmayacağı sonucuna varılmıştır.

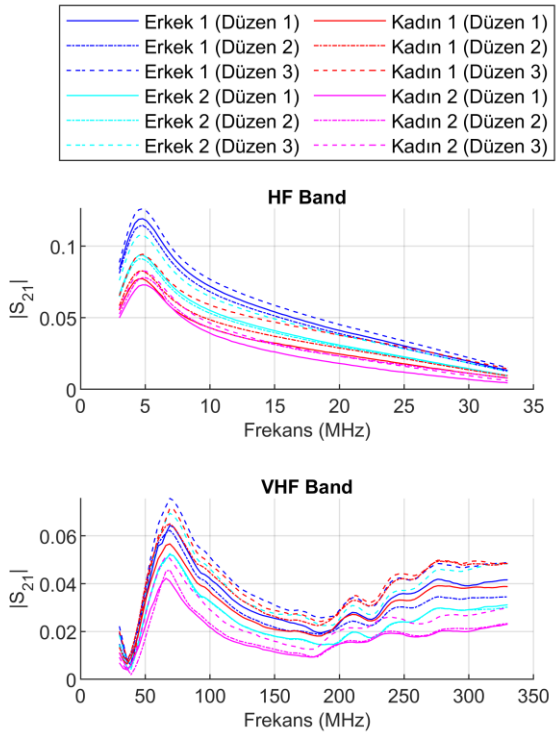
Başka bir deyimle, bu sert dokunan (15 N) bir kadının erkek olarak sınıflandırılmayacağı anlamına gelmektedir. Bu çerçevede DPY'nin "4.4. Dokunma Algılama için Yeni Yöntem Geliştirme (Düzlemsel Prob Yöntemi)" bölümünde anlatılan yeni yöntemin sağlaması gereken özelliklerden "Dokunma kuvvetinden etkilenmeme" özelliğini sınıflar arası karışıklığa neden olmayacak seviyede sağladığı değerlendirilmektedir.

### 5.6. Dokunmatik Buton Yeri ve Boyutunun Etkisi

Çeşitli buton düzenlemelerinin S-parametre ölçümleri üzerindeki etkisini araştırmak için, buton alanı ve butonlar arasındaki mesafe farklı olan iki adet yeni dokunmatik buton kartı tasarlanmıştır. Yeni buton kartlarının PCB boyutu ve malzemesi Şekil 4.17'dekiyle aynıdır. İlk yeni kartta buton alanı Şekil 4.17'dekiyle aynıdır (7 mm × 7 mm), ancak butonlar arasındaki mesafe 70 mm'dir. İkinci yeni kartta butonlar arasındaki mesafe 50 mm'dir, ancak buton alanı 10 mm × 10 mm'dir. Şekil 4.17'deki dokunmatik buton düzenlemesine "Düzen 1" adı verildi. İlk yeni karttaki buton düzenlemesine "Düzen 2" ve ikinci yeni karttaki düzenlemesine "Düzen 3" adı verildi. İki erkek ve iki kadın katılımcıdan S-parametre verileri alındı.




Şekil 5.16. Farklı buton düzenlerinde (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ fazları.




Şekil 5.17. Farklı buton düzenlerinde $S_{21}$ genlikleri.

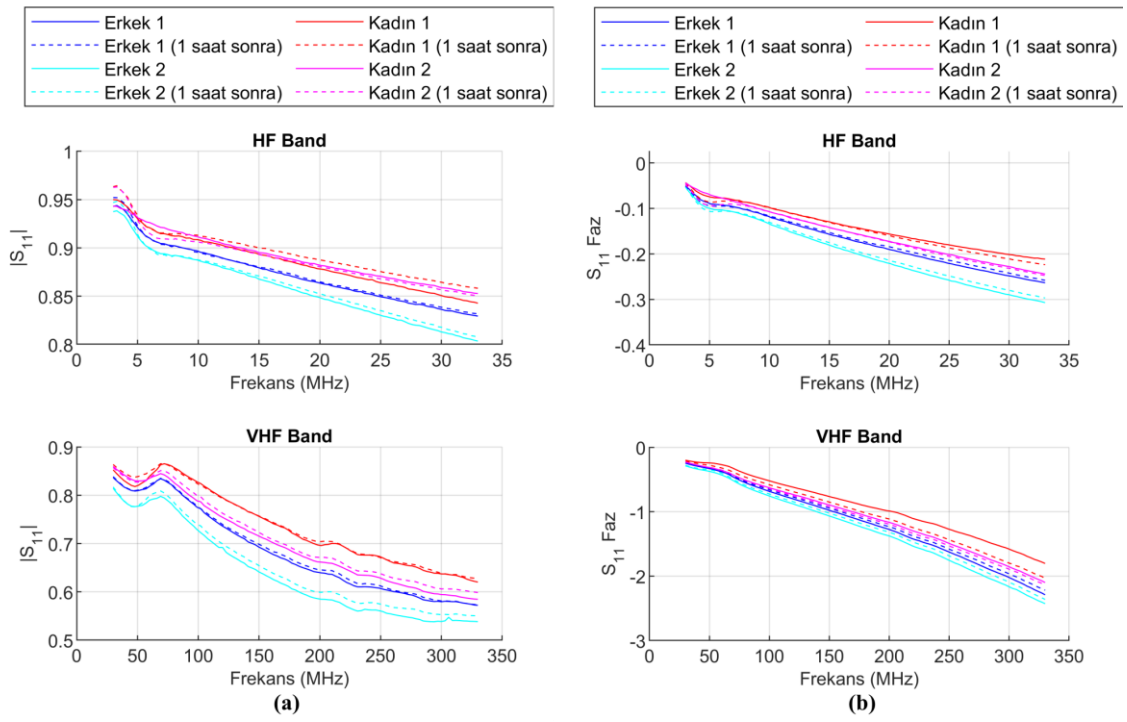
Şekil 5.16 ve 5.17'de toplanan $S_{11}$ genlikleri, $S_{11}$ fazları ve $S_{21}$ genlikleri sırasıyla gösterilmektedir. S-parametre verilerinin analizi, farklı düğme düzenlemelerinin S-parametre ölçümlerini etkilediğini ortaya koymaktadır (özellikle "Düzen 3"te). Bu etkinin büyüklüğü bir kullanıcıdan diğerine değişmektedir.

Cinsiyetler arasındaki farklılık bütün konfigürasyonlarda $S_{11}$ genliğinde ve $S_{11}$ fazında varlığını sürdürmektedir. Ancak $S_{21}$ genliğinin VHF bandında cinsiyet sınıfları arasında belirgin bir karışıklık bulunmaktadır.

### 5.7. S-Parametre Ölçümlerinin Tutarlılığı

Farklı zamanlarda dokunmanın etkisini açıklamak için tezde ek bir deney daha yapılmıştır. Bu deneyde iki erkek ve iki kadın katılımcıdan veri alınmış olup her katılımcıya sol ve sağ baş parmaklarıyla aynı anda butonlara dokunmaları talimatı verilmiştir.

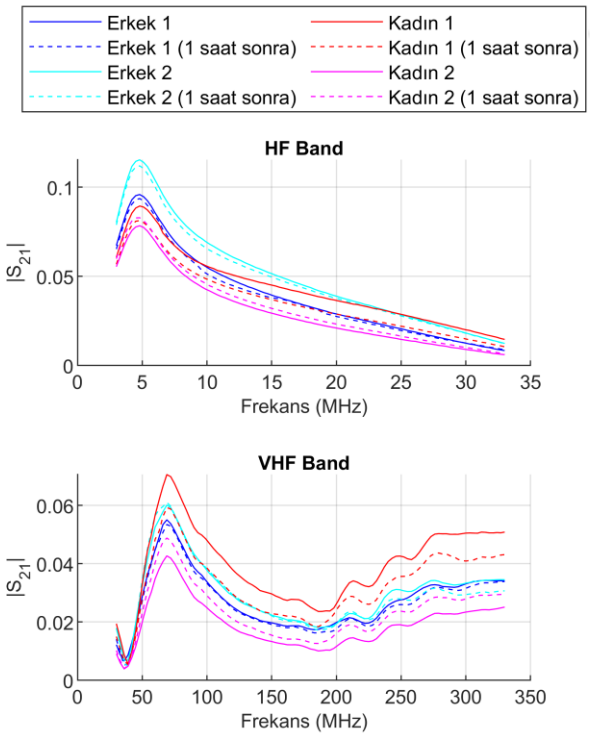
Bir saat sonra, aynı katılımcılardan aynı koşullar altında (aynı sıcaklık ve aynı 10 N dokunma kuvveti) tekrar veri alınmıştır.




Şekil 5.18. Dokunma zamanına bağlı (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ fazları

Şekil 5.18 ve 5.19'da farklı zamanlarda dokunmaya ilişkin S-parametre ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.18'deki sonuçlar, $S_{11}$ genliği ve fazının dokunma zamanına bağlı olarak hafifçe değiştiğini göstermektedir. Şekil 5.19'daki sonuçlar, dokunma zamanı etkisinin $S_{21}$ genliği ölçümlerinde (özellikle VHF bandında) daha belirgin olduğunu göstermektedir. Dokunma kuvveti etkisinde olduğu gibi, aynı kişiler için S-parametre ölçümlerinin dokunma zamanına bağlı olarak hafifçe değiştiği sonucuna varılmaktadır. Yine de iki cinsiyet grubuna ait S-parametre ölçümleri arasındaki ayrım devam etmektedir.

Ayrıca, bu tez kapsamında önerilen DPY yaklaşımındaki S-parametre ölçümleri kullanıcının cinsiyetini tanımayı amaçlamaktadır. Cinsiyet bir Yumuşak Biyometrik (Soft Biometric) özelliktir. Yumuşak biyometrikleri çıkarmak için kullanılan veriler, Sert Biyometrik (Hard Biometric) özellikleri kullanan kişi tanımlama probleminin aksine, her zaman aynı kişi için eşleştirilmesi gerekmemektedir. Sert Biyometrik özellikler benzersiz olmalı, parmak izleri ve iris gibi zamanla değişmemeliyken Yumuşak Biyometrik özelliklerin bunu sağlamasına gerek yoktur.




Şekil 5.19. Dokunma zamanına bağlı $S_{21}$ genlikleri

### 5.8. Öznitelik Seçimi ve Sınıflandırıcı Eğitimi

DPY devresinde VNA kullanılarak her bir frekans taramasında toplam 202 noktalı S-parametre ölçümü yapılmaktadır. S-parametre genlik ve fazı sınıflandırıcı eğitiminde kullanılabilecek özniteliklerdir.

Yapılan her bir ölçüm noktası farklı bir frekans değerine denk gelmekte ve kendi içinde iki adet S-parametre ölçümü içermektedir ($S_{11}$ ve $S_{21}$). $S_{11}$ ölçümü genlik ve faz bilgisi içerirken, $S_{21}$ ölçümü sadece genlik bilgisi içermektedir. Böylece, her bir frekans taramasından 202 adet $S_{11}$ genliği, 202 adet $S_{11}$ fazı ve 202 adet $S_{21}$ genliği ile toplamda 606 adet öznitelik elde edilmektedir.

Tablo 5.5. İleri yönlü öznitelik seçimiyle belirlenen öznitelikler (cinsiyet sınıflandırması)

| Öznitelik Sırası | Frekans (MHz) | Ölçüm Türü | %95'lik İstatiksel Güç için Gereken Katılımcı Sayısı |
|---|---|---|---|
| 1 | 15,9 | $S_{11}$ genliği | 14 |
| 2 | 30,6 | $S_{11}$ genliği | 15 |
| 3 | 75 | $S_{11}$ genliği | 33 |
| 4 | 156 | $S_{11}$ genliği | 21 |
| 5 | 330 | $S_{11}$ genliği | 13 |
| 6 | 3,6 | $S_{11}$ fazı | 38 |
| 7 | 6,6 | $S_{11}$ fazı | 29 |
| 8 | 23,7 | $S_{11}$ fazı | 54 |
| 9 | 3 | $S_{21}$ genliği | 12 |
| 10 | 5,4 | $S_{21}$ genliği | 14 |
| 11 | 7,8 | $S_{21}$ genliği | 15 |
| 12 | 30,6 | $S_{21}$ genliği | 45 |
| 13 | 63 | $S_{21}$ genliği | 21 |

Tablo 5.6. İleri yönlü öznitelik seçimiyle belirlenen öznitelikler (yaş grubu sınıflandırması)

| Öznitelik Sırası | Frekans (MHz) | Ölçüm Türü |
|---|---|---|
| 1 | 180 | $S_{11}$ genliği |
| 2 | 3 | $S_{11}$ fazı |
| 3 | 3.6 | $S_{11}$ fazı |
| 4 | 42 | $S_{21}$ genliği |
| 5 | 54 | $S_{21}$ genliği |
| 6 | 144 | $S_{21}$ genliği |

S-parametre ölçüm noktalarının frekansları farklı olduğu için art arda yapılan ölçümler birbirini etkilememektedir. Ek olarak, cinsiyet veya yaş grubuna göre S-parametre örüntüsünde farklılık bulunmamaktadır. Farklı olan kısım S-parametre genlik veya fazıdır. Bu iki sebepten dolayı yeni öznitelikler oluşturma amacıyla S-parametre ölçüm noktalarından istatistiksel değerler hesaplanmayıp önceki paragrafta anlatılan 606 adet öznitelik arasından seçilen bazı öznitelikler sınıflandırıcı eğitiminde kullanılmıştır.

Bu çerçevede, cinsiyet sınıflandırması (28 erkek ile 28 kadın katılımcı) ve yaş grubu sınıflandırması (15 çocuk ile 14 yetişkin katılımcı) amacıyla toplanan verilere VNA kalibrasyonu yapılmıştır. Sonrasında Lineer DVM sınıflandırıcı kullanılarak ileri yönlü öznitelik seçimi gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da sırayla cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırması için seçilen öznitelikler gösterilmektedir. Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'daki özniteliklerle sınıflandırıcılar eğitildikten sonra elde edilen ortalama sınıflandırma doğrulukları sırayla Tablo 5.1 ve Tablo 5.7'de gösterilmektedir. Bu aşamada Lineer DVM sınıflandırıcının cinsiyet için %92,9 ve yaş grubu için %89,7'lük maksimum doğruluk sağladığı görülmüştür.

Tablo 5.7. Yaş grubu sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama)

| | **DPY** | | **Öznitelik seçiminden sonra DPY** | |
|---|---|---|---|---|
| | **Ortalama Doğruluk** | **Standart Sapma** | **Ortalama Doğruluk** | **Standart Sapma** |
| Lineer DVM | %78,8 | %5,1 | %85,2 | %3,4 |
| Karesel DVM | %75,6 | %4,9 | %78,8 | %4,5 |
| Kübik DVM | %71,0 | %6,0 | %72,0 | %6,8 |
| Gaussian DVM | %75,2 | %4,2 | %81,8 | %3,7 |
| KNN (k=3) | %69,1 | %3,9 | %85,4 | %2,1 |
| Karar Ağacı | %74,2 | %6,5 | %77,7 | %7,6 |

Tablo 5.8 ve Tablo 5.9'da sırayla cinsiyet ve yaş grubu için Lineer DVM sınıflandırıcının karışıklık matrisi verilmektedir. Sonuçlara bakıldığında, sınıfların dengeli bir şekilde ayırt edildiği anlaşılmaktadır (hatalı tahminler belirli bir sınıfta yoğunlaşmamıştır).

Tablo 5.8. Cinsiyet sınıflandırması için en yüksek doğruluğu veren sınıflandırıcının (Lineer DVM) karışıklık matrisi

| | **Kadın (Tahmin)** | **Erkek (Tahmin)** |
|---|---|---|
| **Kadın (Gerçek)** | 52 | 4 |
| **Erkek (Gerçek)** | 4 | 52 |

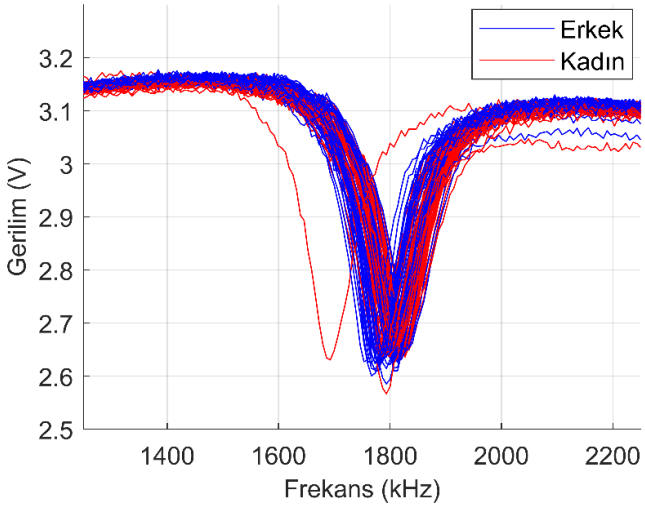
Tablo 5.9. Yaş grubu sınıflandırması için en yüksek doğruluğu veren sınıflandırıcının (Lineer DVM) karışıklık matrisi

| | **Yetişkin (Tahmin)** | **Çocuk (Tahmin)** |
|---|---|---|
| **Yetişkin (Gerçek)** | 13 | 1 |
| **Çocuk (Gerçek)** | 2 | 13 |

Katılımcı sayısının yeterli olup olmadığı anlamak için Eşitlik (4.4) kullanılarak istatistiksel güç analizi yapıldı. Cinsiyet sınıflandırıcısı eğitmek seçilen özniteliklere için %95'lik istatistiksel gücü sağlayacak şekilde hesaplanan katılımcı sayısı Tablo 5.5'te listelenmektedir. En büyük katılımcı sayası gerektiren öznitelik 23,7 MHz frekansındaki $S_{11}$ fazıdır ve gereken katılımcı sayısı 54 olarak elde edilmiştir. Veri toplamaya toplam 56 kişi katıldığı için %95 seviyesinde istatistiksel güç elde edilmektedir. Yaş grubu ile ilgili istatistiksel güç analizi "5.11. Farklı İstatiksel Güç Seviyeleri için Gerekli Katılımcı Sayısı (Yaş Grubu)" bölümünde anlatılmıştır.

