2209/A

ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİ ARAŞTIRMA PROJELERİ DESTEK PROGRAMI

SONUÇ RAPORU

PROJE BAŞLIĞI: **ORTOPEDİK EL SORUNLARI İÇİN SENSÖRLÜ ELDİVEN KULLANARAK HAREKET ANALİZİ**

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI: **Hatice İrem AKYÜZ**

DANIŞMANININ ADI: **Doç. Dr. Ahmet ÖZKURT**

İzmir, Mayıs 2026

GENEL BİLGİLER

PROJENİN KONUSU	**Ortopedik El Sorunları için Sensörlü Eldiven Kullanarak Hareket Analizi**
PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI	Hatice İrem Akyüz
DANIŞMANIN ADI	Doç. Dr. Ahmet Özkurt
PROJE BAŞLANGIÇ VE BİTİŞ TARİHLERİ	Eylül 2025 - Mayıs 2026

İçindekiler

GENEL BİLGİLER 2
1. GİRİŞ 5
1.1 Proje Konusu 5
1.2 İnsan Elinin Anatomisi 6
1.3. Veri Eldiveni Teknolojisinin Arka Planı 6
2. RAPOR DÖNEMİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR 7
2.1 Hardware Tasarımı 7
Kullanılan Flex Sensörler 7
Birinci Prototip Eldiven Tasarımı 8
İlk Sistemin Kısıtları 9
İkinci Prototip Eldiven Tasarımı 9
Eldivenin Tekstil ve Mekanik Yapısı 11
2.2 Veri Toplama ve Hareket Sınıfları 11
Birinci Eldiven Hareket Seti 11
Günlük Yaşam Hareketleri 11
Klinik Eklem Hareketleri 11
Birinci Eldiven Veri Toplama Protokolü 12
Birinci Eldiven Model Eğitimi ve Sonuçlar 14
İkinci Eldiven Hareket Seti 16
İkinci Eldiven Veri Toplama Protokolü 17
İkinci Eldiven Model Karşılaştırması 17
3. SONUÇ 19
3.1 Projenin Genel Değerlendirmesi 19
4. ÇIKTILAR 20
4.1 Teknik Çıktılar 20
4.2 Akademik Çıktılar 20
5. PROJE İLE İLGİLİ HARCAMA KALEMLERİ HAKKINDA AYRINTILI BİLGİ 21
6. İMZA 22
7. KAYNAKÇA 23

Şekiller ve Tablolar Listesi

Şekil 1. Sistem Akış Diyagramı 5
Şekil 2. Birinci Prototip **Şekil 3.** İkinci Prototip 6
Şekil 4 İnsan Eli Kinematik Modeli ve Eklem Hareketleri [3] 6
Şekil 5. 5DT Data Glove Ultra [4] 7
Şekil 6. Birinci Prototipte Kullanılan Flex Sensör 7
Şekil 7. İkinci Prototipte Kullanılan Flex Sensör 8
Şekil 8. Sensör Bağlantı Şeması ve Flex Sensör Bükülme Davranışı 8
Şekil 9. ESP32-S2 Mini pin diyagramı 8
Şekil 10. ESP32-WROOM-32E Pin Yerleşim Diyagramı 9
Şekil 11. İkinci Prototip Devre Şeması 10
Şekil 12. El Eklem Bölgeleri ve Flex Sensör Yerleşim Planı (MCP, PIP, DIP) 10
Şekil 13. Tanımlanan El Hareketi Sınıfları: (a) Relax, (b) Fist, (c) Medium Fist, (d) Rock, (e) Call, (f) Victory, (g) Pinch, (h) Opposition Index, (i) Opposition Middle, (j) Opposition Ring, (k) Opposition Pinky, (l) MCP Thumb, (m) MCP Index, (n) MCP Middle, (o) MCP Ring, (p) MCP Pinky 12
Şekil 14. Ham Sensör Verisinin Gri Tonlamalı Görüntüye Dönüştürülmesi (a) Relax, (b) Fist, (c) Medium Fist, (d) Rock, (e) Call, (f) Victory, (g) Pinch, ... 13
Şekil 15. Ham Sensör Verisinin Gri Tonlamalı Görüntüye Dönüştürülmesi (h) Opposition Index, (i) Opposition Middle, (j) Opposition Ring, (k) Opposition Pinky, (l) MCP Thumb, (m) MCP Index, (n) MCP Middle, (o) MCP Ring, (p) MCP Pinky 14
Şekil 16. ResNet50 için doğrulama karmaşıklık matrisi (a), sınıf bazlı metrikler (b) ve test karmaşıklık matrisi (c) 15
Şekil 17. Karmaşıklık Matrisi 16
Şekil 18. İkinci Prototip Eldiven ile Gerçekleştirilen 10 Hareket Sınıfı: (a) Half Fist, (b) Fist, (c) Opposition Index, (d) Opposition Middle, (e) Opposition Pinky, (f) Opposition Ring, (g) Relax, (h) Table Top, (i) Hook, (j) Straight Fist 17
Şekil 19. Normalize Sensör Sinyalleri ve Hareket Görselleri 17
Şekil 20. Sınıflandırıcı Model Karşılaştırması (15 Sensörlü Eldiven) 17
Şekil 21. Random Forest Confusion Matrix ve Sınıf Bazlı F1-Score 18

Tablo 1. Derin Öğrenme Modellerinin Doğrulama ve Test Doğruluk Performansları 15
Tablo 2. CNN Modellerinin Karşılaştırmalı Performansı 15
Tablo 3. İş Paketi Değerlendirmesi 19
Tablo 4. Proje Harcama Kalemleri 21