### 5.9. DPY ile FTKA Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

DPY ile FTKA yaklaşımların cinsiyet sınıflandırması performansının karşılaştırılması için DPY deneyine katılan aynı katılımcılardan FTKA devresiyle de veri alınmıştır. Bu kapsamda, frekans taraması 1250 kHz'den başlayıp ve 150 adımda 2250 kHz'de bitecek şekilde ayarlandı. Katılımcılardan veri almak için 5 mm × 5 mm alana sahip olan iletken dokunmatik buton kullanıldı. Bu aşamada toplanan FTKA filtre yanıtları (kapasitif profiller) Şekil 5.20'de gösterilmektedir.




Şekil 5.20. FTKA devresiyle toplanan filtre yanıtları.

İlk etapta FTKA yaklaşımı ile elde edilen kapasitif profilin 150 adımının tamamı öznitelik vektörü olarak sınıflandırıcı eğitiminde kullanılmıştır. Sonrasında öznitelik seçimi yapılarak Tablo 5.10'daki öznitelikler elde edilmiştir. DPY için kullanılan aynı sınıflandırıcılar ile eğitim yapıldıktan sonra elde edilen 5 katlı çapraz doğrulama sonuçları Tablo 5.1'de listelenmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, bu tez kapsamında önerilen DPY devresinin (Sato ve diğ., 2012)'te önerilen yöntemi temel alan FTKA devresine göre sınıflandırma doğruluğunda %10'dan fazla artış sağladığı anlaşılmaktadır.

Tablo 5.10. Cinsiyet sınıflandırması için ileri yönlü öznitelik seçimiyle belirlenen öznitelikler (FTKA)

| Öznitelik Sırası | Frekans (kHz) | Ölçüm Türü |
|---|---|---|
| 1 | 1484 | Filtre çıkışının genliği |
| 2 | 1525 | Filtre çıkışının genliği |
| 3 | 1921 | Filtre çıkışının genliği |

Ortam ve davranış şeklinden etkilenme sebebiyle FTKA devresiyle Cinsiyet sınıflandırması yapmanın zorluğu önceki alt bölümlerde anlatılmıştı. Çocuklardan veri toplama zor olduğundan FTKA devresiyle yaş grubu için veri toplama yapılmamıştır.

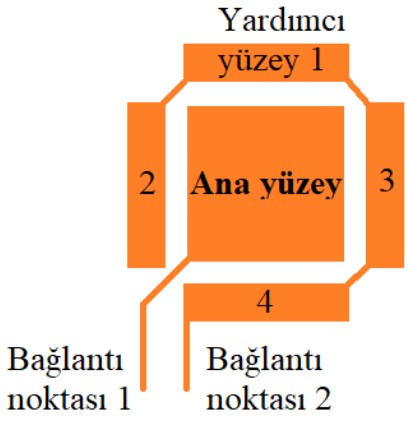
## 5.10. FTKA ile Dokunma Şekli Algılama

Çocuk gelişimiyle ilgili (Tolosana ve diğ., 2022)'de "Piaget" teorisine göre çocukların gelişiminde 4 seviye olduğu anlatılmıştır. Çocukların yaşı ilerledikçe soyut düşünme ve nöromotor becerileri artmaktadır. Küçük çocuklardan nöromotor becerisi gerektiren bir eylem yapmaları istenildiğinde düzgün yapmamaktalar. Örnek olarak bir butona basmak istediklerinde butonun tam üstüne değil de yanlarına basabilmekteler.

Bu sebeple, FTKA devresiyle dokunma şiddetini ve yanlış dokunma eylemlerini algılama yaş grubunu belirlemede yararlı bir yöntem olmasa da yaş grubu tespitinin amaçlarından biri olan "çocukların bazı aletleri çalıştırmalarını engelleme" için kullanılabilmektedir.

FTKA yaklaşımı ile yanlış dokunma eylemini tespit etmek için kullanıcının butonun neresine dokunduğunu belirlemek gerekmektedir. Kullanıcı, butonun üstüne normal bir basma kuvvetiyle bastığında doğru bir dokunma eylemi yapılmış olur. Kullanıcı butona çok hafif veya butona tam ortadan değil de yanlarından dokunduğunda yanlış dokunma

yapmış olur. Bu algılamaları yapabilmek için dokunmatik butonun Şekil 5.21'deki gibi iki parçadan oluşması gerekmektedir. Ek olarak kesişim alanına göre filtre yanıtında farklılık olması için buton ~50µm kalınlığında yalıtkan PVC bant ile kaplandı (iletken buton dokunma şiddetinde etkilenmemektedir).




Şekil 5.21. Yanlış dokunmaları tespit etmek amacıyla yapılan buton tasarımı

Şekil 5.21'deki butonu oluşturan ilk parça "Ana yüzey" olarak adlandırılmış olup kullanıcın buraya dokunması gerekmektedir. Ana yüzey 1 cm × 1 cm alana sahiptir. Dokunma şiddetini algılayabilmek için alanı özellikle daha büyük yapılmıştır. Dokunma şiddeti arttıkça parmakla butonun kesiştiği alan artacaktır. Küçük alana sahip buton kullanıldığında az bir dokunma kuvveti bile basan parmağın butonunu tamamını kaplamasına neden olmakta ve dokunma şiddetine göre değişim olmamaktadır. Butonun alanı büyük seçildiğinde dokunma şiddetine göre parmakla butonun kesişen alanı değişecektir. Hafif dokunmada küçük bir kesişim alanı oluşurken kuvvetli dokunmada daha büyük bir kesişim alanı olacaktır. Şekil 5.21'deki butonu oluşturan ikinci parça "yardımcı yüzeyler" olarak adlandırılmıştır. Yardımcı yüzeyler yine bir dokunma olup olmadığı algılamaktadır. Ama "dokunma şiddetini algılamayı" ana yüzeyin performansında yapmasına gerek yoktur. Bu sebeple küçük alana sahip 4 adet iletken yüzeyin bağlanmasıyla oluşmaktadır. Ana yüzeyde olduğu gibi dokunma şiddetine göre parmakla butonun kesiştiği alan değiştiği için dokunma şiddetini algılamaktadır.

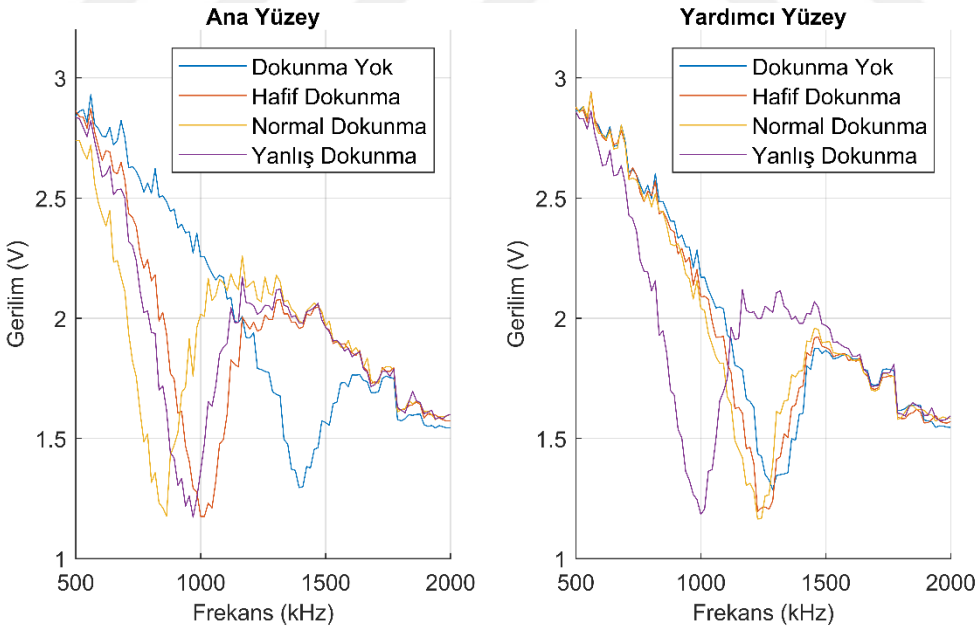
Şekil 5.21'deki butonun ana yüzeyi ve yardımcı yüzeyi için ayrı ayrı frekans taraması yapılmaktadır. Hangi yüzeyi frekans taraması yapılacağı bir analog çoklayıcı entegresiyle

seçilmektedir. Böylece her bir buton için iki filtre yanıtı elde edilmektedir. Yapılan frekans taramasıyla ilgili bilgiler Tablo 5.11'de verilmektedir.

Tablo 5.11. Yanlış dokunmaları algılama için tasarlanan butona uygulanan Frekans taramasının bilgileri.

| | |
|---|---|
| **Başlama frekansı** | 500 kHz |
| **Durma frekansı** | 2000 kHz |
| **Adım sayısı** | 100 adım |
| **Adım başı frekans artışı** | 15 kHz |
| **Tarama süresi** | 100 ms |

Kullanıcı bilinçli dokunma yaptığında butonun ana yüzeyi kuvvetli dokunma tespit edecek, yardımcı yüzeyler ise ya hafif dokunma algılayacaktır ya da hiçbir dokunma algılamayacaktır. Yanlış bir dokunma olduğunda ana yüzey hafif bir dokunma algılarken yardımcı yüzeyler daha şiddetli bir dokunma algılayacaktır. Yanlış dokunma algılama mantığı vücut fiziğine bağlı değil de dokunma davranışlarına bağlı bir kurala göre yapıldığı için veri toplamaya katılan kişilerin cinsiyet ve yaş grubu önemli değildir. Veri toplamada katılımcıların istenilen davranışları yapmaları yeterlidir.




Şekil 5.22. FTKA devresiyle toplanan dokunma davranışlarının filtre yanıtları

Bu deney kapsamında veri toplamaya 6 kişi katılmış olup kullanıcıların dört farklı dokunma davranışının tespiti hedeflenmiştir. Bu davranışlar dokunmama, hafif dokunma,

dokunma ve yanlış dokunma olarak belirlenmiştir. Bu sınıflara ait detaylar aşağıda verilmiştir;

- Dokunmama sınıfı butona hiç dokunma olmadığı durumu veya dokunan kişinin eli dokunma butonuna 1 cm'den uzak olduğu durumu ifade etmektedir.
- Hafif dokunma sınıfı kullanıcının parmağı ana dokunma yüzeyine hafifçe temas ettiği ve yardımcı yüzeylere hiç temas etmediği davranış şeklini ifade etmektedir.
- Dokunma sınıfı kullanıcının parmağı dokunma yüzeyine iyice dokunduğu ve yardımcı yüzeylere hiç dokunmadığı davranış şeklini ifade etmektedir.
- Yanlış dokunma sınıfı kullanıcının parmağı hem ana yüzeye hem de yardımcı yüzeylerden en az birine kısmen dokunduğu davranış şeklini ifade etmektedir.

Tablo 5.12. Davranış şekli algılamanın sınıflandırma sonuçları

| **Sınıflandırıcı** | **5-katlı çapraz doğrulama** |
|---|---|
| Lineer DVM | %90,86 |
| Karesel DVM | %92,62 |
| Kübik DVM | %93,31 |
| KNN (k=1) | %95,18 |
| KNN (k=10) | %92,49 |

Her bir dokunma davranışı için örnek filtre yanıtı Şekil 5.22'de gösterilmektedir. Sınıflandırıcı eğitimi için her bir yüzeye ait filtre yanıtının minimum genliği ve minimum genliğe denk gelen frekans değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 5.12'de gösterilmekte olup dokunma davranışlarının düzgün bir şekilde (%95 üzeri bir performans ile) ayırt edilebildiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5.21'deki buton tasarımını FTKA devresinde kullanma yaş grubu sınıflandırmasını gerçekleştirmemektedir. Ancak bir elektronik cihazın dokunma davranışı algılayan buton içermesi, çocuk veya bilinçsiz kullanıcıların cihazı çalıştırmasını engelleme için faydalı olabilir. Bu yaklaşım dokunmatik ekranlarla yapılan davranış şekli algılama yöntemlerine göre daha basit bir devre ve daha az maliyetli bir çözüm sunmaktadır.

### 5.11. Farklı İstatiksel Güç Seviyeleri için Gerekli Katılımcı Sayısı (Yaş Grubu)

Yaş grubu sınıflandırması için veri toplama çocuklardan veri almayı gerektirdiğinden hem yeterli sayıda katılımcı bulma hem de etik açıdan zordur. Bu sebeple 14 yetişkin ile 15

çocuğun katılımıyla sadece bir kez veri toplama yapılmıştır. Katılımcı sayısı, kullanılan öznitelikler ve belirlenen istatistiksel güce bağlı olduğundan en yüksek sınıflandırma doğruluğunu verecek şekilde seçilen öznitelikler için Eşitlik (4.4)'e göre hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5.13'te listelenmiştir.

Eşitlik (4.4)'deki parametreler kullanılacak özniteliğe göre değiştiğinden katılımcı sayısı da özniteliğe göre değişecektir. Sınıflandırıcı eğitiminde kullanılacak öznitelik vektörünün içerisinde en çok katılımcıyı gerektiren öznitelik toplam katılımcı sayısını belirlemektedir.

Tablo 5.13. İleri öznitelik seçimi yöntemiyle belirlenen öznitelikler (yaş grubu)

| **Öznitelik Sırası** | **Frekans (MHz)** | **Ölçüm Türü** | **Katılımcı Sayısı (istatistiksel güç = %95)** | **Katılımcı Sayısı (istatistiksel güç = %80)** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 180 | $S_{11}$ genliği | 54 | 33 |
| 2 | 3 | $S_{11}$ fazı | 72 | 44 |
| 3 | 3.6 | $S_{11}$ fazı | 97 | 59 |
| 4 | 42 | $S_{21}$ genliği | 138 | 83 |
| 5 | 54 | $S_{21}$ genliği | 48 | 29 |
| 6 | 144 | $S_{21}$ genliği | 547 | 330 |

Tablo 5.13 incelendiğinde, %95'lik istatistiksel güç için katılımcı sayısı veri toplamaya katılan toplam katılımcı sayısından oldukça fazladır. Bu sebeple bir deney geçerli olması için kabul edilebilecek en düşük istatistiksel güç seviyesi olan %80 için gerekli katılımcı sayısı hesaplandı ve veri toplamaya katılanların sayısından fazla olduğu için istatistiksel güç sağlanmamaktadır.