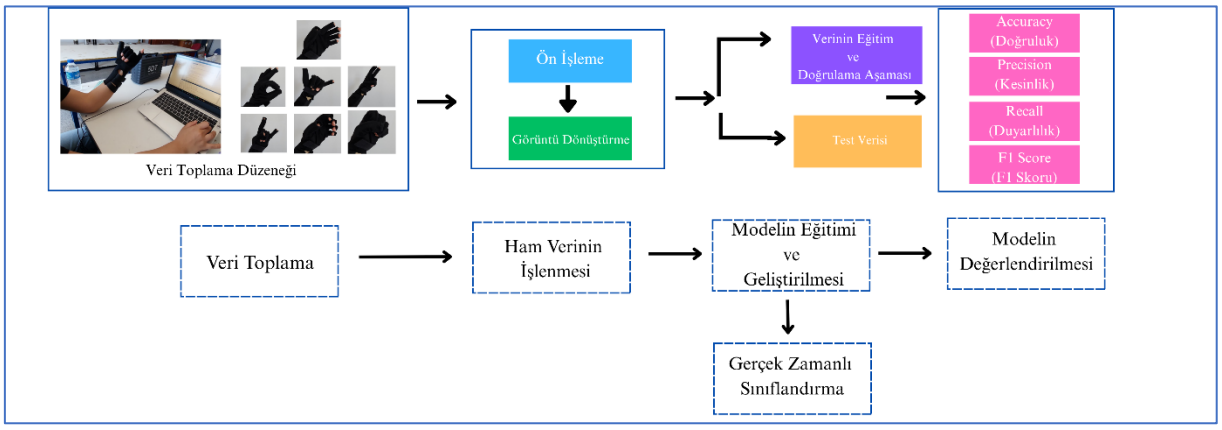
1. GİRİŞ

1.1 Proje Konusu

Bu proje kapsamında, ortopedik el sorunlarının nesnel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla resistif flex sensörler kullanılarak özel tasarım bir veri eldiveni geliştirilmiş ve bu eldivenden elde edilen gerçek zamanlı sensör verileri makine öğrenmesi yöntemleriyle sınıflandırılmıştır.

Projenin donanım geliştirme süreci iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci prototipte, her parmak için birer adet olmak üzere toplam 5 adet flex sensör kullanılmış; sistem mimarisi ESP32-S2 Mini mikrodenetleyici, gerilim bölücü devreler ve MATLAB tabanlı seri haberleşme altyapısı üzerine kurgulanmıştır. İkinci gelişmiş prototipte ise hassasiyeti artırmak amacıyla parmak başına üç eklemi (MCP, PIP, DIP) takip eden toplam 15 sensörlü bir yapıya geçilmiştir. Bu aşamada ESP32-WROOM-32E-H4 birimi üzerinden yüksek çözünürlüklü analog-dijital dönüşüm (ADC) yapılarak veriler analiz edilmek üzere MATLAB ortamına aktarılmıştır. Yazılım tarafında ise bu donanımsal çıktılarla beslenen iki aşamalı bir veri seti protokolü oluşturulmuştur. İlk sistem için 16 el hareketi sınıfını kapsayan toplam 3.096 PNG görüntüsü ve ham zaman serisi verisi sağlıklı gönüllü katılımcılardan kaydedilmiş; ardından geliştirilen ikinci sistem için 10 farklı el hareketi sınıfını kapsayan 2.250 örneklik yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setleri üzerinde sırasıyla CNN tabanlı transfer öğrenme ve geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri uygulanmış; elde edilen modeller üzerinden gerçek zamanlı sınıflandırma (real-time classification) yapılmıştır.

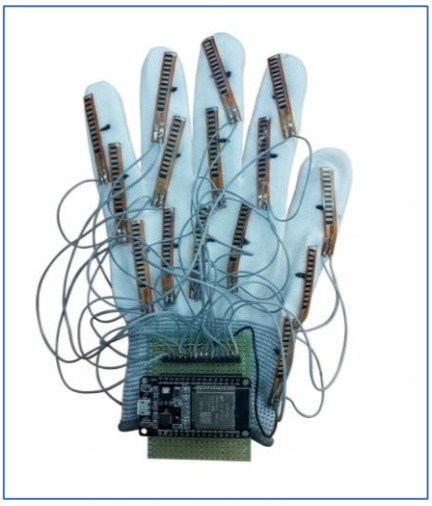
Geliştirilen bu iki aşamalı mimari, kendi içerisinde farklı doğrulama ve analiz süreçlerine tabi tutulmuştur. İlk sistemde, elde edilen verilerin güvenilirliğini saptamak amacıyla ticari bir 5DT Data Glove eş zamanlı referans olarak kullanılmış; böylece prototip verileri ile endüstriyel standarttaki veriler derin öğrenme tabanlı sınıflandırma deneylerinde kıyaslanmıştır. İkinci sistemde ise artırılan serbestlik derecesi sayesinde (MCP, PIP ve DIP ölçümleri), el kinematiği daha hassas bir şekilde modellenmiştir. Bu gelişmiş donanım mimarisi üzerinde, 10 farklı el hareketini kapsayan makine öğrenmesi işlem hattı işletilerek sistemin operasyonel doğruluğu test edilmiştir.



Şekil 1. *Sistem Akış Diyagramı*



Şekil 2. *Birinci Prototip*

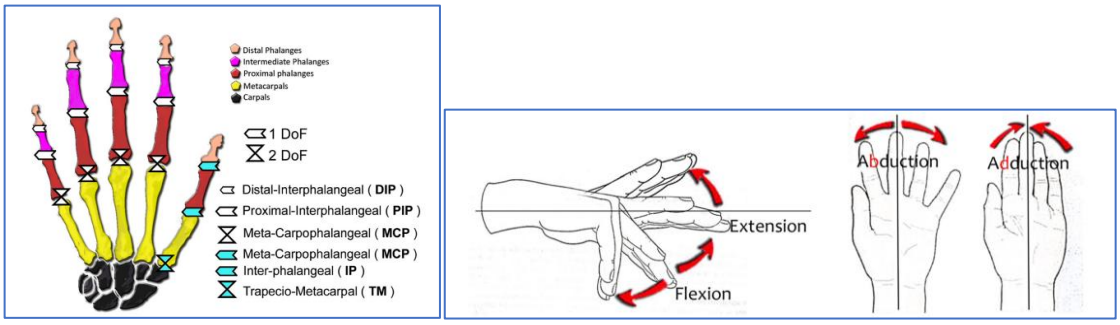


Şekil 3. *İkinci Prototip*

1.2 İnsan Elinin Anatomisi

İnsan eli, basit kavrama hareketlerinden hassas nesnelerin manipülasyonuna kadar geniş bir hareket yelpazesine olanak tanıyan karmaşık bir biyomekanik yapıdır. El; olağanüstü el becerisi ve işlevsellik sağlamak için uyum içinde çalışan 27 kemik, 29 eklem ile kas ve tendon ağından oluşmaktadır [1]. Bu karmaşık yapısı sayesinde el; güç, hassasiyet ve uyum yeteneğini bir arada kullanarak ince cerrahi müdahalelerden ağır yük kaldırmaya kadar pek çok görevi yerine getirebilmektedir.

Elin temel eklemleri arasında Metakarpofalangeal (MCP), Proksimal İnterfalangeal (PIP) ve Distal İnterfalangeal (DIP) eklemleri yer almakta olup bu eklemler; fleksiyon (bükme), ekstansiyon (düzleştirme), abdüksiyon (parmakları açma) ve addüksiyon (parmakları kapatma) gibi temel hareketlerden sorumludur [2]. Bu hareketler, kavrama, sıkıştırma ve yazı yazma gibi günlük yaşam aktiviteleri için vazgeçilmez öneme sahiptir.



Şekil 4 İnsan Eli Kinematik Modeli ve Eklem Hareketleri [3]

1.3. Veri Eldiveni Teknolojisinin Arka Planı

Veri eldivenleri, insan-bilgisayar etkileşiminin (HCI) geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu alandaki en etkili profesyonel çözümlerden biri olan 5DT Data Glove Ultra, parmak hareketlerinin (fleksiyon, ekstansiyon ve abdüksiyon) izlenmesinde yüksek verimlilik sunan bir

sistemdir [9]. Özellikle rehabilitasyon ve terapötik süreçlerde parmak eklemlerinin bükülme hareketlerini dinamik olarak ölçerek hassas kinematik analizler yapılmasına olanak tanır.

Sunulan bu çalışma kapsamında 5DT Data Glove Ultra [4], sunduğu yüksek hassasiyet ve teknik özellikler nedeniyle temel bir referans noktası olarak dikkate alınmıştır. Bu teknoloji, sanal gerçeklik (VR) ile entegre edildiğinde tekrarlayıcı egzersizleri etkileşimli görevlere dönüştürerek hasta motivasyonunu ve tedaviye uyumu artırmaktadır [5]. Bluetooth ve Wi-Fi gibi kablosuz iletişim modülleriyle desteklenen bu tür akıllı sistemler, klinik ihtiyaçlar ile teknolojik ilerlemeler arasındaki boşluğu başarıyla kapatmaktadır [6], [7].



Şekil 5. *5DT Data Glove Ultra [4]*

2. RAPOR DÖNEMİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1 Hardware Tasarımı

Bu projede el hareketlerinin ölçülmesi için flex sensör tabanlı bir veri eldiveni tasarlanmıştır. Donanım geliştirme süreci iki aşamada gerçekleştirilmiştir: birinci prototipte standart uzunlukta 5 flex sensör ve ESP32-S2 Mini, ikinci prototipte ise eklem bölgelerine daha iyi yerleşim sağlamak amacıyla daha kısa boyutlu toplam 15 flex sensör ve ESP32-WROOM-32E-H4 tabanlı özel tasarım bir devre kartı kullanılmıştır.

Kullanılan Flex Sensörler

Her ikisi de aynı çalışma prensibine dayanmaktadır: parmak büküldükçe sensörün direnci artar, bu direnç değişimi voltage divider devresi üzerinden voltaja dönüştürülür ve mikrodenetleyicinin ADC girişlerinden okunur.

Birinci Prototip Sensörü (Standart Uzunluk)

Toplam uzunluğu 112,24 mm, aktif uzunluğu ise 95,25 mm'dir. Düz konumdaki nominal direnci yaklaşık 10 kΩ olup bükülme arttıkça bu değer orantılı biçimde yükselir. Birinci prototipte her parmağa tek sensör yerleştirilmiştir. Ancak sensör uzunluğunun parmak boyunu aşması nedeniyle eklem bölgelerine hassas konumlandırma yapılamamış, bu durum ölçüm çözünürlüğünü sınırlandırmıştır.



Şekil 6. *Birinci Prototipte Kullanılan Flex Sensör*

İkinci Prototip Sensörü (Kısa Model)

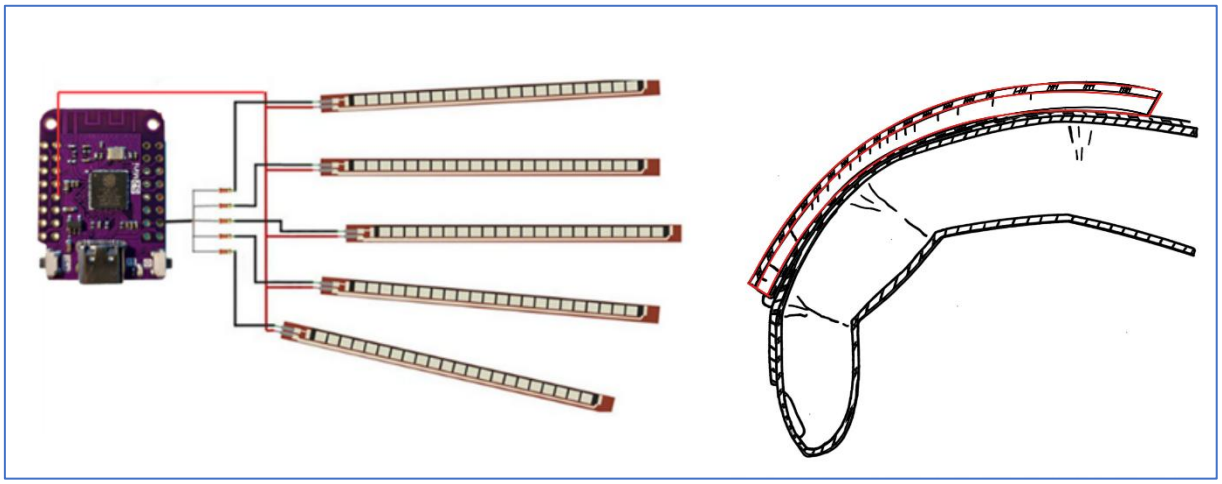
Toplam uzunluğu 73,66 mm, aktif uzunluğu 55,37 mm'dir. Nominal direnci yaklaşık 25 kΩ'dur. Daha kısa yapısı sayesinde sensörler parmak eklem bölgelerine (MCP, PIP ve DIP) ayrı ayrı yerleştirilebilmekte; bu da her eklemi bağımsız olarak ölçmeye olanak tanımaktadır. İkinci prototipte toplamda 15 sensör kullanılmış ve eklem hareketleri çok daha yüksek çözünürlükle temsil edilmiştir.