Tablo 5.14. %80 seviyesinde istatistiksel güç için 29 kişi veya daha az katılımcı gerektiren öznitelikler (yaş grubu sınıflandırması)

| **Öznitelik Sırası** | **Frekans (MHz)** | **Ölçüm Türü** | **Katılımcı Sayısı (istatistiksel güç = %80)** |
|---|---|---|---|
| 1 | 45 | $S_{21}$ genliği | 20 |
| 2 | 48 | $S_{21}$ genliği | 20 |
| 3 | 51 | $S_{21}$ genliği | 23 |
| 4 | 54 | $S_{21}$ genliği | 29 |

Tablo 5.15. %80 seviyesinde istatistiksel güç için seçilen özniteliklerle yaş grubu sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama)

| Sınıflandırıcı | Doğruluk |
|---|---|
| Lineer DVM | %79,3 |
| Karesel DVM | %79,3 |
| Kübik DVM | %65,5 |
| Gaussian DVM | %79,3 |
| KNN (k=3) | **%82,8** |
| Karar Ağacı | %69,0 |

Tablo 5.16. Yaş grubu sınıflandırması için En yüksek doğruluğu veren sınıflandırıcının (KNN, k = 3) karışıklık matrisi

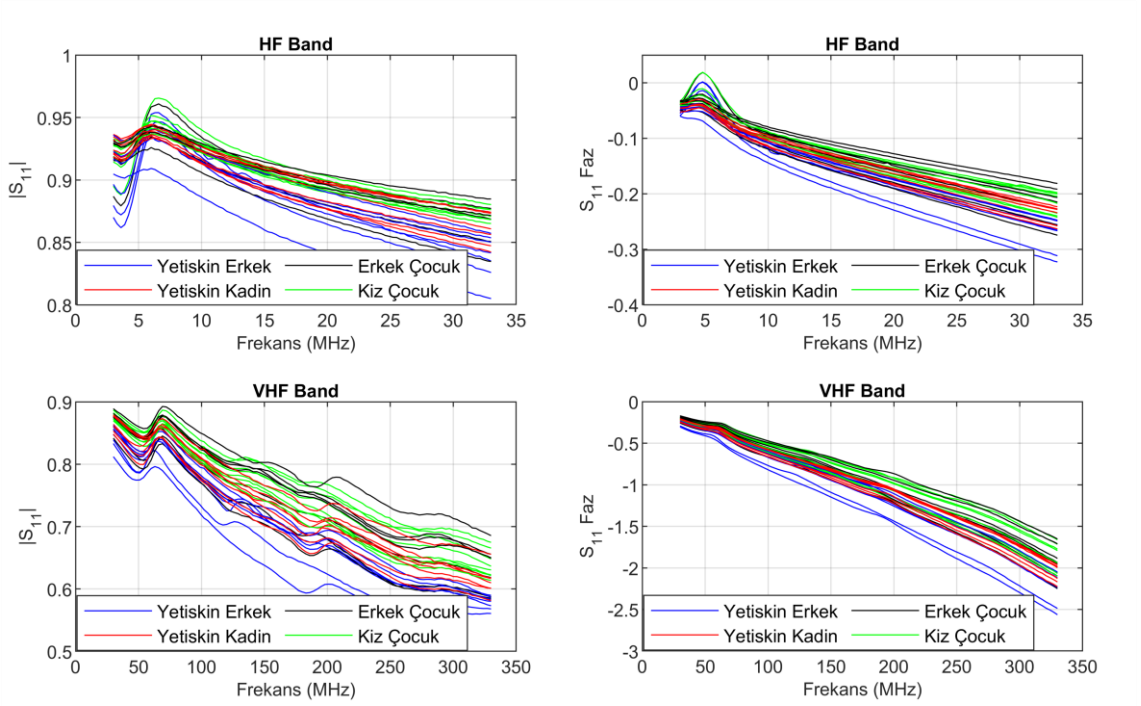
| | Yetişkin (Tahmin) | Çocuk (Tahmin) |
|---|---|---|
| **Yetişkin (Gerçek)** | 10 | 4 |
| **Çocuk (Gerçek)** | 1 | 14 |

Öznitelik vektörünü en yüksek sınıflandırma doğruluğunu verecek şekilde belirleme yerine eldeki katılımcı sayısına göre %80'lik istatistiksel güç sağlayacak şekilde belirlendiğinde Tablo 5.14'teki öznitelikler elde edildi. Tablo 5.14'teki özniteliklerle sınıflandırıcı eğitimi yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar Tablo 5.15'te listelenmektedir. KNN (k=3) sınıflandırıcı %82,8 doğruluk vererek en iyi performansı sergilemiştir. Bu durumdaki karışıklık matrisi Tablo 5.16'da gösterilmektedir.

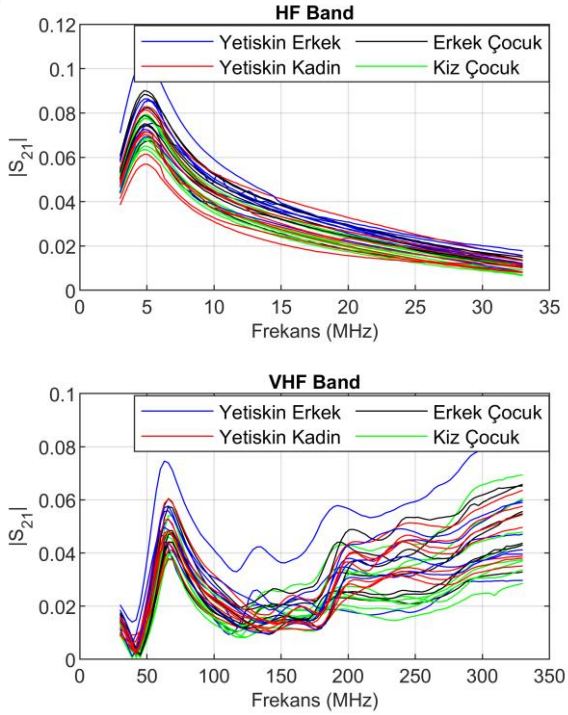
## 5.12. Yaş Grubu Verilerinin Cinsiyet Bilgisi Dahil Edilerek Analizi

"4.7. DPY ile Yaş Grubu Sınıflandırma" bölümünde yaş grubu sınıflandırmasıyla ilgili veri toplamaya 8 kız çocuğu, 7 erkek çocuğu, 7 yetişkin erkek ve 7 yetişkin kadın katıldı. Veri toplama sırasında katılımcıların boy ve kilo bilgisi alınmamıştı, sadece kız/erkek çocuk sayısı ve erkek/kadın yetişkin katılımcı sayısı bilgisi bulunmaktadır.

Veri toplama sonrasında elde edilen S-parametre sonuçları Şekil 5.23 ve 5.24'te gösterilmektedir. Bu verileri 4 sınıfa ayırıp Tablo 5.14'teki öznitelikler kullanılarak tekrar bir eğitim yapıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 5.17'de gösterilmektedir ve KNN (k = 3) elde edilen karışıklık matrisi Tablo 5.18'de gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre yaş bilgisiyle cinsiyet bilgisinin bir arada sınıflandırılamadığı anlaşılmaktadır.




Şekil 5.23. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edilmesi: (a) $S_{11}$ genlik ve (b) $S_{11}$ Faz verileri.




Şekil 5.24. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edilmesi: $S_{21}$ genlik verileri.

Tablo 5.17. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edildikten sonra elde edilen sınıflandırma sonuçları (5 katlı çapraz doğrulama)

| **Sınıflandırıcı** | **Doğruluk** |
|---|---|
| Lineer DVM | %41,4 |
| Karesel DVM | %41,4 |
| Kübik DVM | %41,4 |
| Gaussian DVM | %34,5 |
| KNN (k=3) | **%48,3** |
| Karar Ağacı | %34,5 |

Tablo 5.18. Yaş grubuyla ilgili toplanan verilere cinsiyet bilgisinin dahil edildikten sonra KNN (k = 3) için elde edilen karışıklık matrisi

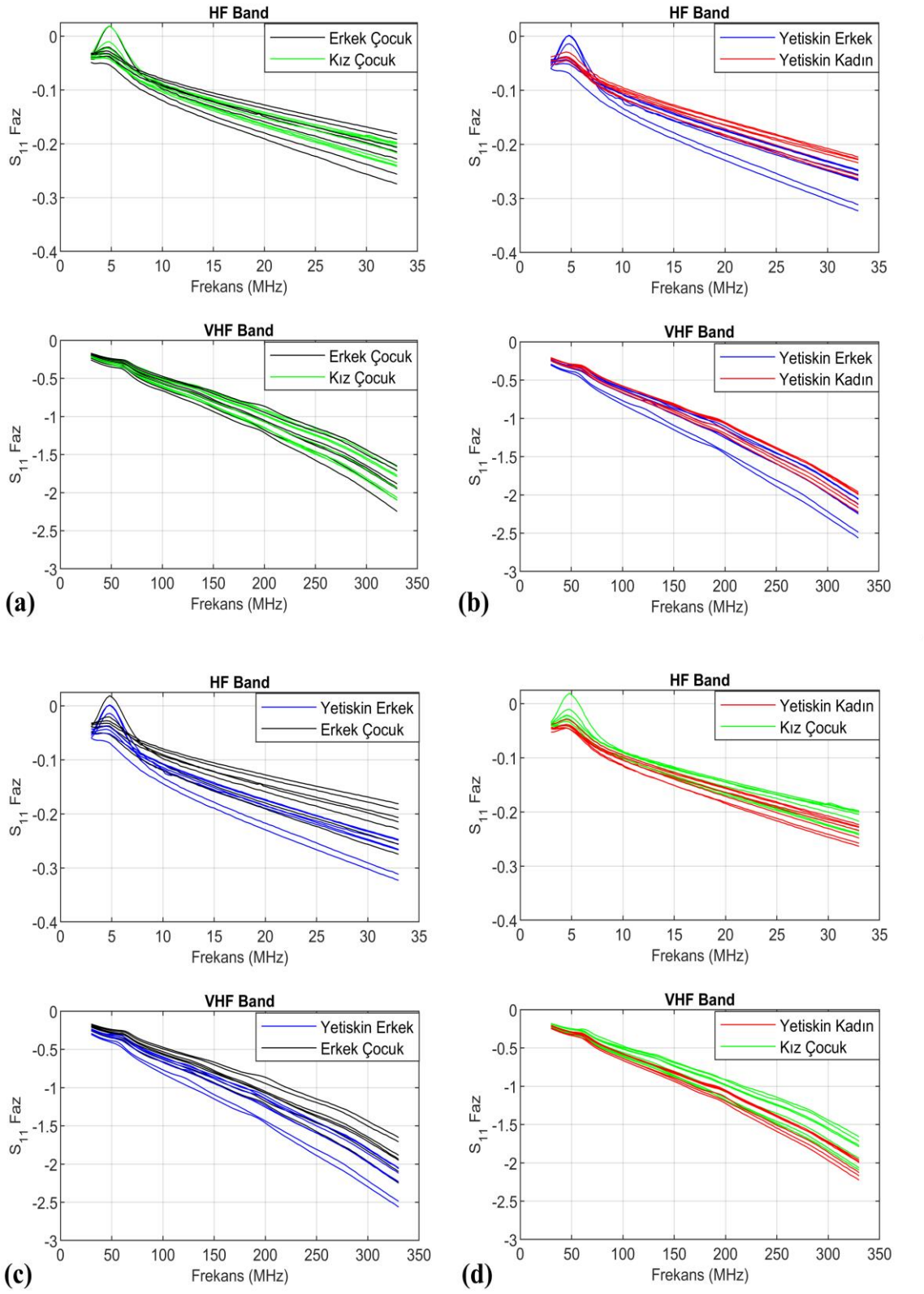
| | **Kız Çocuk (Tahmin)** | **Erkek Çocuk (Tahmin)** | **Yetişkin Kadın (Tahmin)** | **Yetişkin Erkek (Tahmin)** |
|---|---|---|---|---|
| **Kız Çocuk (Gerçek)** | 5 | 3 | 0 | 0 |
| **Erkek Çocuk (Gerçek)** | 1 | 4 | 2 | 0 |
| **Yetişkin Kadın (Gerçek)** | 4 | 1 | 0 | 2 |
| **Yetişkin Erkek (Gerçek)** | 1 | 1 | 0 | 5 |

Veri toplama sonrasında elde edilen S-parametre ölçümlerinin her birisi için dört adet sonuç grafiği oluşturuldu; bir grafik kız/erkek çocuk verilerini, bir grafik yetişkin kadın erkek verilerini, bir grafik yetişkin erkek ile erkek çocuk verilerini ve son olarak bir grafik kız çocuk ile yetişkin kadın verilerini görselleştirmek için oluşturuldu.

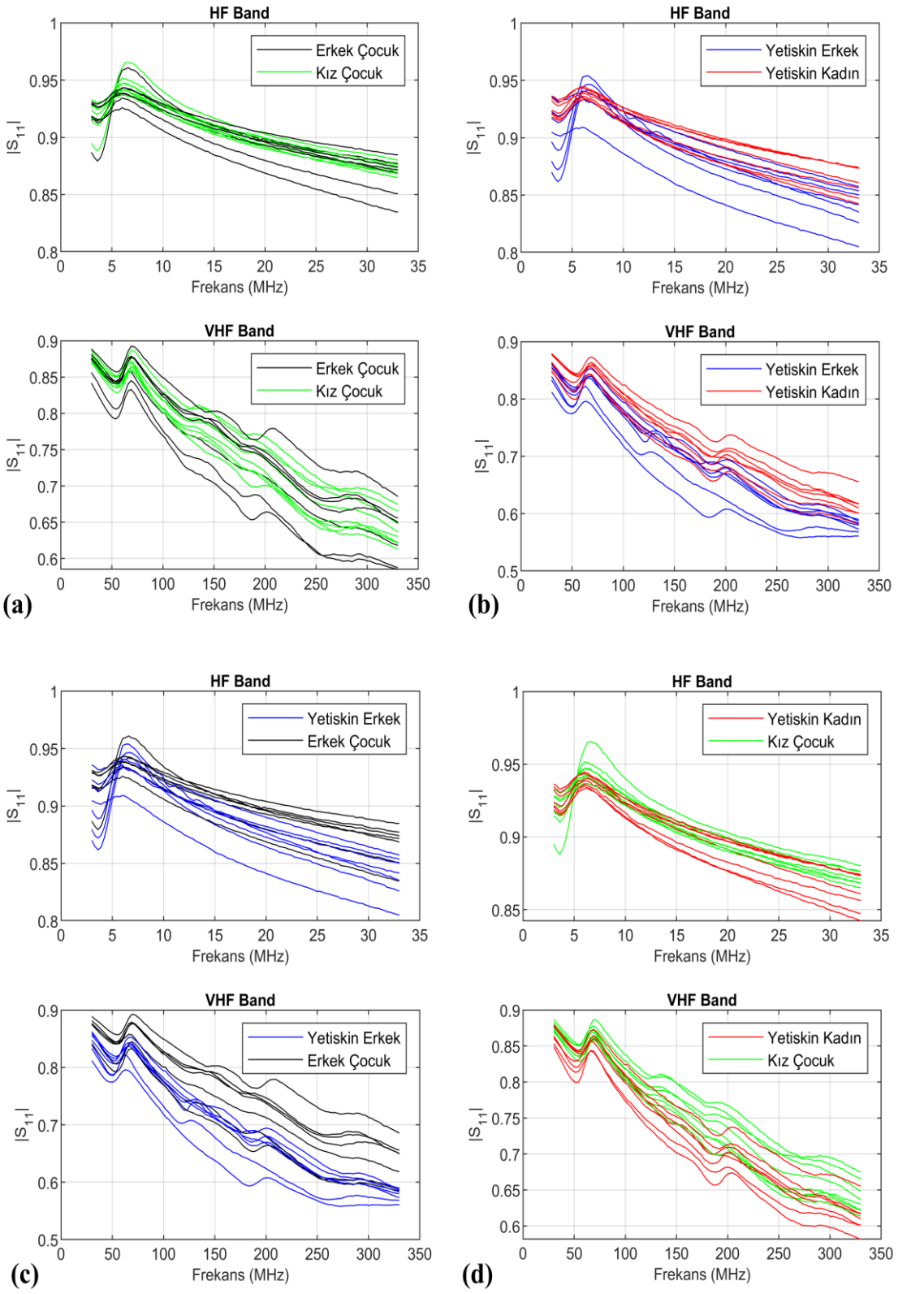
Bu dört sınıf çifti $S_{11}$ fazları için Şekil 5.25, $S_{11}$ genlikleri için Şekil 5.26 ve $S_{21}$ genlikleri için Şekil 5.27'de gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde, erkek/kız çocuk $S_{11}$ verilerinin birbirinden ayırt edilemediği ama HF bandındaki $S_{21}$ genlik verilerinde bir miktar ayırt edicilik bulunduğu anlaşılmaktadır.

Yetişkin erkek/kadın verilerinin birbirinden ayrıt edildiği frekans aralıklarının bulunduğu anlaşılmaktadır. Yetişkin erkek ile erkek çocuk $S_{11}$ verilerinin birbirinden iyi bir şekilde ayırt edildiği anlaşılmaktadır.