Şekil 7. *İkinci Prototipte Kullanılan Flex Sensör*

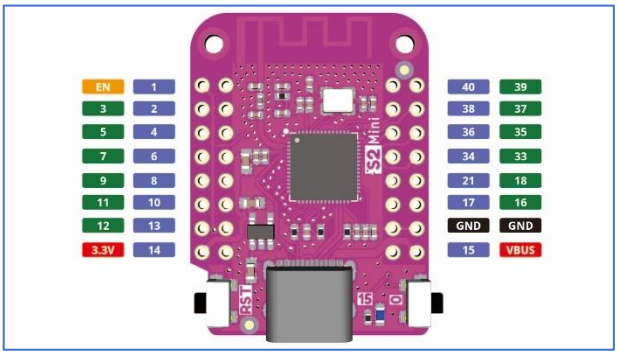
Birinci Prototip Eldiven Tasarımı

Birinci prototipte her parmak için tek bir standart uzunlukta flex sensör kullanılmıştır. ESP32-S2 Mini'ye bağlanan beş sensör, GPIO1–GPIO5 pinleri üzerinden baş parmak, işaret, orta, yüzük ve serçe parmakları temsil edecek biçimde yapılandırılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. *Sensör Bağlantı Şeması ve Flex Sensör Yerleşim Planı*

Birinci prototipte mikrodenetleyici olarak ESP32-S2 Mini kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyici, 240 MHz'e kadar çalışabilen 32-bit LX7 işlemcisi, dahili Wi-Fi desteği ve 12-bit çözünürlüklü ADC birimleriyle veri toplama ve kablosuz iletim görevlerini tek bir platform üzerinde karşılamaktadır. Sistem 3,3V ile çalışmakta olup USB bağlantısı üzerinden beslenmektedir.



Şekil 9. *ESP32-S2 Mini pin diyagramı*

Her bir flex sensör, 10 kΩ'luk sabit bir referans direnciyle voltage divider devresi oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Flex sensörün düz konumdaki nominal direnci de yaklaşık 10 kΩ olduğundan, bu yapılandırma ADC'nin ölçüm aralığını verimli biçimde kullanmaktadır. Parmak büküldükçe sensör direnci artar, buna bağlı olarak bölücü devre çıkışındaki voltaj değişir ve bu değişim mikrodenetleyicinin ADC girişi tarafından okunur. Okunan analog veriler USB üzerinden seri haberleşme (COM port) aracılığıyla MATLAB ortamına aktarılmakta ve burada işlenmektedir.

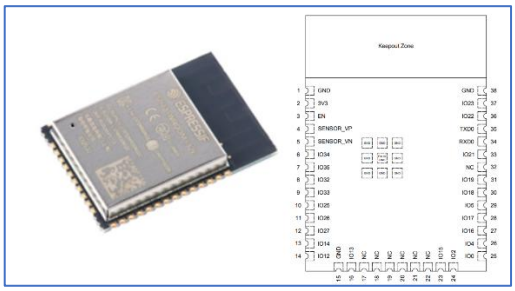
İlk Sistemin Kısıtları

Her parmak için yalnızca tek sensör kullanılması, MCP, PIP ve DIP eklemlerinin bağımsız hareketlerini birbirinden ayırt etmeyi olanaksız kılmaktadır. Örneğin bir parmak MCP ekleminden mi yoksa PIP ekleminden mi büküldüğünde sensör benzer direnç değişimi üretmekte; bu durum eklem bazında kesin kinematik analiz yapılmasını engellemektedir. Tendon kayma egzersizleri gibi farklı eklemlerde eş zamanlı ancak farklı konfigürasyonlar gerektiren hareketler bu mimariyle temsil edilemez.