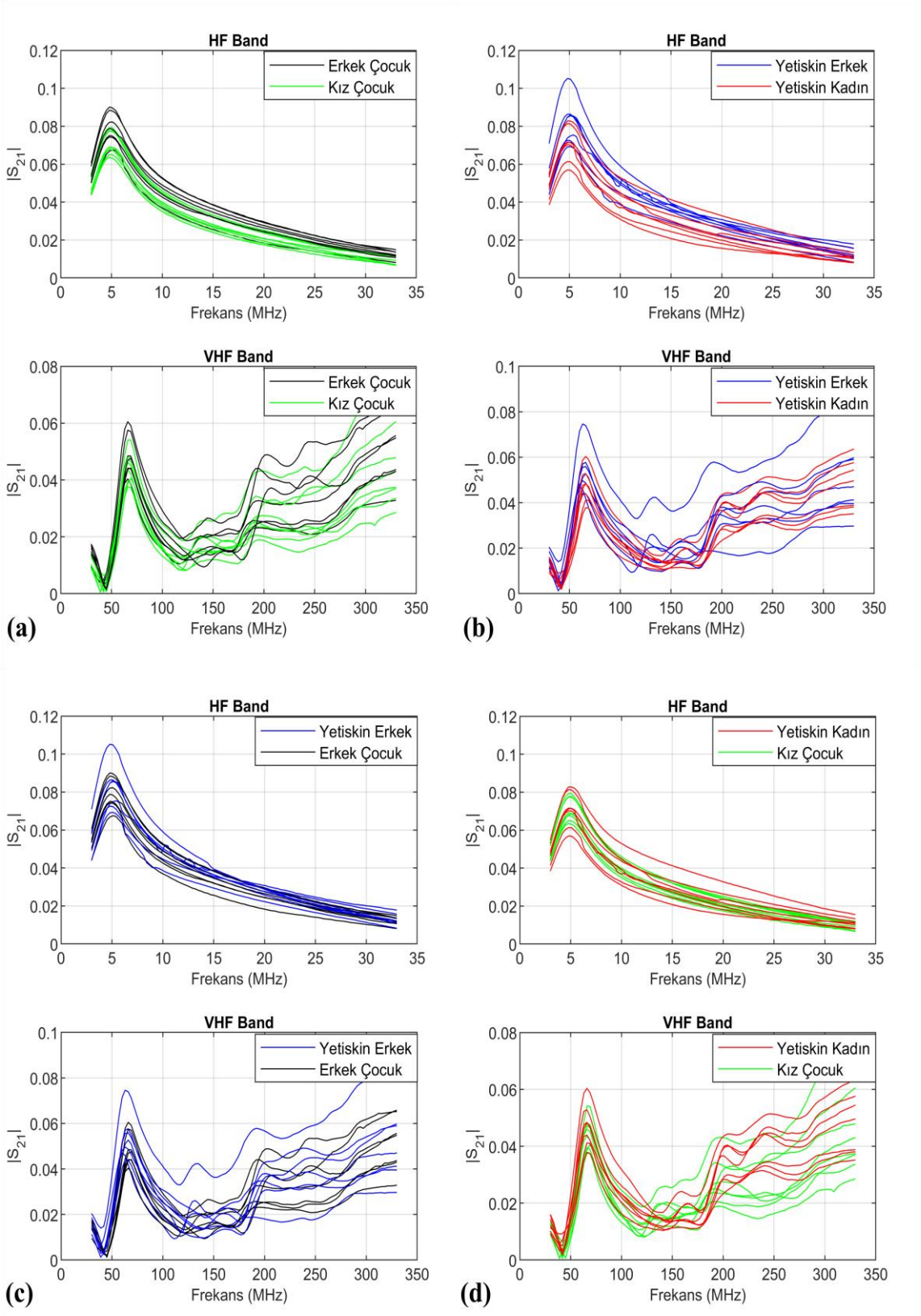
Yetişkin kadın ile kız çocuk $S_{21}$ verilerinde ayırt edicilik bulunmadığı ve $S_{11}$ verilerinin bazı frekans aralıklarında ayırt edicilik bulunduğu söylenebilir.




Şekil 5.25. $S_{11}$ Faz verileri: (a) erkek çocuk ile kız çocuk, (b) yetişkin erkek ile yetişkin kadın, (c) yetişkin erkek ile erkek çocuk ve (d) Yetişkin kadın ile kız çocuk




Şekil 5.26. $S_{11}$ Genlik verileri: (a) erkek çocuk ile kız çocuk, (b) yetişkin erkek ile yetişkin kadın, (c) yetişkin erkek ile erkek çocuk ve (d) Yetişkin kadın ile kız çocuk

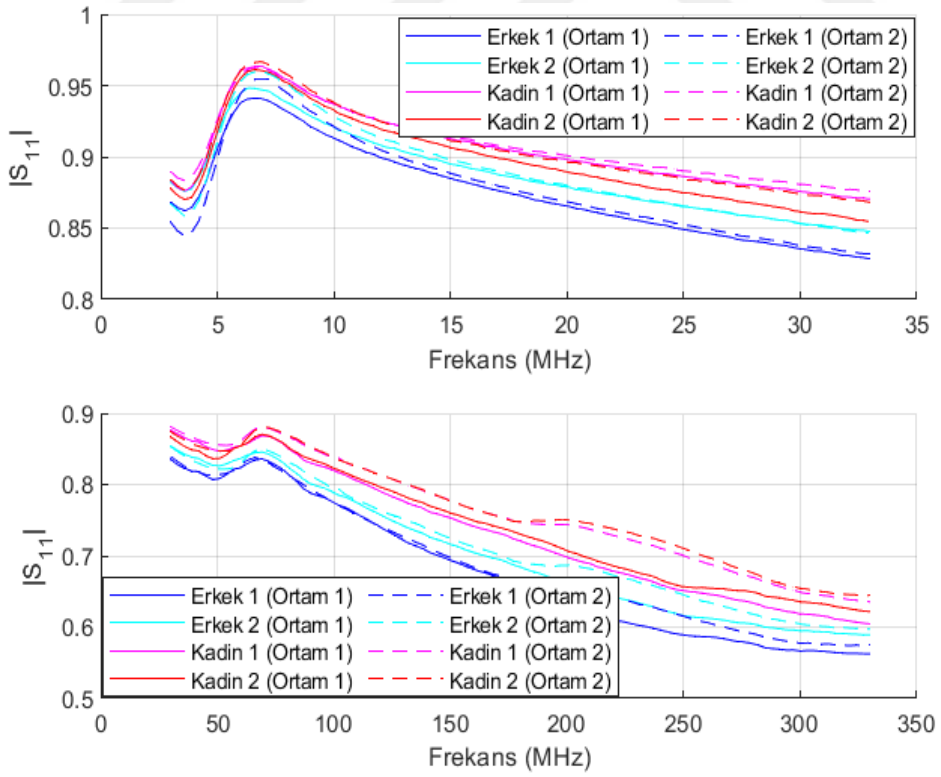



Şekil 5.27. $S_{21}$ Genlik verileri: (a) erkek çocuk ile kız çocuk, (b) yetişkin erkek ile yetişkin kadın, (c) yetişkin erkek ile erkek çocuk ve (d) Yetişkin kadın ile kız çocuk

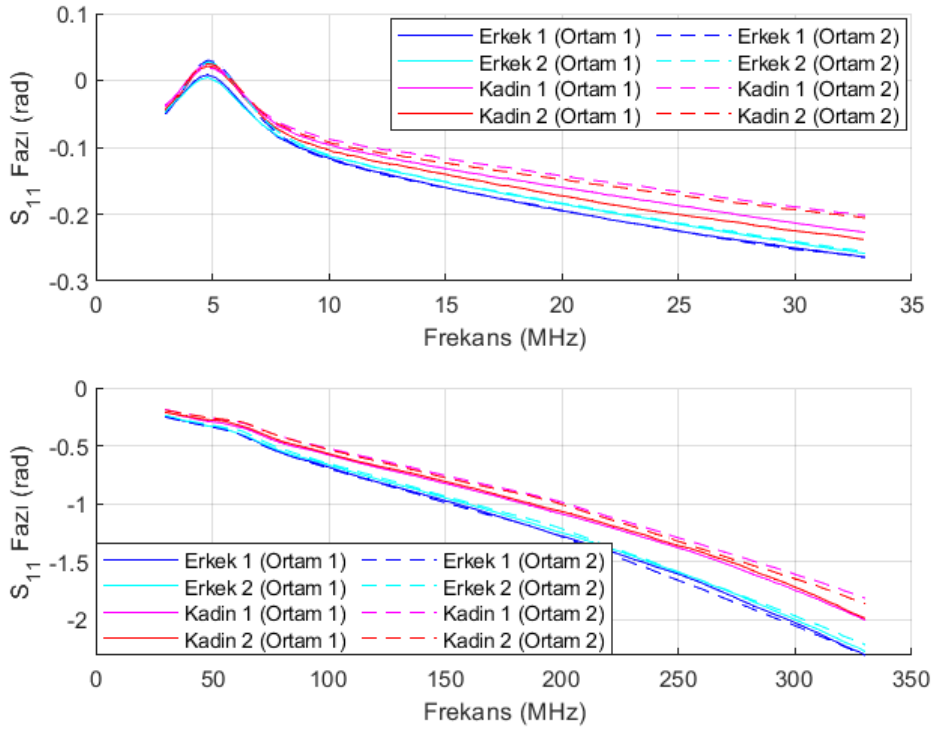
### 5.13. Ortamın Etkisi

DPY devresinde PORT1'e bağlı butona sol başparmakla dokunup sağ başparmakla farklı davranış yapıldığında $S_{11}$ genliğini etkilediği "4.6. Dokunma Davranışlarının S-parametre Ölçümlerine Etkisi" bölümünde anlatılmış ve çalışmaya katılan bir kadın ile bir erkekten elde edilen veriler Şekil 4.26'da gösterilmişti. Farklı davranışlar $S_{11}$ genliğinde sistematik hatalara neden olurken, erkek katılımcının $S_{11}$ genliği hangi yönde değişmişse (artma veya azalma) kadın katılımcının $S_{11}$ genliği de aynı yönde değişmekteydi. Bazı frekans aralıklarında, davranış şekillerinin neden olduğu sistematik hata sınıflar arası karışmaya neden olmaktaydı.

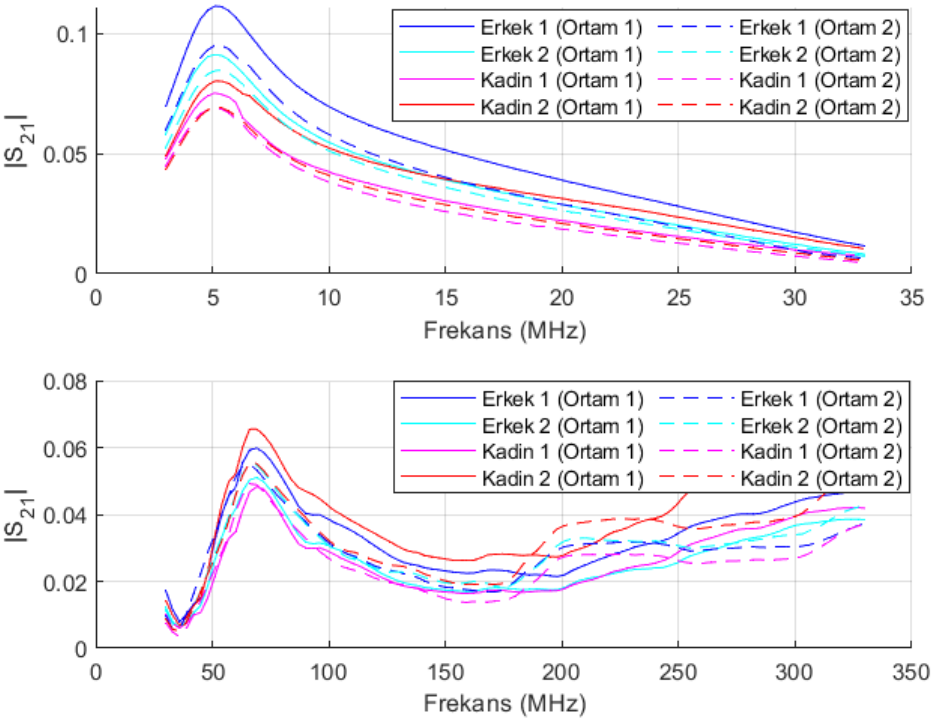
Ortam değişikliğinin S-parametre ölçümlerine etkisini belirlemek için altı katılımcıyla (3 erkek ve 3 kadın) iki farklı ortamda veri toplanmıştır. Elde edilen S-parametre ölçümlerinin $S_{11}$ genliği, $S_{11}$ fazı ve $S_{21}$ genliği sırayla Şekil 5.28, 5.29 ve 5.30'da katılımcıların cinsiyet bilgisiyle birlikte gösterilmektedir. Şekillerde 1'inci ortam düz çizgi, 2'nci ortam ise kesikli çizgiyle gösterilmiştir.




Şekil 5.28. Aynı katılımcılarla iki farklı ortamda HF ve VHF bantlarında toplanan $S_{11}$ genliğinin ortama bağlı değişimi.




Şekil 5.29. Aynı katılımcılarla iki farklı ortamda HF ve VHF bantlarında toplanan $S_{11}$ fazının ortama bağlı değişimi.




Şekil 5.30. Aynı katılımcılarla iki farklı ortamda HF ve VHF bantlarında toplanan S-parametre verilerinin ortama bağlı değişimi ($S_{21}$ genliği için).

$S_{11}$ genliği ve fazı bazı frekans aralıklarında ortama bağlı değişmekte ve değişim miktarı katılımcıya göre farklılık göstermektedir. HF bandının "3-10" MHz aralığında $S_{11}$ genliğindeki değişim miktarı cinsiyet sınıflarını karıştıracak seviyededir (belirli bir ortamda eğitilen sınıflandırıcının farklı bir ortamda yanlış tahmin vermesi anlamında). HF bandının daha yüksek frekanslarında ve VHF bandının tamamında $S_{11}$ genliğindeki değişim sınıfları karıştıracak seviyede olmayıp ortamdan "etkilenmeyen" veya "çok az etkilenen" öznitelikler içermektedir.

$S_{21}$ genliğinde de $S_{11}$ genliğinde olduğu gibi ortama bağlı değişim bulunmakta ve değişim miktarı katılımcıya göre farklılık göstermektedir. HF bandının düşük frekanslarında ortam değişikliği sınıflar arası karışıma neden olmamakta ama frekans arttıkça sınıflar arası farklılık azalmakta ve karışma olasılığı artmaktadır. VHF bandında ise ortam değişimi "ciddi bir seviyede" sınıflar arası karışıma neden olmakta ama her bir ortamın kendi içinde sınıflar arası farklılık durumu devam etmektedir.

VHF bandındaki $S_{21}$ genliği detaylıca incelendiğinde "30- 50" MHz aralığında minimuma indiği sonradan tekrar dalgalı bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Normalde frekans arttıkça elektromanyetik deri kalınlığı (elektromanyetik dalgaların yayılırken başlangıçtaki gücünün $e^{-1}$ katına indiği mesafe) azalır (Ulaby ve Ravaioli, 2015) ve aynı mesafe için (sol başparmaktan sağ başparmağa) iletilen elektromanyetik güç azalır. Bu da frekans arttıkça $S_{21}$ genliğinin azalması gerektiği anlamına gelmektedir. Ancak 50 MHz'den sonraki frekanslarda gözlemlenen artış teoriye ters gibi algılanabilecek bir durumun varlığını göstermektedir. $S_{21}$ genliğinin tekrardan artmaya başladığı frekans bandı için $S_{11}$ genliği incelendiğinde 50 MHz civarında bir dalgalanma olduğu görülmekte, sonrasında $S_{11}$ genliğindeki düşüş devam etmektedir. $S_{11}$ genliğinin düşüşü sol başparmağa iletilen dalgalardaki geri yansıma seviyesinin düştüğünü göstermektedir. Geri yansımanın düşmesinin iki nedeni olabilir: birincisi iki baş parmak arası biyolojik dokularda iletimin artması, ikincisi sol başparmağa yakın olan bölgelerinin bir anten gibi çalışmaya başlaması.

VHF bandındaki bazı frekans aralıklarında genlik değişim yönünün civardaki aralıklara göre tam tersi yönünde değişmesi anten gibi çalışma olasılığını daha baskın bir hale getirmektedir. Şekil 5.30'da kesikli çizgiler ile gösterilen ortamda "180 – 240" MHz

aralığındaki $S_{21}$ genliği düz çizgiyle gösterilen ortamdaki seviyeden yüksektir. Anten senaryosu düşünülürse böyle bir yükseliş için verici antenden (sol koldan) alıcı antene (sağ kola) direkt yapılan iletimin yanı sıra "180- 240" MHz aralığındaki frekanslar için ortamdaki duvar veya başka yansıtıcı yüzeylerden gelen dalgalar alıcı antende (sağ kol) yapıcı girişime neden olduğu için $S_{21}$ genliği artmaktadır. Bu sebepten dolayı VHF bandında $S_{21}$ değeri sadece ortam değişimine göre değişmeyecek, aynı ortamda bulunan nesnelerin yer değiştirmesi bile $S_{21}$ genliğini değiştirecektir. Bu nedenle VHF bandı (özellikle yüksek frekansları) $S_{21}$ genliği fraklı ortamlarda çalışabilecek bir sınıflandırıcı eğitimi için uygun değildir.

Sol kolun "180 – 240" MHz aralığında anten gibi çalışıp çalışmadığını değerlendirmek üzere aşağıdaki gibi ek bir deney yapılmıştır. Öncelikle DPY devresindeki butonlara iki başparmakla dokunulup ve VNA PORT1'den sürekli olarak 210 MHz frekansında sinyal üretilmiştir (210 MHz "180 – 240" aralığının ortasına denk geldiğinden dolayı ölçüm için seçildi). Sol kol anten gibi çalıştığında VNA PORT1'den gelen sinyali serbest uzaya elektromanyetik dalgalar şeklinde yayacaktır. Üretilen sinyalin serbest uzayda yayılıp yayılmadığı tespit etmek için "TinySA Ultra" adlı spektrum analizörü kullanılmıştır. Spektrum analizörler, bir alıcı anten yardımıyla çevrede yayılan elektromanyetik dalgaları algılama ve dalgaların frekansı ile gücünü ölçme gibi birçok işlevi gerçekleştirmektedir. Spektrum analizörünün çalışma mantığı frekans taramasına dayanmaktadır. Spektrum analizörünü çalıştırabilmek için başlama frekansı, bitiş frekansı, frekans adımı sayısı ve çözünürlük bant genişliğinin (Resolution Bandwidth RBW: algılanabilecek minimum frekans aralığı) belirlenmesi gerekmektedir.

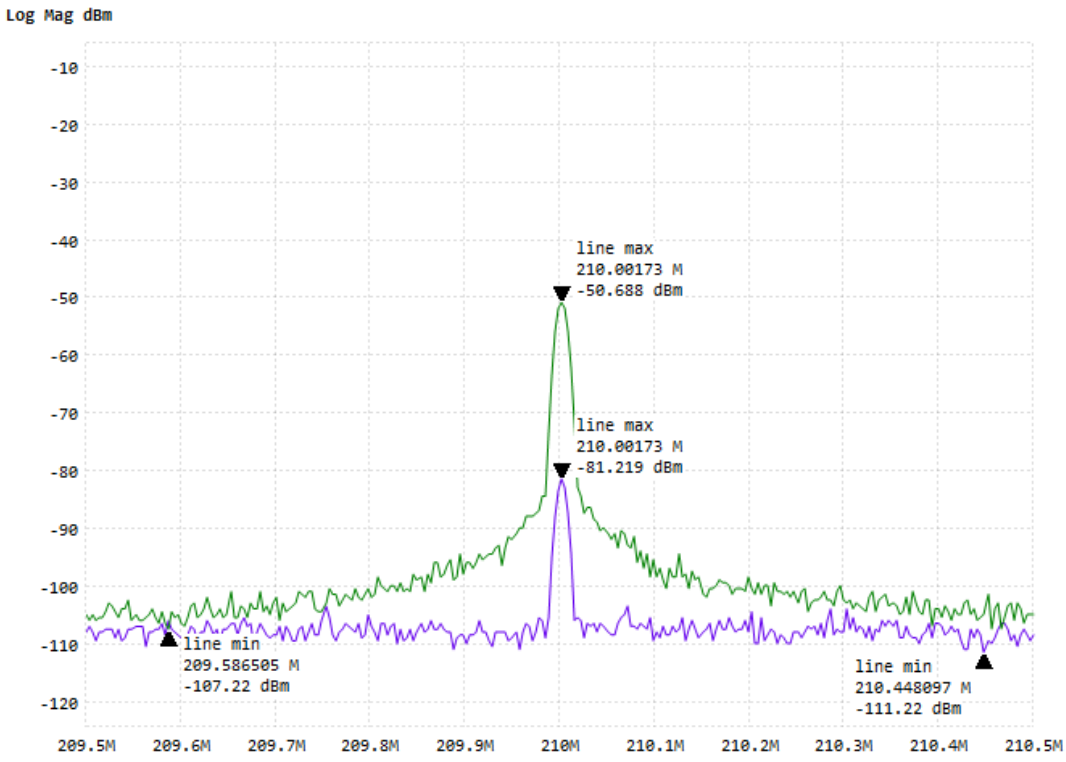
Tablo 5.19. Spektrum analizörünün ayarlanması

| | |
|---|---|
| **Başlama frekansı** | 209,5 MHz |
| **Bitiş frekansı** | 210,5 MHz |
| **Frekans adım sayısı** | 290 |
| **RBW** | 10 kHz |

Bu deney kapsamında spektrum analizör DPY devresine 10 cm uzaklıkta yerleştirilip ve 30 cm uzunluğunda monopol alıcı anten kullanılmıştır. Spektrum analizör Tablo 5.19'daki gibi ayarlandığında yapılan ölçümün sonucu Şekil 5.31'de gösterilmektedir.

Şekil 5.31'de TinySA Ultra tarafından ölçülen frekans spektrumu; dokunma olmadığında mor çizgi ve dokunma olduğunda yeşil çizgiyle gösterilmektedir. 210 MHz frekansında algılanan sinyalin gücü dokunma olmadığında -81 dBm iken dokunma olduğunda -50 dBm değerindedir. Aradaki fark 30dB olup lineer ölçekte iki durum arasında 1000 kat fark olduğunu göstermektedir.

Neticede 210 MHz frekansı için sol kol anten gibi davranmaya başladığı anlaşılmaktadır. Bu durum $S_{21}$ genliği için VHF bandındaki 50 MHz'den yüksek tüm frekanslar için geçerlidir.




Şekil 5.31. Sol kolun 210 MHz frekansında ortama yaydığı EM dalgalar: butona dokunma olmadığı durum mor ve dokunma durumu yeşil renkle gösterilmektedir.

Tüm bu bilgiler göz önünde bulundurulduğunda, ortam farklılığından etkilenmeyecek sınıflandırıcı eğitimi için $S_{11}$ parametresinin $S_{21}$ göre daha uygun olduğu anlaşılmaktadır.

### 5.14. Sınıflandırıcı Genelleme Performansının İncelenmesi

DPY devresi kullanılarak cinsiyet sınıflandırması için oluşturulan veri setleri ile ilgili bilgiler Tablo 5.20'de listelenmektedir.

Veri Seti #1'deki verilerden Tablo 5.5'teki öznitelikler elde edildikten sonra sınıflandırıcı eğitimi yapılmıştı. Tablo 5.8'de karışıklık matrisi gösterilen Lineer DVM ("Sınıflandırıcı #1") eğitim sonucunda en yüksek çapraz doğrulama değerini vermişti (%92,9). Aynı sınıflandırıcı farklı ortam ve katılımcılarla toplanan verilerde test edildiğinde doğruluk değerinin değiştiği görülmüştür.

Tablo 5.20. Cinsiyet sınıflandırması için DPY kullanılarak oluşturulan veri setleri.

| Veri seti # | Erkek Sayısı | Kadın Sayısı | Veri Toplama Şekli | Kullanım Amacı | Sınıflandırma Doğruluğu |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 98 | 28 | • Sağ ve sol başparmakla aynı anda DPY devresindeki butonlara basarak.<br>• Her bir katılımcıdan aynı ortamda iki kez veri alındı.<br>• Bu verilerle sınıflandırıcı eğitimi için 28 Erkek ile 28 Kadın verisi kullanıldı. | Eğitim | %92,9 |
| 2 | 70 | 0 | • Veri seti #1'de sınıflandırıcı eğitimi için kullanılmayan 70 Erkek verisi sınıflandırıcı testi için ayrıldı. | Test | %92,1 |
| 3 | 12 | 15 | • Sağ ve sol başparmakla aynı anda DPY devresindeki butonlara basarak.<br>• Her bir katılımcıdan bir kez veri alındı. | Test | %81,5 |
| 4 | 12 | 15 | • Veri Set #3'teki aynı katılımcılarla aynı ortamda veri toplandı.<br>• Sadece sol başparmakla DPY devresindeki butona (PORT1' bağlı olan) basılarak veri toplandı.<br>• Her bir katılımcıdan bir kez veri alındı | Test | %55,5 |
| 5 | 3 | 3 | • Sağ ve sol başparmakla aynı anda DPY devresindeki butonlara basarak.<br>• Her bir katılımcıdan iki farklı ortamda veri alındı.<br>• Katılımcılardan her ortamda iki kez veri alındı.<br>• Böylece her katılımcıdan 4 kez veri alındı. | Test | %70,8 |

Eşitlik (5.1)'e göre eğitim doğruluğuyla test doğruluğu arasındaki bağıl hata (Chapra ve Canale, 2021) hesaplandığında Tablo 5.21'de listelenen değerler elde edilmektedir.

$$bağıl\ hata = \frac{eğitim\ doğruluğu - test\ doğruluğu}{eğitim\ doğruluğu} \tag{5.1}$$

Tablo 5.21. Sınıflandırıcı #1 için veri setlerinden elde edilen doğruluk ve bağıl hata değerleri.

| Veri Seti # | Kullanım Amacı | Sınıflandırma Doğruluğu | Eşitlik (5.1)'e göre bağıl hata |
|---|---|---|---|
| 1 | Eğitim | %92,9 | %0,0 |
| 2 | Test | %92,1 | %0,8 |
| 3 | Test | %81,5 | %12,2 |
| 4 | Test | %55,5 | %40,3 |
| 5 | Test | %70,8 | %23,7 |

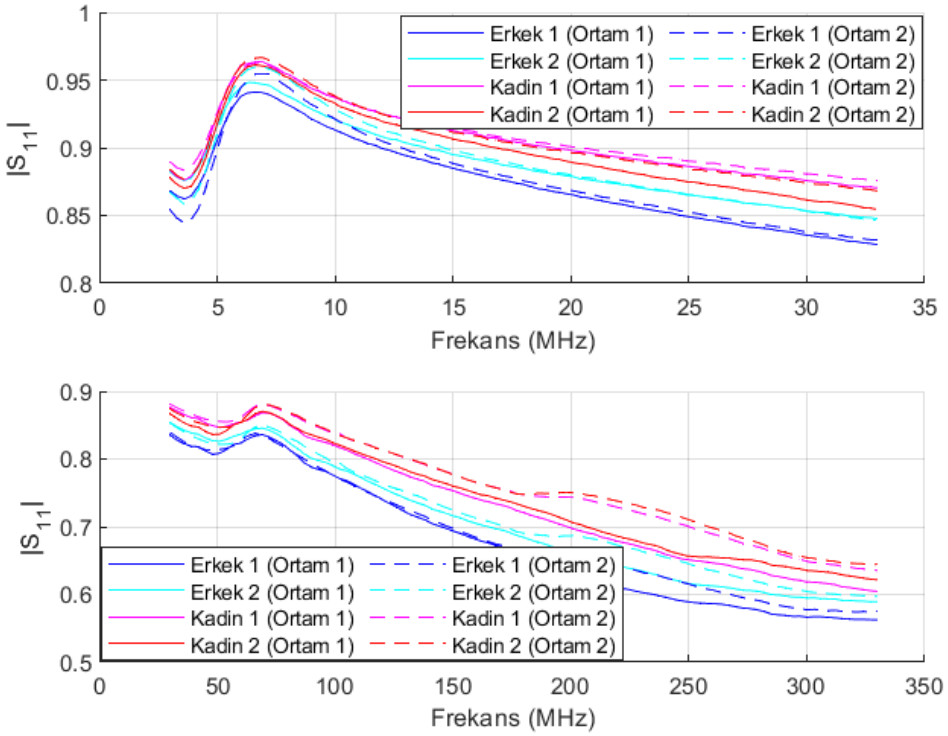
"Sınıflandırıcı #1"i eğitmek için kullanılan verilerle aynı ortamda toplanan 70 Erkek verisi test için kullanıldığında %92,1 değerinde doğruluk elde edilmiş olup bağıl hata oldukça düşük değerdedir (%0,8). Diğer veri setleri için elde edilen doğruluk değerleri düşmekte ve bağıl hata değeri artmaktadır. Özellikle Veri Seti #4'te sadece sol başparmakla veri toplandığından toplanan verilerde $S_{21}$ ölçümleri bulunmamakta olup bağıl hata değeri oldukça yüksektir. Sonuç olarak "Sınıflandırıcı #1"in farklı ortamlar için genelleme yapamadığı anlaşılmış olup daha iyi bir genelleme yapabilen sınıflandırıcı eğitimine olanak sağlayacak şekilde öznitelik seçiminin yeniden yapılmasına gerek duyulmuştur.

## 5.15. Öznitelik Seçimiyle Sınıflandırıcı Genellemesini Arttırma (Cinsiyet)

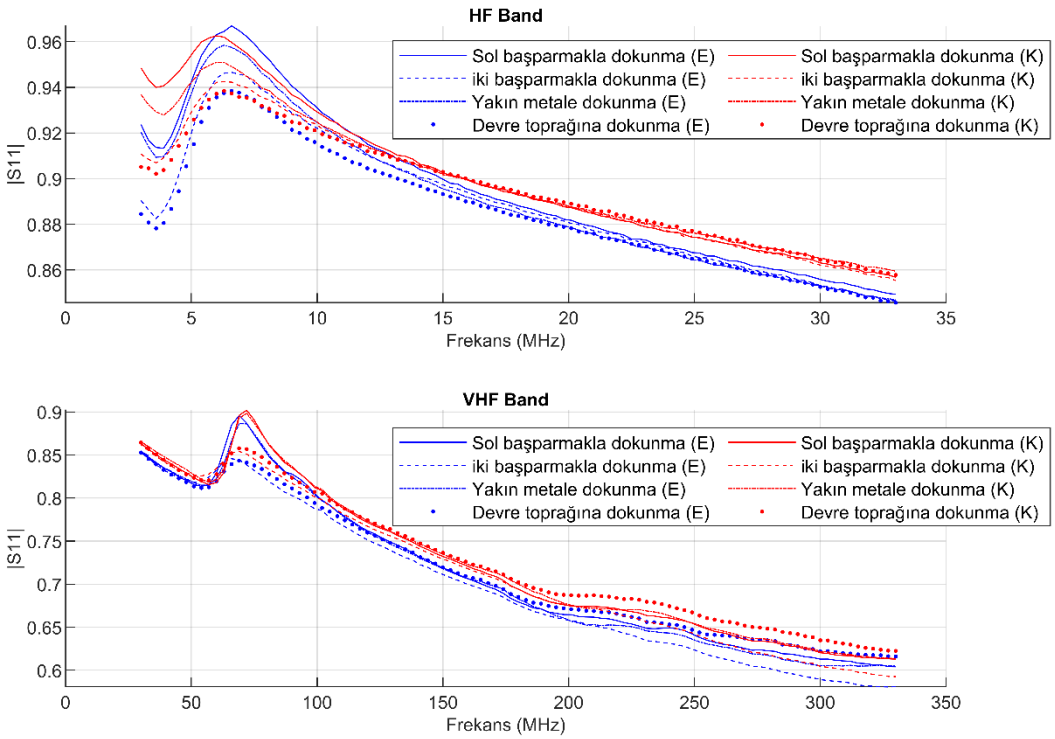
Tablo 5.20'deki Veri Seti #5'ten 2 erkek ile 2 kadın katılımcıya ait $S_{11}$ genlik verileri Şekil 5.32'de gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde ortam değişikliğinin $S_{11}$ genliğini etkilediği anlaşılmaktadır. HF bandının "25-33" MHz aralığında erkek verilerindeki ortama bağlı farklılık en düşük seviyededir.

Şekil 5.33'te bir erkek ile bir kadın katılımcının farklı dokunma davranışları için elde edilen $S_{11}$ genlik verileri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, dokunma davranışlarından değişmesinden kaynaklanan $S_{11}$ genlik farklılığı HF bandının "20-33" MHz aralığında en düşük seviyededir.

Neticede, "20-33" MHz aralığındaki $S_{11}$ genlikleri ortamdan ve davranış farklılığından en az etkilenen öznitelikler olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu verilerin en iyi genellemeyi sağlayacak sınıflandırıcı eğitimi için kullanılmaları uygun bulunmuştur.




Şekil 5.32. Veri Seti #5'ten 2 erkek ve 2 kadın katılımcıyla iki farklı ortamda toplanan S-parametre verilerinin ortama bağlı değişimi ($S_{11}$ genliği için).




Şekil 5.33. Farklı dokunma davranışları için DPY devresiyle toplanan $S_{11}$ verileri

Makine öğrenmesinde bir sınıflandırıcının genelleme kabiliyeti eğitim için kullanılan veri sayısı ve verilerden elde edilen öznitelik sayısıyla bağlantılıdır. Eğitim verisi az olduğunda öznitelik sayısı da az olmalıdır. Aksi takdirde sınıflandırıcı eğitim verilerini aşırı seviyede öğrenip genelleme kabiliyetini kaybedebilir.

Tablo 5.22. Cinsiyet sınıflandırıcı genellemesini arttırmak için seçilen özniteliklerle elde edilen sonuçlar (5 katlı çapraz doğrulama)

| **Sınıflandırıcı** | **Doğruluk** |
|---|---|
| Lineer DVM | **%85,7** |
| Karesel DVM | %81,2 |
| Kübik DVM | %72,3 |
| Medium Gaussian DVM | %85,7 |
| KNN (k=3) | %83,0 |
| Karar Ağacı (medium tree) | %75,0 |

Bu sebeple "20-33" MHz aralığının tamamını kullanma yerine sadece "27-30" MHz aralığındaki 11 adet $S_{11}$ genliği öznitelik vektörü oluşturmak için kullanılması ele alınmıştır. Sınıflandırıcı eğitiminin 5-kat çapraz doğrulama sonucu Tablo 5.22'de listelenmektedir. Lineer DVM en iyi performansı vermiştir ("Sınıflandırıcı #2"). Bu durumda elde edilen karışıklık matrisi Tablo 5.23'te verilmektedir.