İkinci Prototip Eldiven Tasarımı

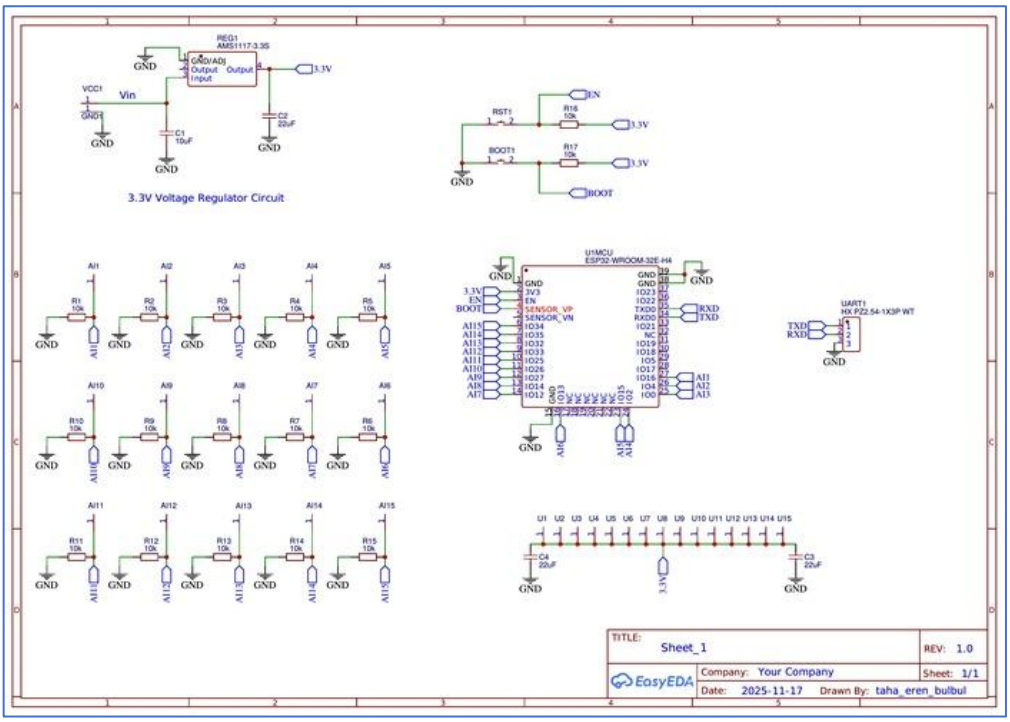
İlk sistemde MCP, PIP ve DIP eklemlerinin birbirinden ayrılamaması ve tendon kayma egzersizlerinin temsil edilememesi, ikinci nesil mimarinin tasarım gerekçesini oluşturmaktadır. İkinci sistemde her parmak için üç flex sensör kullanılarak MCP, PIP ve DIP eklem bölgelerine bağımsız sensör atanmış; toplam sensör sayısı 15'e yükseltilmiştir. Bu mimari, başvuruda öngörülen 10 kanallı yapının ötesine geçerek eklem bazlı kinematik çözünürlüğü artırmıştır.

Artan sensör sayısına ve daha karmaşık devre yapısına uyum sağlamak amacıyla ESP32-WROOM-32E-H4 tabanlı özel bir devre kartı tasarlanmıştır. Bu mikrodenetleyici, 12-bit çözünürlüklü ADC birimleri ve dahili Wi-Fi desteğiyle veri toplama ve iletim gereksinimlerini karşılamaktadır.



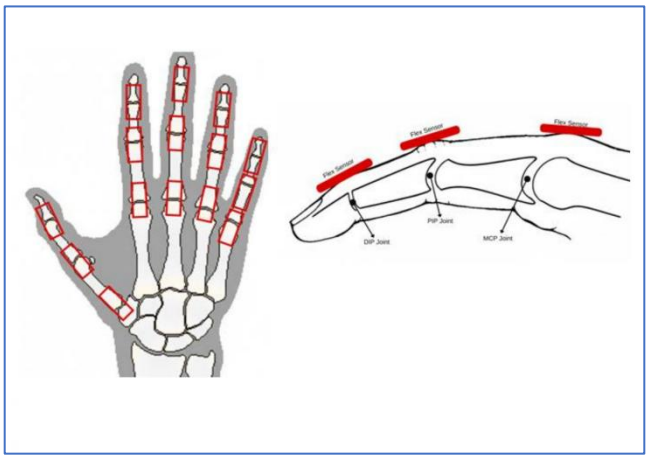
Şekil 10. *ESP32-WROOM-32E Pin Yerleşim Diyagramı*

Devrede kararlı 3,3V çalışma gerilimi sağlamak amacıyla AMS1117-3.3 voltaj regülatörü kullanılmış olup regülatör girişi ve çıkışı destek kapasitörleriyle desteklenmiştir. On beş adet flex sensörün her biri, 10 kΩ'luk sabit referans direnciyle voltage divider devresi oluşturacak şekilde AI1'den AI15'e kadar numaralandırılmış analog giriş pinlerine bağlanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. *İkinci Prototip Devre Şeması*

Sensörler her parmak için MCP, PIP ve DIP eklem bölgelerine karşılık gelecek şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 12). Bu yapı sayesinde her eklemin bükülme hareketi bağımsız olarak ölçülmekte ve el hareketleri çok daha yüksek çözünürlükle temsil edilmektedir.



Şekil 12. *El Eklem Bölgeleri ve Flex Sensör Yerleşim Planı (MCP, PIP, DIP)*

Okunan analog veriler hem USB üzerinden seri haberleşme (COM port) hem de Wi-Fi bağlantısı aracılığıyla MATLAB ortamına aktarılabilmekte; bu iki seçenek kullanım senaryosuna göre tercih edilmektedir.

Eldivenin Tekstil ve Mekanik Yapısı

Eldiven tasarımında kullanıcı konforu ve uzun süreli kullanım ön planda tutulmuştur. Bu doğrultuda nefes alabilen, esnek bir kumaş tercih edilmiş; böylece yoğun kullanımda elin terlemesi ve hareket kısıtlanması engellenmiştir. Kumaşın esnek yapısı, sensörlerin parmak hareketlerini doğal biçimde takip etmesine de olanak tanımaktadır.

Kablolama açısından ise esnek iletken kablolar kullanılmıştır. Bu tercih, tekrarlı parmak hareketleri sırasında bağlantı noktalarına binen mekanik stresi azaltmakta; sensörlerin söküp takılabildiği durumlarda kablo kopması riskini en aza indirmektedir. Kablolar eldiven yapısı boyunca düzenli biçimde yönlendirilmiş ve devre kartına güvenli şekilde bağlanmıştır.

2.2 Veri Toplama ve Hareket Sınıfları

Birinci Eldiven Hareket Seti

Bu çalışmada iki farklı amaç doğrultusunda hareket seti tanımlanmıştır. İlk grup, günlük yaşamda sıkça kullanılan el hareketlerini kapsamakta; ikinci grup ise ortopedik değerlendirme ve rehabilitasyon açısından klinik öneme sahip tekil eklem hareketlerini içermektedir.