Tablo 5.23. Cinsiyet sınıflandırması için en iyi genelleme sonucunu veren sınıflandırıcının (Lineer DVM) karışıklık matrisi

| | **Kadın (Tahmin)** | **Erkek (Tahmin)** |
|---|---|---|
| **Kadın (Gerçek)** | 46 | 10 |
| **Erkek (Gerçek)** | 6 | 50 |

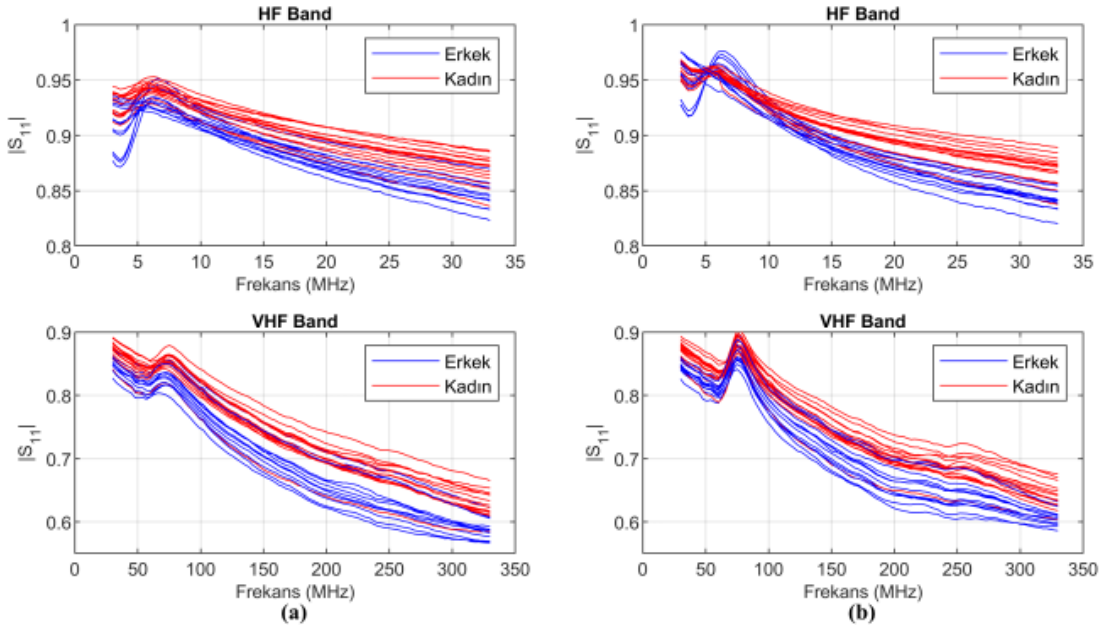
Tablo 5.20'deki veri setleri için "Sınıflandırıcı #2" kullanılarak elde edilen doğruluk değerleri ve Eşitlik (5.1)'e göre hesaplanan bağıl hata sonuçları Tablo 5.24'te gösterilmektedir. Tablodan anlaşılacağı üzere "Sınıflandırıcı #2" Eşitlik (5.1)'e göre daha düşük bağıl hata vermektedir (tüm veri setlerinde %10'un altındadır). Katılımcıların sadece sol başparmakla dokunmalarından elde edilen Veri Seti #4'te "Sınıflandırıcı #1" en kötü performansı verirken "Sınıflandırıcı #2" tam tersine eğitim doğruluğuna yakın bir doğruluk vermiştir. Sonuç olarak "Sınıflandırıcı #2" hem farklı ortam hem de farklı dokunma davranışları için daha iyi genelleme yapmaktadır.

Tablo 5.24. Sınıflandırıcı #1 ve #2 için veri setlerinden elde edilen doğruluk ve hata değerleri.

| Veri Seti # | Kullanım Amacı | Doğruluk (Sınıflandırıcı #1) | Bağıl hata (Sınıflandırıcı #1) | Doğruluk (Sınıflandırıcı #2) | Bağıl hata (Sınıflandırıcı #2) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Eğitim | %92,9 | %0,0 | %85,7 | %0,0 |
| 2 | Test | %92,1 | %0,8 | %85,0 | %0,8 |
| 3 | Test | %81,5 | %12,2 | %85,2 | %0,6 |
| 4 | Test | %55,5 | %40,3 | %85,0 | %0,8 |
| 5 | Test | %70,8 | %23,7 | %79,2 | %7,6 |

## 5.16. Tek ve İki Parmaklı Dokunma Durumlarının Karşılaştırılması

Gerçek dünya senaryolarında tek elin kullanılması ve tek parmakla dokunma daha yaygın olduğundan, tek parmakla yapılacak dokunmaların cinsiyet sınıflandırmasında kullanılabilirliğini araştırmak için sol başparmak kullanılarak S parametre verileri toplanarak bazı ek deneyler yapılmıştır.




Şekil 5.34. Cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S_{11}$ genlikleri: (a) iki başparmakla dokunma verileri (Veri Seti #3) ve (b) sol başparmakla dokunma verileri (Veri Seti #4)

Bu deneyler kapsamında 12 erkek ve 15 kadın katılımcıdan S-parametre verileri toplanmıştır. Deney sırasında her katılımcıdan aynı anda iki düğmeye dokunması istenip

frekans taraması yapılarak elde edilen S-parametre verileri bilgisayara kaydedildi. Sonrasında katılımcıdan sol elini kıpırdatmadan sağ parmağını kaldırması istendir. Bu sayede katılımcı yalnızca VNA PORT1'e bağlı olan sol düğmeye dokunmuş oldu. Bu durumda da bir frekans taraması yapılıp S-parametre verileri bilgisayara kaydedildi. Yani, her katılımcıdan S-parametresi ölçümleri iki kez gerçekleştirilmiş olup ilk seferde hem sol hem de sağ başparmak, ikinci seferde ise yalnızca sol başparmak kullanıldı.

Şekil 5.34.a'da iki başparmakla dokunma için $S_{11}$ ölçümleri gösterilmektedir. Bu veriler Tablo 5.20'deki Veri Seti #3'ü oluşturmaktadır. Şekil 5.34.b'de sol başparmakla dokunma için $S_{11}$ ölçümleri gösterilmektedir. Bu veriler Tablo 5.20'deki Veri Seti #4'ü oluşturmaktadır. Bu şekillerin analizi, cinsiyet sınıfları arasındaki farklılığın, iki parmakla dokunma durumunda olduğu gibi, tek parmakla dokunma durumunda da var olmaya devam ettiğini ortaya koymaktadır.

"5.13. Öznitelik Seçimiyle Sınıflandırıcı Genellemesini Arttırma (Cinsiyet)" bölümünde anlatıldığı gibi bu verilerle bir Lineer DVM sınıflandırıcı eğitmek için "27-30" MHz aralığındaki $S_{11}$ genliklerini kullanılmıştır. Tek parmaklı ölçümler $S_{21}$ verisi içermediğinden yalnızca $S_{11}$ genlik verileri kullanılmıştır. Lineer DVM, Veri Seti #1'deki veriler kullanılarak eğitildiğinde %85,7'lik 5-katlı çapraz doğrulama sonucu elde edilmiştir. Ardından, bu sınıflandırıcı Şekil 5.34.a. ve 5.34.b'deki veriler üzerinde test edildiğinde iki parmaklı durum için %85,2 ve tek parmaklı durum için %85,0'lik doğruluk elde edilmiştir.

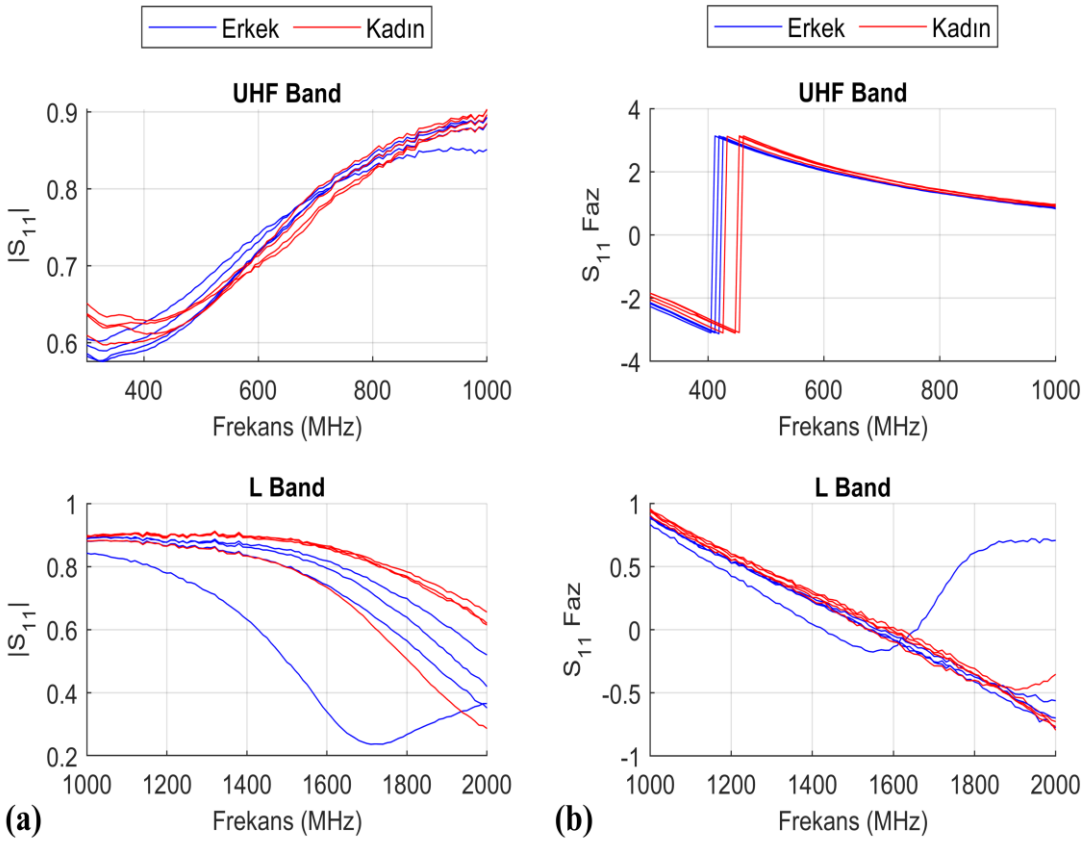
Bu doğrulukları %92,9'luk doğruluk değeriyle (Tablo 5.1'deki Lineer DVM sınıflandırıcı doğruluğu, $S_{11}$ ve $S_{21}$ parametrelerinin birlikte kullanılmasıyla elde edilmiştir) karşılaştırıldığında, yalnızca $S_{11}$ verilerini kullanmanın doğruluğu yaklaşık %7 oranında azalttığı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, DPY her iki konfigürasyonda da kullanılabilir, ancak bir parmak kullanıldığında sınıflandırma doğruluğu daha az olacaktır.

İki parmağı aynı anda kullanmak, kullanıcının $S_{11}$ ve $S_{21}$ parametrelerinin ölçülmesini sağlamaktadır. İki eli kullanmak, sol elden sağ ele geçen zayıf sinyalin ölçülmesine de yardımcı olmaktadır. İki parmağın kullanılmasının aksine, tek parmak yalnızca kullanıcının $S_{11}$ parametresinin ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Yani, iki parmağın aynı anda kullanılması, kullanıcı hakkında daha fazla veri toplanmasına ve sınıflandırma

doğruluğunun artırmasına yardımcı olmaktadır. Ancak tek parmakla, DPY kartındaki PORT1'e bağlanan buton kullanılarak da cinsiyet sınıflandırması yapılabilmektedir.

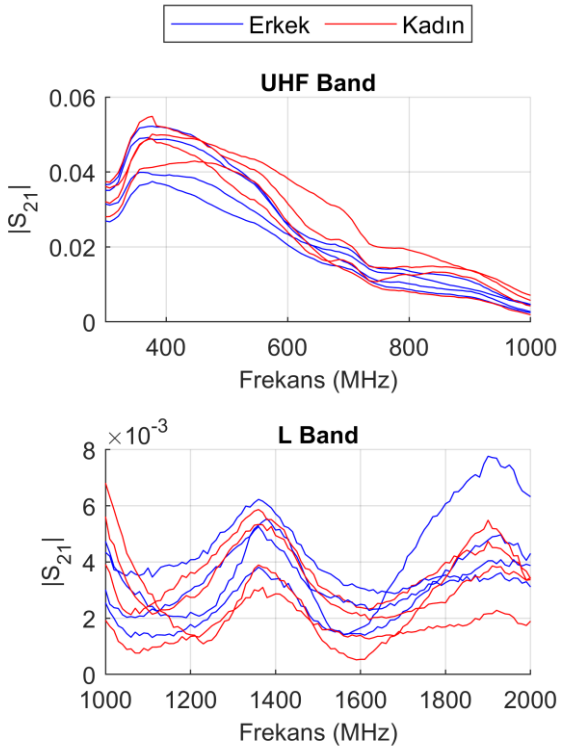
### 5.17. Ultra Yüksek Frekans Bandında DPY ile Cinsiyet Tespiti

DPY ile yapılan S-parametre ölçümlerinin daha yüksek frekanslarda gerçekleştirilmesi durumunda cinsiyetler arasındaki ayrıma etkisini anlamak için 4 erkek ve 4 kadın katılımcıyla veri toplama yapılmıştır. Şekil 5.35 ve 5.36'da toplanan veriler gösterilmektedir




Şekil 5.35. UHF ve L bant frekanslarında cinsiyet sınıflandırması için toplanan: (a) $S_{11}$ genlikleri ve (b) $S_{11}$ fazları

Toplanan $S_{11}$ verilerinin bazı frekans aralıklarında cinsiyete göre bir ayrım bulunduğu görülmektedir. Ancak $S_{21}$ verileri oldukça düşük değerde olup bu verilerde cinsiyet tespiti açısından ayırt edicilik bulunmamaktadır.




Şekil 5.36. UHF ve L bant frekanslarında cinsiyet sınıflandırması için toplanan $S_{11}$ genlikleri

### 5.18. DPY ile Literatürdeki Yöntemlerin Karşılaştırılması

Tez kapsamında önerilen DPY yönteminin sınıflandırma doğruluğu literatürdeki en benzer çalışmaların (kapasitif veya dokunmatik tabanlı olanlar) doğruluklarıyla karşılaştırılmak üzere Tablo 5.25'te listelenmektedir. Tablodan anlaşılacağı üzere, DPY mevcut yöntemlerden daha iyi bir sınıflandırma doğruluğu göstermektedir. Tabloda listelenen ilk dört yöntemde dokunmatik hareketler (jestler) kullanılmıştır. Dokunmatik jestlerin kullanımı, kullanıcının dokunmatik ekran üzerindeki hareketlerinin izlenmesini ve bu hareketlerden özniteliklerin çıkarılmasını gerektirmekte olup bu işlem zaman almaktadır.

Ayrıca, Tablo 5.25'te listelenen ilk dört çalışmada bildirilen sınıflandırma doğruluklarını elde etmek için birden fazla dokunma hareketinin sınıflandırma sonucu birleştirilmiştir. Özellikle (A. Jain ve Kanhangad, 2019)'de her bir dokunma jesti için elde edilen doğruluk %84'ten fazla değildir; bunların birleştirilmesi sonucunda %92,96 doğruluk elde edilmiştir. Gerçek dünya senaryolarında, bir kullanıcının en yüksek sınıflandırma

doğruluğunu sağlayan dokunma jestlerini yapma garantisi yoktur. Bu bakış açısından, DPY'nin gerçek dünya senaryoları için daha uygun olduğu değerlendirmektedir. Çünkü DPY herhangi bir hareket gereksinimi olmadan yalnızca butona yapılan tek bir dokunma ile karar verebilmektedir (buna Tablo 5.25'te "Tek Dokunuş" adı verildi). Elde taşınan bir kronometre kullanarak, DPY ile bir kullanıcının cinsiyetini tespit etmek için gereken süre 6 saniye olarak ölçülmüştür. Bu süre, 202 noktalı S parametresi ölçümlerini toplamak ve sınıflandırmak için gereken süreyi içermektedir. Özetle, DPY kartındaki butonlara 6 saniye dokunmak, herhangi bir dokunma hareketi gereksinimi olmadan kullanıcının cinsiyetini sınıflandırmak için yeterlidir. Bu nedenle, çalışmamız doğruluk ve hız açısından mevcut yöntemlerden, hatta (Konings ve diğ., 2022) ve (A. Jain ve Kanhangad, 2019)'de bildirilen çalışmadan daha iyi performans göstermektedir.