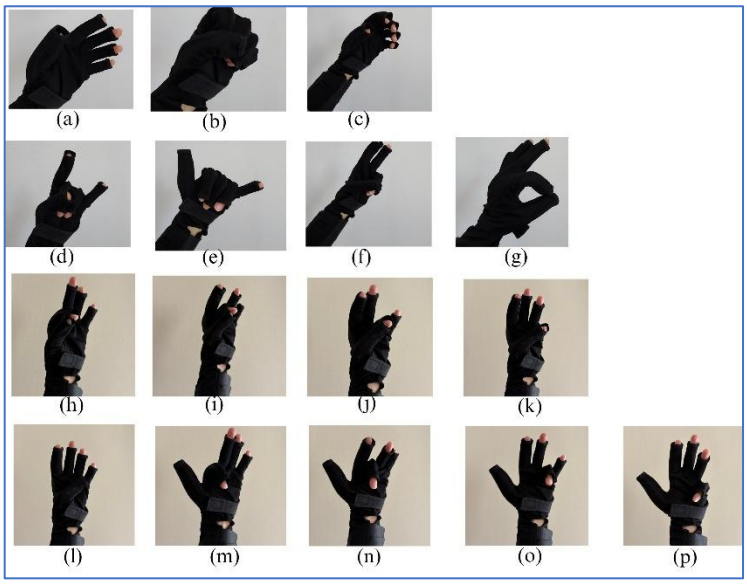
Günlük Yaşam Hareketleri

İlk hareket seti, el fonksiyonunu genel olarak temsil eden 7 sınıftan oluşmaktadır (Şekil 13, a-g):

Bu gruptaki yedi hareket sınıfı şöyle tanımlanmaktadır: Relax, elin tamamen gevşek ve parmakların açık konumda tutulduğu dinlenme pozisyonudur; Fist (Tam Yumruk), tüm parmakların avuç içine doğru tam olarak büküldüğü kapalı yumruk hareketidir; Medium Fist (Yarım Yumruk), parmakların kısmen büküldüğü, tam yumruk ile açık el arasındaki orta pozisyondur; Rock, işaret ve orta parmakların büküldüğü, baş parmak ve serçenin açık kaldığı harekettir; Call, baş parmak ve serçenin uzatıldığı, diğer parmakların büküldüğü telefon hareketidir; Victory (Peace), işaret ve orta parmağın V şeklinde uzatıldığı, diğer parmakların büküldüğü harekettir; Pinch ise baş parmak ve işaret parmağının birbirine doğru yaklaştırıldığı tutma hareketidir.

Klinik Eklem Hareketleri

İkinci hareket seti, parmak eklemlerinin bağımsız hareketlerini değerlendirmek amacıyla tasarlanmış 9 sınıftan oluşmaktadır (Şekil 13, h-p). Ortopedik el muayenesinde MCP, PIP ve DIP eklemlerinin kompozit fleksiyon ölçümü ve hareket açıklığının değerlendirilmesi standart klinik protokollerin temel bileşenlerini oluşturmaktadır [8]; bu çalışmada tanımlanan hareket sınıfları söz konusu klinik testlerden esinlenilerek belirlenmiştir.



Şekil 13. *Tanımlanan El Hareketi Sınıfları: (a) Relax, (b) Fist, (c) Medium Fist, (d) Rock, (e) Call, (f) Victory, (g) Pinch, (h) Opposition Index, (i) Opposition Middle, (j) Opposition Ring, (k) Opposition Pinky, (l) MCP Thumb, (m) MCP Index, (n) MCP Middle, (o) MCP Ring, (p) MCP Pinky*

Opposition hareketleri (Başparmak–parmak ucu dokundurma)

Baş parmağın diğer parmaklarla karşı karşıya getirilmesidir; el fonksiyonunun en temel göstergelerinden biri olup kavrama ve tutma becerisiyle doğrudan ilişkilidir:

Opposition hareketleri dört alt sınıftan oluşmaktadır (Şekil 13, h-k): başparmağın işaret parmağına dokundurulduğu Opposition Index, orta parmağa dokundurulduğu Opposition Middle, yüzük parmağına dokundurulduğu Opposition Ring ve serçe parmağına dokundurulduğu Opposition Pinky.

MCP hareketleri (MCP Eklemin fleksiyon–ekstansiyon)

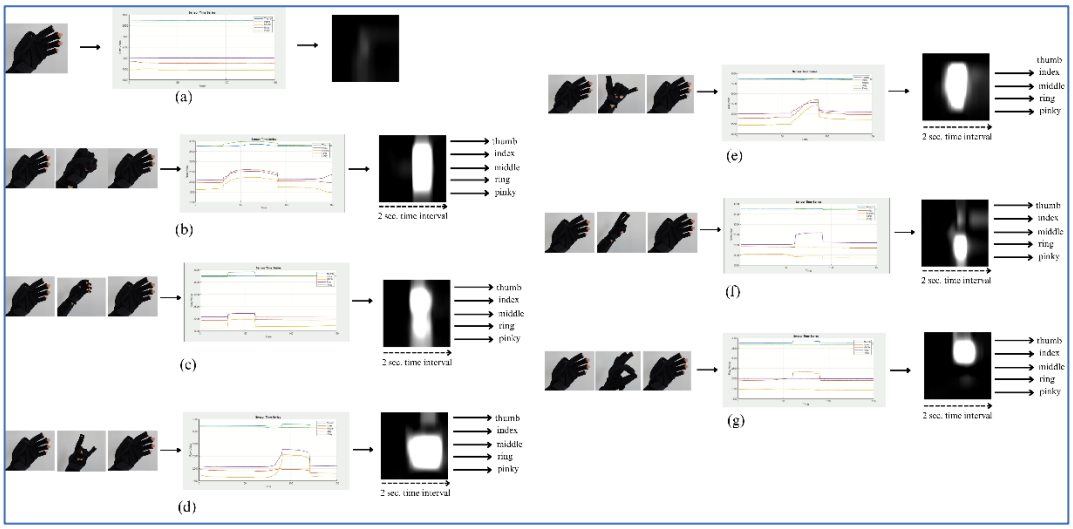
Her parmağın metakarpofalangeal ekleminde gerçekleştirilen izole fleksiyon hareketidir; bu eklemin işlev kaybı günlük yaşam aktivitelerini doğrudan kısıtlamaktadır:

MCP hareketleri beş alt sınıftan oluşmaktadır (Şekil 13, l-p): başparmağın MCP ekleminde gerçekleştirilen fleksiyon–ekstansiyon hareketi olan MCP Thumb, işaret parmağına karşılık gelen MCP Index, orta parmağa karşılık gelen MCP Middle, yüzük parmağına karşılık gelen MCP Ring ve serçe parmağına karşılık gelen MCP Pinky.