Tablo 5.25. DPY doğruluğunun literatürdeki cinsiyet sınıflandıran yöntemlerle karşılaştırılması.

| **Yöntem** | **Sınıflandırmada kullanılan veriler** | **Sınıflandırıcı** | **Doğruluk** |
|---|---|---|---|
| (Konings ve diğ., 2022) | Kapasitif yer döşemesi üzerinde yürüyüş biçimi | CNN | %93,3 |
| (Maki-Kihnia, 2021) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar kullanılarak toplandı | DVM | %72,6 |
| (A. Jain ve Kanhangad, 2019) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar ile hareket sensörleri kullanılarak toplandı | KNN (k = 1) | %92,96 |
| (Davarci ve Anarim, 2021) | Dokunma jestleri, ivmeölçer kullanılarak toplandı | DVM | %89,7 |
| (Miguel-Hurtado ve diğ., 2016) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar kullanılarak toplandı | Naïve Bayes | %78 |
| FTKA ((Sato ve diğ., 2012)'de önerilen dokunma algılama yönteminin tez kapsamında cinsiyet sınıflandırma amaçlı kullanılması) | Kapasitif profil, Tek Dokunuş | DVM | %78,6 |
| DPY (iki başparmakla dokunma) | S-parametreleri, Tek Dokunuş | DVM | %92,9 |

Tablo 5.26'da yaş grubu sınıflandırması için elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, DPY ile elde edilen doğruluk seviyesinin daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak, literatürdeki yaş grubu sınıflandırması yapan kapasitif dokunma temelli çalışmalar dokunma jestlerini gözlemleyerek çalışmakta olup bilinçli

olarak aldatıcı jestler yapıldığında yanlış sınıflandırma sonucu elde etme olası bir durumdur. DPY ise tek dokunuşla çalışıp vücut elektriksel özelliklerini (S-parametre) ölçerek çalıştığı için sistemin aldatılması ihtimali göreceli olarak oldukça düşüktür. Bu açıdan DPY literatürdeki çalışmalara göre önemli bir üstünlüğe sahiptir.

Tablo 5.26. DPY doğruluğunun literatürdeki yaş grubu sınıflandıran yöntemlerle karşılaştırılması.

| **Yöntem** | **Sınıflandırmada kullanılan veriler** | **Sınıflandırıcı** | **Doğruluk** |
|---|---|---|---|
| (Hernandez-Ortega ve diğ., 2017) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar kullanılarak toplandı | DVM | %91,4 |
| (Acien ve diğ., 2019) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar kullanılarak toplandı | DVM | %96,3 |
| (Vatavu ve diğ., 2015) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar kullanılarak toplandı | Bayes | %85 |
| (Buriro ve diğ., 2016) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar kullanılarak toplandı | Rastgele Orman | %87,9 |
| (Tolosana ve diğ., 2022) | Dokunma jestleri, kapasitif dokunmatik ekranlar kullanılarak toplandı | DVM | %90 |
| DPY (iki başparmakla dokunma) | S-parametreleri, Tek Dokunuş (en yüksek sınıflandırma doğruluğu için belirlenen öznitelikler) | DVM | %89,2 |
| DPY (iki başparmakla dokunma) | S-parametreleri, Tek Dokunuş (%80'lik istatistiksel gücü sağlayacak şekilde belirlenen öznitelikler) | KNN (k = 3) | %82,8 |

# 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde kapasitif algılamayla bir elektronik cihaz kullanıcısının kişisel bilgilerinin kestirilmesi hedeflenmiştir. Tespit edilmek istenen kişisel bilgi cinsiyet olarak planlanmış ve yaş grubu ile ilgili de bir ön çalışma yapılmıştır. Tezde düşük maliyetli ve elektronik cihazlara kolayca entegre edilebilen bir yöntem geliştirmek amaçlandığından kapasitif algılama için dokunmatik buton kullanımı uygun bulunmuştur.

Tez kapsamında kapasitif dokunma algılama için iki devre tasarımı yapılmıştır. Birinci devre FTKA yöntemini temel alarak çalışmaktadır. Devreyi kontrol etme, sınıflandırıcı eğitimi için veri toplama, etiketleme ve kaydetme için bir kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. İlk etapta cinsiyet sınıflandırması için farklı katılımcılarla farklı ortamlarda veri toplama yapılmıştır. Toplanan veriler incelendiğinde erkek ve kadın sınıf kapasitans değerlerinde tutarsızlıklar tespit edilmiştir. Tutarsızlığa neden olan etkenleri bulmak için yapılan veri toplamalarda, FTKA devresinin kullanıcının yaptığı davranışlardan ve bulunduğu ortamdan oldukça etkilendiği anlaşılmıştır. Bu sebeple FTKA devresiyle çocuklardan veri toplama yapılmamıştır, FTKA yönteminin tezin hedefi için uygun olmadığı anlaşıldığından yeni bir yöntem tasarımına gidilmiştir. FTKA devresiyle vücudun kapasitans değerine göre cinsiyet veya yaş grubu sınıflandırması yapılamamış olmakla birlikte dokunma sırasında kullanıcının sergilediği bazı davranışları tespit edebilen bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

FTKA yaklaşımı ile sadece kapasitans bilgisini elde etme, cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırmasını gerçekleştirmek için yeterli olmadığından tez kapsamında S-parametre ölçümlerini kullanarak yeni bir kapasitif dokunma algılama yöntemi geliştirilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen ikinci devrede dokunmatik butonlar, kullanıcıyı iletim hattına bağlayan problar gibi işlev gördüğünden geliştirilen yöntem Düzlemsel Prob Yöntemi (DPY) olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemde kullanıcılar butona dokunduğunda iletim hattı sonuna bağlı bir elektriksel yük oluşturmaktadır. S-parametreleriyle ölçüm yapıldığında kullanıcının empedansı, yani hem dirençli bileşeni hem de kapasitanstan kaynaklanan reaktif bileşeni ölçülmektedir. Bu sebeple FTKA yöntemine göre, kullanıcılardan daha fazla elektriksel bilgi elde edilmektedir.

Cinsiyet sınıflandırması için DPY devresi kullanılarak 28 erkek ile 28 kadının katılımıyla toplanan verilerden maksimum sınıflandırma doğruluğunu elde etmek için öznitelik seçimi gerçekleştirilerek eğitilen Lineer DVM ile %92,9 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Sınıflandırmada kullanılan öznitelikler için yapılan istatistiksel güç analizi %95 seviyesinde istatistiksel gücün sağlandığını ve sınıflandırma sonuçlarının istatistiksel açıdan anlamlı olduğu göstermiştir. Tez kapsamında yapılan detaylı deneysel çalışmalar DPY devresiyle toplanan verilerde bazı frekanslarda S-parametre ölçümlerinin ortamdan ve davranış şeklinden etkilenmediğini göstermiştir. Ortam ve davranış şeklinden etkilenmeyen sınıflandırma için bu frekans aralıklarından seçilen öznitelikler kullanılarak eğitilen Lineer DVM sınıflandırıcısı ile %85,7 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Bu aşamada her ne kadar sınıflandırma performansında bir düşüş olsa da yeni sınıflandırıcının farklı ortamlarda toplanan verilerde de aynı performansı sergilemesi önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır.

Yaş grubu sınıflandırması için yapılan ön çalışmada DPY devresi kullanılarak 15 çocuk ile 14 yetişkinin katılımıyla veri toplanmıştır. Maksimum sınıflandırma doğruluğunu elde etmek için öznitelik seçimi yapıldıktan sonra eğitilen Lineer DVM ile %89,7 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Sınıflandırmada kullanılan öznitelikler için istatistiksel güç analizi yapıldığında %95 seviyesinde istatistiksel gücün sağlanmadığı anlaşılmıştır. Öznitelikleri maksimum doğruluğu verecek şekilde seçme yerine %80 seviyesinde istatistiksel gücü sağlayacak şekilde seçildiğinde KNN (k = 3) sınıflandırıcı ile %82,8 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Böylelikle bir deneyin istatistiksel açıdan geçerli olması için gereken minimum istatistiksel güç seviyesi sağlanmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmanın literatüre katkısı:

- İnsan vücudu için N-kapılı devre ve iki kapılı ölçüm modelinin ortaya konulması,
- S-parametre ölçümleriyle çalışan bir dokunma algılama yönteminin geliştirilmesi,
- Cinsiyet bilgisinin kapasitif dokunma algılamayla elde edilebilmesi sağlayan bir yöntemin geliştirilmesi,
- Bu yöntemin yaş grubu ayrımı yapma potansiyelinin olduğunun gösterilmesi ve
- Geliştirilen sensör sistem ile insan fizyolojisine ilişkin çeşitli bilgilerin bu yöntemle toplanma potansiyeli olduğunun gösterilmesi

olarak özetlenebilir. Tez kapsamında geliştirilen DPY yöntemi aşağıda listelenen önemli özelliklere sahiptir.

- Doğruluk açısından: DPY ile toplanan S-parametre ölçümleri kullanılarak eğitilen sınıflandırıcılar ile cinsiyet sınıflandırmasında literatürdeki çalışmalardan daha yüksek bir doğruluk elde edilmiştir. Yaş grubu için elde edilen doğruluk literatürdeki çalışmalardan daha yüksek değerde olmasa da kabul edilebilir seviyededir.
- Müdahale açısından: DPY kartındaki butonlar herhangi bir elektronik cihaza kolayca entegre edilebildiğinden ve biyo-sinyal temelli yöntemlerdeki gibi vücudun belirli bölgelerine sensör yerleştirilmesi gerekmediğinden müdahale seviyesi oldukça düşüktür.
- Ayırt edicilik açısından: ortamdaki değişikliğin, el sıcaklığının ve dokunma kuvvetinin S-parametre ölçümleri üzerinde bir miktar etkisi vardır. Ancak bu değişiklikler önerilen yöntemin başarısız olmasına neden olmamaktadır. Farklı ortamlarda veri toplanıp test verisi olarak kullanıldığında eğitim doğruluğuna yakın değerde doğruluk sonuçları elde edilmiştir.
- Toplanabilirlik açısından: dokunma eylemi ile elektronik alet kullanımı günümüzde kullanıcılar tarafından alışılmış bir durum olup rahatsız edici bir yönünün bulunmaması toplanabilirlik seviyesini arttırmaktadır.
- Kalıcılık açısından: Aynı kişiler farklı zamanlarda dokunduklarında S-parametre ölçümlerinde bir miktar farklılık oluşmaktadır. Ancak, cinsiyet ve yaş grubu sınıflandırması Yumuşak Biyometrik özellikler olduğundan aynı kişiler için her zaman aynı ölçümlerin alınmasına gerek yoktur. Ayrıt edilmesi gereken sınıflar arası farklılığın devam etmesi yeterlidir.
- Ölçeklenebilirlik açısından: önerilen yöntem tezdeki uygulamada bir bilgisayar programı tarafından yönetilse de kullanılan VNA cihazının içerisinde, harici olarak programlanabilen bir STM32 ARM Cortex-M3 mikrodenetleyici bulunmaktadır. Lineer DVM gibi makine öğrenmesi sınıflandırıcıları doğrudan STM32 mikrodenetleyicisine gömülebilmektedir. Böylece tüm sistemin hesapsal işlerinin basit bir mikrodenetleyici ile çalışabilmesi mümkündür. Bu da önerilen yöntemi ölçeklenebilir hale getirmektedir. DPY, bilgisayar gibi "yüksek hesaplama

kabiliyetli" bir cihazla veya basit bir mikrodenetleyici gibi "düşük hesaplama kabiliyetli" olan bir cihazda çalıştırılabilir.

- Hesaplama etkinliği açısından: Destek Vektör Makinesi (DVM) gibi matematiksel olarak basit ve az hesaplama gücü gerektiren karar verme kurallarına sahip makine öğrenmesi sınıflandırıcıları eğitilerek tezde bildirilen sınıflandırma doğruluklarına ulaşılmıştır. Tezde karmaşık veya hesaplama açısından kapsamlı öznitelik çıkarma yöntemleri kullanılmayıp, yalnızca S-parametre ölçümleri öznitelik olarak kullanılmıştır. Tezde geliştirilen DPY devresinin tüm hesaplama yükü iki adımda özetlenebilmektedir: ölçüm verilerini bellekte tutma, ardından sınıflandırıcı karar kuralını çalıştırma.
- Yorumlanabilirlik açısından: DPY, bir dokunma olayını tespit etmek ve kullanıcı vücudunun elektriksel tepkisini elde etmek için S-parametre ölçümüne dayanmaktadır. Önerilen yöntemde, sınıflandırma işleminin vücudun elektriksel yanıtına bağlı olarak gerçekleşmesi hata yapma olasılığını azaltmaktadır. Üstelik normal koşullar altında kullanıcı vücudunun elektriksel yanıtı değişmeyecektir; yalnızca vücudun dielektrik özelliklerinde aşırı değişikliğe neden olan ciddi bir hastalık, kullanıcı vücudunun elektriksel yanıtını etkileyecektir. Veri toplamaya katılanlar farklı duygusal durumlar altında olmalarına rağmen S-parametre ölçümlerinde sınıflar arası karışıklığa sebep olacak herhangi bir durum tespit edilmemiştir. Bu da S-parametrelerinin kullanımını farklı çevresel ve duygusal durumlar için, oldukça uygun, tutarlı ve yorumlanabilir hale getirmektedir.

Tezde anlatılan bilgiler ve elde edilen sonuçların ışığında ileride aşağıda listelenen çalışmaların yapılabileceği değerlendirilmektedir.

- Orta Frekans (Medium Frequency MF) ve Ultra Yüksek Frekans (Ultra High Frequency UHF) bantlarında S-parametre ölçümleri yaparak cinsiyet veya yaş grubu sınıflandırma doğruluğunu arttıracak öznitelikler bulunabilir.
- 1 GHz civarında DPY ile yapılan S-parametre ölçümleri sonucunda cinsiyete göre bir ayrım tespit edilmişti. Ayırt ediciliği arttıracak şekilde UHF ile L frekans bantları için daha uygun bir prob tasarımı yapılabilir.
- Kapasitif kuplaj ile yakında bulunan kullanıcı eli algılanıp hiç dokunma yapmadan kullanıcı cinsiyetini tespit edebilecek çalışmalar yapılabilir. Kullanıcı eliyle sensör

arası mesafe S-parametre ölçümlerini etkileyecektir. Bu etkiyi en aza indirgemek için kullanıcı eliyle sensör arası mesafeyi hesaba katmak gerekecektir.

- Bazı hastalıklar (kemik erimesi gibi) vücudun elektriksel özelliklerinin oldukça etkilemektedir. DPY yaklaşımı bu tip hastalıklara ilişkin bilgi edinilmesinde faydalı olabilir.
- Farklı ortamlarda yeni verilerin toplanması hem istatistiksel güç seviyesini arttıracak (özellikle yaş grubu sınıflandırması için) hem de fazla eğitim verisi gerektiren derin sinir ağlarının eğitilmesi mümkün olacaktır. Derin sinir ağlarını farklı ortamlardan alınan veriler ile eğitme ortamdan bağımsız ve daha iyi genelleme yapan bir sınıflandırıcının elde edilmesine olanak sağlayabilir.
- Kadın ve erkek elinin detaylı ölçümleri alınarak simülasyon programında bir fantomun çizilmesi ve her bir cinsiyet için elektriksel geçirgenliğin geniş bir frekans aralığında tanımlanması en uygun sensör devresinin tasarımını simülasyon ortamında yapılmasına imkân sağlayabilir. Bu sayede zaman ve maliyet tasarruf ederek en uygun frekans aralığı ve iyi algılama yöntemi ilk önce simülasyon ortamında belirlenip sonrasında devre tasarımı yapma mümkün olabilir.

## KAYNAKLAR


Abderrahmane, M. A., Guelzim, I., Abdelouahad, A. A. (2020). Human Age Prediction Based on Hand Image using Multiclass Classification. *2020 International Conference on Data Analytics for Business and Industry: Way Towards a Sustainable Economy, ICDABI 2020*, Sakheer, Bahreyn, 26-27 Ekim 2020.

Acien, A., Morales, A., Fierrez, J., Vera-Rodriguez, R., Hernandez-Ortega, J. (2019). Active detection of age groups based on touch interaction. *IET Biometrics*, *8*(1), 101-108.

Afifi, M. (2019). 11K Hands: Gender recognition and biometric identification using a large dataset of hand images. *Multimedia Tools and Applications*, *78*(15), 20835-20854.

Ahlbom, A., Bergqvist, U., Bernhardt, J. H., Cesarini, J. P., Court, L. A., Grandolfo, M., Hietanen, M., McKinlay, A. F., Repacholi, M. H., Sliney, D. H., Stolwijk, J. A. J., Swicord, M. L., Szabo, L. D., Taki, M., Tenforde, T. S., Jammet, H. P., Matthes, R. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, *74*(4), 494-521.

Alexander, C. K., Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentals of Electric Circuits* (5th Ed.). New York, NY, ABD: McGraw Hill.

Alkhawaldeh, R. S. (2019). DGR: Gender Recognition of Human Speech Using One-Dimensional Conventional Neural Network. *Scientific Programming*, *2019*(1), 7213717.

Alpaydin, E. (2020). *Introduction to machine learning* (4th ed.). Cambridge, MA, ABD: MIT press.

Amayeh, G., Bebis, G., Nicolescu, M. (2008). Gender classification from hand shape. *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, CVPR Workshops*. Anchorage, Alaska, 23-28 Haziran 2008.

Arif, N. H., Faisal, M. R., Farmadi, A., Nugrahadi, D., Abadi, F., Ahmad, U. A. (2024). An Approach to ECG-based Gender Recognition Using Rastgele Orman Algorithm. *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, *6*(2), 107-115.

Aydemir, T., Sahin, M., Aydemir, O. (2021). Gender recognition from PPG signals of people with different blood pressure. *SIU 2021 - 29th IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications, Proceedings*. Online, 9 – 11 Haziran 2021.

Bahari, M. H., McLaren, M., Van Hamme, H., Van Leeuwen, D. A. (2014). Speaker age estimation using i-vectors. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *34*, 99-108.

Bansal, A., Agarwal, R., Sharma, R. K. (2012). SVM Based Gender Classification Using Iris Images. *2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, Mathura, Uttar Pradesh, Hindistan, 3-5 Kasım 2012.

Barrett, G., Omote, R. (2010). Projected-capacitive touch technology. *Information Display*, *26*(3), 16-21.

Basavaraja, V., Shivakumara, P., Guru, D. S., Pal, U., Lu, T., Blumenstein, M. (2019). Age estimation using disconnectedness features in handwriting. *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR*. Sidney, Avustralya, 20-25 Eylül 2019.

Basha, A. F., Jahangeer, G. S. B. (2012). Face Gender Image Classification Using Various Wavelet Transform and Support Vector Machine with various Kernels. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, *9*(6), 150-157.

Bian, S., Liu, M., Zhou, B., Lukowicz, P., Magno, M. (2024). Body-Area Capacitive or Electric Field Sensing for Human Activity Recognition and Human-Computer Interaction: A Comprehensive Survey. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, *8*(1), 1-49.

Bouadjenek, N., Nemmour, H., Chibani, Y. (2015). Age, gender and handedness prediction from handwriting using gradient features. *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR*, Tunus, Tunus, 23-26 Ağustos 2015.

Buriro, A., Akhtar, Z., Crispo, B., Del Frari, F. (2016). Age, gender and operating-hand estimation on smart mobile devices. *2016 International Conference of the Biometrics Special Interest Group (BIOSIG)*, Darmstadt, Almanya, 21-23 Eylül 2016.

Cabra, J. L., Mendez, D., Trujillo, L. C. (2018). Wide machine learning algorithms evaluation applied to ECG authentication and gender recognition. *Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Biometric Engineering and Applications*, Amsterdam, Hollanda, 16-18 Mayıs 2018.

Camalan, S., Sengul, G., Misra, S., Maskeliūnas, R., Damaševičius, R. (2018). Gender detection using 3d anthropometric measurements by kinect. *Metrology and Measurement Systems*, *25*(2), 253-267.

Cascone, L., Nappi, M., Narducci, F., Pero, C. (2022). Touch keystroke dynamics for demographic classification. *Pattern Recognition Letters*, *158*, 63-70.

Ceyhan, E. B., Sağroğlu, Ş., Tatoğlu, S., Atagün, E. (2014). Age estimation from fingerprints: Examination of the population in Turkey. *Proceedings - 2014 13th International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2014*, Detroit, MI, ABD, 3-5 Aralık 2014.

Chapra, S. C., Canale, R. P. (2021). *Numerical Methods for Engineers*, (8th ed.). New York, NY, ABD: McGraw-Hill Education.

Cheng, J., Amft, O., Lukowicz, P. (2010). Active capacitive sensing: Exploring a new wearable sensing modality for activity recognition. *International conference on pervasive computing*, Mannheim, Almanya, 29 Mart - 2 Nisan 2010.

Danisman, T., Bilasco, I. M., Martinet, J. (2015). Boosting gender recognition performance with a fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, *42*(5), 2772-2784.

Dantcheva, A., Elia, P., Ross, A. (2016). What else does your biometric data reveal? A survey on soft biometrics. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *11*(3), 441-467.

Davarci, E., Anarim, E. (2021). Hybrid Architecture for Gender Recognition Using Smartphone Motion Sensors. *2021 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Dublin, İrlanda, 23-27 Ağustos 2021.

Davarci, E., Anarim, E. (2023). Gender Detection Based on Gait Data: A Deep Learning Approach With Synthetic Data Generation and Continuous Wavelet Transform. *IEEE Access*, *11*, 108833-108851.

Dehghan, A., Ortiz, E. G., Shu, G., Masood, S. Z. (2017). DAGER: Deep Age, Gender and Emotion Recognition Using Convolutional Neural Network. *arXiv preprint arXiv:1702.04280*.

Dong, Y., Liu, Y., Lian, S. (2016). Automatic age estimation based on deep learning algorithm. *Neurocomputing*, *187*, 4-10.

Eng, J. (2003). Sample size estimation: How many individuals should be studied? *Radiology*, *227*(2), 309-313.

Erbilek, M., Fairhurst, M., Abreu, M. C. D. C. (2013). Age prediction from iris biometrics. *5th International Conference on Imaging for Crime Detection and Prevention, ICDP 2013*, Londra, Birleşik Krallık, 16-17 Aralık 2013.

Falohun, A. S., Fenwa, O. D., Ajala, F. A. (2016). A Fingerprint-based Age and Gender Detector System using Fingerprint Pattern Analysis. *International Journal of Computer Applications*, *136*(4), 0975-8887.

Foster, K. R., Lukaski, H. C. (1996). Whole-body impedance - What does it measure? *American Journal of Clinical Nutrition*, *64*(3), 388S-396S.

Fu, B., Kirchbuchner, F., von Wilmsdorff, J., Grosse-Puppendahl, T., Braun, A., Kuijper, A. (2019). Performing indoor localization with electric potential sensing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *10*(2), 731-746.

Gabriel, S., Lau, R. W., Gabriel, C. (1996). The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. *Physics in Medicine and Biology*, *41*(11), 2251.

Garain, A., Ray, B., Singh, P. K., Ahmadian, A., Senu, N., Sarkar, R. (2021). GRA_Net: A deep learning model for classification of age and gender from facial images. *IEEE Access*, *9*, 85672-85689.

Guarino, A., Malandrino, D., Zaccagnino, R., Capo, C., Lettieri, N. (2023). Touchscreen gestures as images. A transfer learning approach for soft biometric traits recognition. *Expert Systems with Applications*, *219*, 119614.

Gupta, S., Rao, A. P. (2014). Fingerprint Based Gender Classification Using Discrete Wavelet Transform Artificial Neural Network. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, *3*(4), 1289-1296.

Harrison, C., Sato, M., Poupyrev, I. (2012). Capacitive fingerprinting: Exploring user differentiation by sensing electrical properties of the human body. *UIST'12 - Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Cambridge, MA, ABD, 7-10 Ekim 2012.

Hernandez-Ortega, J., Morales, A., Fierrez, J., Acien, A. (2017). Detecting age groups using touch interaction based on neuromotor characteristics. *Electronics Letters*, *53*(20), 1349-1350.

Hosen, M. R., Hasan, S., Hasan, M. M., Das, R. K. (2015). Age classification based on EMG signal using Artificial Neural Network. *2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEiCT 2015*, Savar, Dakka, Bangladeş, 21-23 Mayıs 2015.

Hossain, M. S., Haberfeld, C. (2020). Touch behavior based age estimation toward enhancing child safety. *IJCB 2020 - IEEE/IAPR International Joint Conference on Biometrics*, Houston, Teksas, ABD, 28 Eylül - 1 Ekim 2020.

Hunt, N., Scott, J., Streeter, L. (2023). Nano Versus Commercial [Educator's Corner]. *IEEE Microwave Magazine*, *24*(4), 88-95.

Jain, A. K., Dass, S. C., Nandakumar, K. (2004). Soft biometric traits for personal recognition systems. *International conference on biometric authentication*, Hong Kong, Çin, 15-17 Temmuz 2004.

Jain, A., Kanhangad, V. (2019). Gender recognition in smartphones using touchscreen gestures. *Pattern Recognition Letters*, *125*, 604-611.

Jamshidi, K., Toosi, R., Akhaee, M. A. (2024). Gender Recognition Based on Hand Images Employing Local and Global Shape Information. *Computer*, *57*(6), 50-61.

Jones, S. R., Carley, S., Harrison, M. (2003). An introduction to power and sample size estimation. Içinde *Emergency Medicine Journal*, *20*(5), 453-458.

Kalafatić, Z., Doždor, Z., Hrkać, T., Brkić, K. (2023). Facial Age Estimation Models for Embedded Systems: A Comparative Study. *IEEE access*, *11*, 14282-14292.

Kaushik, P., Gupta, A., Roy, P. P., Dogra, D. P. (2019). EEG-Based Age and Gender Prediction Using Deep BLSTM-LSTM Network Model. *IEEE Sensors Journal*, *19*(7), 2634-2641.

Kerketta, S. R., Ghosh, D. (2020). Microwave sensing for human bone health evaluation. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *127*, 153469.

Kong, L., Liu, K., Hu, X., Zhang, N., Qi, L., Li, X., & Zhou, X. (2024). Gender Classification Based on Spatio-Frequency Feature Fusion of OCT Fingerprint Images in the IoT Environment. *IEEE Internet of Things Journal*.

Konings, D., Alam, F., Faulkner, N., de Jong, C. (2022). Identity and Gender Recognition Using a Capacitive Sensing Floor and Neural Networks. *Sensors*, *22*(19), 7206.

Kumar, B. A., Misra, N. K. (2024). Masked face age and gender identification using CAFFE-modified MobileNetV2 on photo and real-time video images by transfer learning and deep learning techniques. *Expert Systems with Applications*, *246*, 123179.

Kurban, O. C., Yildirim, T. (2024). A comparative analysis of multi-biometrics performance in human and action recognition using silhouette thermal-face and skeletal data. *Neural Networks*, *170*, 1-17.

Kwon, O. K., An, J. S., Hong, S. K. (2018). Capacitive Touch Systems with Styli for Touch Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, *18*(12), 4832-4846.

Lee, M., Lee, J. H., Kim, D. H. (2022). Gender recognition using optimal gait feature based on recursive feature elimination in normal walking. *Expert Systems with Applications*, *189*, 116040.

Li, M., Han, K. J., Narayanan, S. (2013). Automatic speaker age and gender recognition using acoustic and prosodic level information fusion. *Computer Speech and Language*, *27*(1), 151-167.

Liew, S. S., Hani, M. K., Radzi, S. A., Bakhteri, R. (2016). Gender classification: a convolutional neural network approach. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24*(3), 1248-1264.

Lin, F., Wu, Y., Zhuang, Y., Long, X., Xu, W. (2016). Human gender classification: A review. *International Journal of Biometrics*, *8*(3-4), 275-300.

Liu, H., Lu, J., Feng, J., Zhou, J. (2017). Group-aware deep feature learning for facial age estimation. *Pattern Recognition*, *66*, 82-94.

Liwicki, M., Schlapbach, A., Bunke, H. (2011). Automatic gender detection using on-line and off-line information. *Pattern Analysis and Applications*, *14*(1), 87-92.

Makihara, Y., Mannami, H., Yagi, Y. (2011). Gait analysis of gender and age using a large-scale multi-view gait database. *ACCV 2010: 10th Asian Conference on Computer Vision,* Queenstown, Yeni Zelanda, 8-12 Kasım 2011.

Maki-Kihnia, M. (2021). Profiling soft biometric traits from a gesture-driven mobile game. Yüksek Lisans Tezi, Aalto Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Espoo, Finlandiya.

Mayrovitz, H. N., Grammenos, A., Corbitt, K., Bartos, S. (2016). Young adult gender differences in forearm skin-to-fat tissue dielectric constant values measured at 300 MHz. *Skin Research and Technology*, *22*(1), 81-88.

Memon, M. U., Salim, A., Jeong, H., Lim, S. (2020). Metamaterial inspired radio frequency-based touchpad sensor system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *69*(4), 1344-1352.

Miguel-Hurtado, O., Stevenage, S. V., Bevan, C., Guest, R. (2016). Predicting sex as a soft-biometrics from device interaction swipe gestures. *Pattern Recognition Letters*, *79*, 44-51.

Nexperia, (2021). 74HC4051 - 8-channel analog multiplexer/demultiplexer. *Nexperia*, Rev 12, 1-28.

Nguyen, P., Tran, D., Huang, X., Ma, W. (2013). Age and gender classification using EEG paralinguistic features. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER*, San Diego, Kaliforniya, ABD, 6-8 Kasım 2013.

Oulad-Kaddour, M., Haddadou, H., Vilda, C. C., Palacios-Alonso, D., Benatchba, K., Cabello, E. (2023). Deep learning-based gender classification by training with fake data. *IEEE Access*, *11*, 120766-120779.

Philipp, H. (1999). Charge transfer sensing. *Sensor Review*, *19*(2), 96-105.

Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering* (4th Ed.). Hoboken, NJ, ABD: John Wiley & Sons.

Rumiantsev, A., Ridler, N. (2008). VNA calibration. *IEEE Microwave Magazine*, *9*(3), 86-99.

Sato, M., Poupyrev, I., Harrison, C. (2012). Touché: Enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects. *Conference on Human Factors in Computing Systems – Proceedings*, Austin, Teksas, ABD, 5-10 Mayıs 2012.

Sgroi, A., Bowyer, K. W., Flynn, P. J. (2013). The prediction of old and young subjects from iris texture. *Proceedings - 2013 International Conference on Biometrics, ICB 2013*, Madrid, İspanya, 4-7 Haziran 2013.

Siddiqi, I., Djeddi, C., Raza, A., Souici-meslati, L. (2015). Automatic analysis of handwriting for gender classification. *Pattern Analysis and Applications*, *18*(4), 887-899.

STMicroelectronics. (2016). Design with surface sensors for touch sensing applications on MCUs. *STMicroelectronics*, AN4312, 1-32.

Tapia, J. E., Perez, C. A., Bowyer, K. W. (2016). Gender Classification From the Same Iris Code Used for Recognition. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *11*(8). 1760-1770.

Tolosana, R., Ruiz-Garcia, J. C., Vera-Rodriguez, R., Herreros-Rodriguez, J., Romero-Tapiador, S., Morales, A., Fierrez, J. (2022). Child-Computer Interaction With Mobile Devices: Recent Works, New Dataset, and Age Detection. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, *10*(4), 2042-2054.

Tom, R. J., Arulkumaran, T. (2013). Fingerprint Based Gender Classification Using 2D Discrete Wavelet Transforms and Principal Component Analysis. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, *4*(2), 199-203.

Ulaby, F. T., Ravaioli, U. (2015). *Fundamentals of Applied Electromagnetics* (7th ed.). Upper Saddle River, NJ, ABD: Pearson.

Vatavu, R. D., Anthony, L., Brown, Q. (2015). Child or adult? Inferring Smartphone users' age group from touch measurements alone. *Human-Computer Interaction–INTERACT 2015: 15th IFIP TC 13 International Conference*, Bamberg, Germany, 14-18 Eylül.

Walker, G. (2012). A review of technologies for sensing contact location on the surface of a display. *Journal of the Society for Information Display*, *20*(8), 413-440.

Wiggins, M., Saad, A., Litt, B., Vachtsevanos, G. (2008). Evolving a Bayesian classifier for ECG-based age classification in medical applications. *Applied Soft Computing Journal*, *8*(1), 599-608.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Ahmet, M. N.,** Çelebi, A. T., Urhan, O. (2021). Dokunmatik Butonlarla Dokunma Şekli Algılama, *IMASCON 2021,* Kocaeli, Türkiye, 10-11 Aralık 2021.

**Ahmet, M. N.,** Küçükmanisa, A., Karson, A., Urhan, O. (2024). A Novel Capacitive Touch Sensing Approach and Its Application in Gender Classification. *IEEE Access*, *12*, 157313 - 157328.

**Ahmet, M. N.,** Küçükmanisa, A., Urhan, O. Yüksek Frekanslı Kapasitif Dokunma ile Kişisel Bilgileri Kestirme Sistemi Ve Buna İlişkin Yöntem. Türk Patent Başvuru No:2024/006706. *Türk Patent ve Marka Kurumu*.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Halep'te tamamladı. 2014 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2018 yılında fakülte birincisi olarak mezun oldu. Yüksek Lisans öğrenimini 2018-2020 yılları arasında aynı bölümde tamamladı. 2018-2021 yılları arasında EVSTEK Bilişim şirketinde gömülü sistemler ve işaret işleme alanlarında çalıştı. 2022 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.