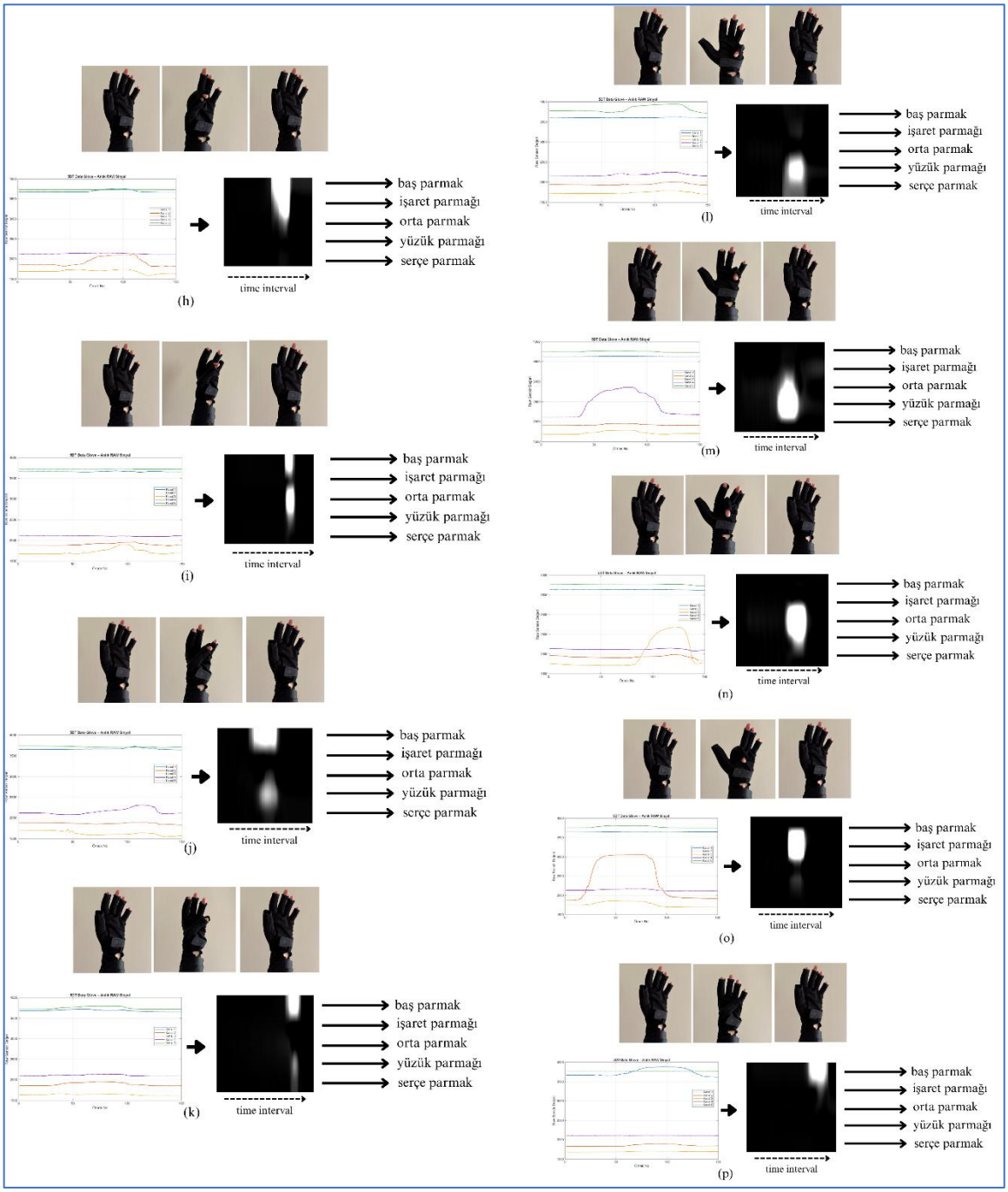
Birinci Eldiven Veri Toplama Protokolü

Veri toplama süreci 7 gönüllü katılımcıyla gerçekleştirilmiştir. Her katılımcı, tanımlanan her hareketi yeterli örnek sayısına ulaşılana kadar tekrarlamıştır. Her tekrar için 5DT Data Glove'un beş sensöründen 150 zaman adımı boyunca veri okunmuş; bu işlem yaklaşık 2 saniyelik bir zaman penceresine karşılık gelmektedir. Sonuç olarak her hareket örneği 5×150 boyutlu bir ham sensör matrisi olarak elde edilmiştir.

Toplanan ham veriler MATLAB ortamında işlenerek 224×224 piksel çözünürlüğünde gri tonlamalı görüntülere dönüştürülmüştür. Bu dönüşümde her sensörün zaman serisi bir satır olarak temsil edilmekte; piksel yoğunluğu bükülme miktarıyla orantılı biçimde artmaktadır. Böylece el hareketi, CNN mimarilerine doğrudan girdi olarak verilebilen görsel bir temsile dönüşmektedir (Şekil 14). Tüm hareket grupları dahil olmak üzere veri setinde toplamda 3096 görüntü yer almaktadır.



Şekil 14. *Ham Sensör Verisinin Gri Tonlamalı Görüntüye Dönüştürülmesi (a) Relax, (b) Fist, (c) Medium Fist, (d) Rock, (e) Call, (f) Victory, (g) Pinch,*



Şekil 15. *Ham Sensör Verisinin Gri Tonlamalı Görüntüye Dönüştürülmesi (h) Opposition Index, (i) Opposition Middle, (j) Opposition Ring, (k) Opposition Pinky, (l) MCP Thumb, (m) MCP Index, (n) MCP Middle, (o) MCP Ring, (p) MCP Pinky*

Birinci Eldiven Model Eğitimi ve Sonuçlar

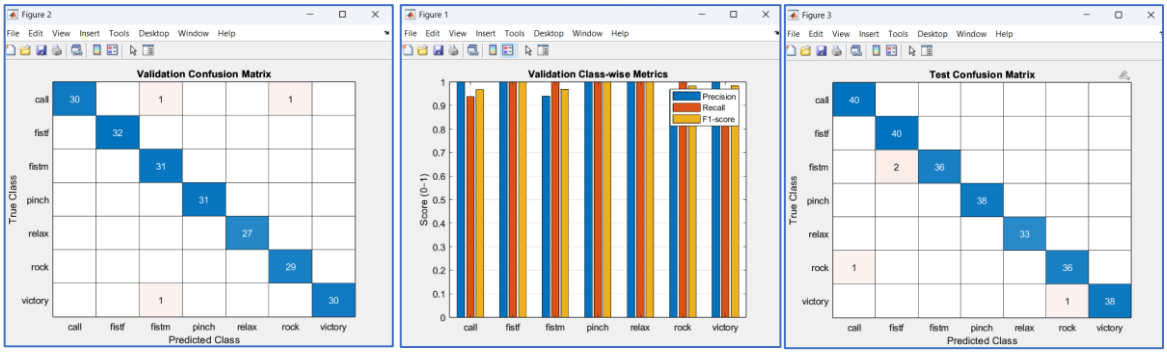
Günlük Yaşam Hareketleri (7 Sınıf)

Birinci eğitimde relax, fistf, fistm, pinch, rock, call ve victory olmak üzere 7 hareket sınıfı kullanılmıştır. Veri seti %80 eğitim, %20 test olarak bölünmüş; AlexNet, GoogLeNet ve ResNet50 mimarileri transfer learning yöntemiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1. *Derin Öğrenme Modellerinin Doğrulama ve Test Doğruluk Performansları*

Model	Validasyon Doğruluğu	Test Doğruluğu
AlexNet	99.53%	97.74%
ResNet50	99.06%	99.25%
GoogLeNet	97.65%	98.49%

En yüksek test doğruluğuna ulaşan ResNet50, fine-tuning yöntemiyle yeniden eğitilmiş ve %99.49 test doğruluğu, 1.00 ortalama precision, recall ve F1 skoru elde edilmiştir (Şekil 16). Bu sonuçlar modelin 7 sınıf için neredeyse hatasız genelleme yaptığını göstermektedir.



(a) *(b)* *(c)*

Şekil 16. *ResNet50 için doğrulama karmaşıklık matrisi (a), sınıf bazlı metrikler (b) ve test karmaşıklık matrisi (c)*

Klinik Eklem Hareketleri (9 Sınıf)

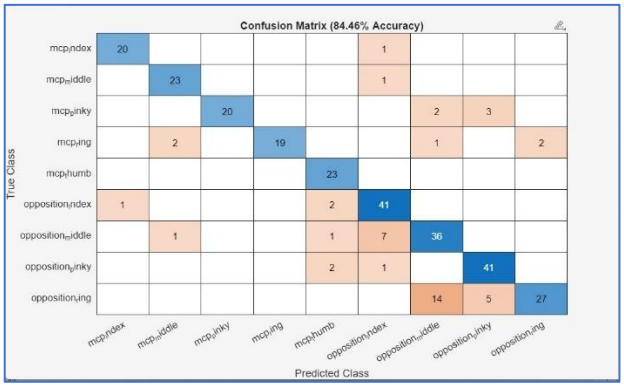
İkinci eğitimde 4 opposition ve 5 MCP hareketi olmak üzere 9 klinik hareket sınıfı kullanılmıştır. Dokuz katılımcıdan toplanan 1990 görüntü %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olarak bölünmüştür. Bu eğitimde GoogLeNet mimarisi kullanılmıştır.

Genel doğruluk %84.46 olarak elde edilmiş olup ortalama precision %87.88, recall %86.14 ve F1 skoru %86.07 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. *CNN Modellerinin Karşılaştırmalı Performansı*

Sınıf	Precision	Recall	F1
opposition_index	0.804	0.932	0.863
opposition_middle	0.679	0.800	0.735
opposition_pinky	0.837	0.932	0.882
opposition_ring	0.931	0.587	0.720
mcp_index	0.952	0.952	0.952

mcp_middle	0.885	0.958	0.920
mcp_pinky	1.000	0.800	0.889
mcp_ring	1.000	0.792	0.884
mcp_thumb	0.821	1.000	0.902



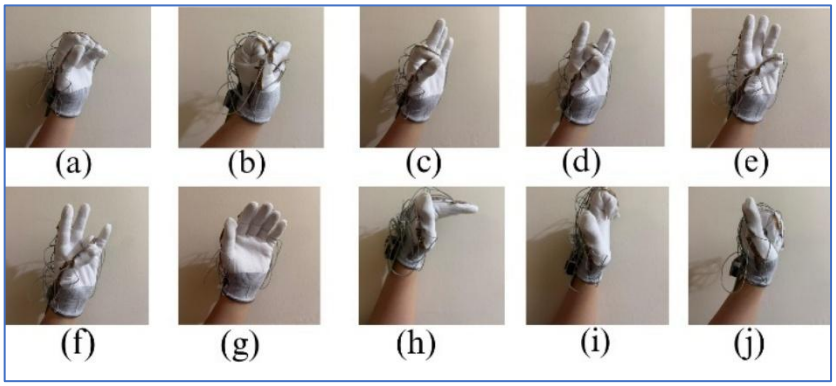
Şekil 17. *Karmaşıklık Matrisi*

MCP hareketleri ortalama %90'ın üzerinde doğrulukla sınıflandırılırken, opposition hareketlerinde özellikle orta ve yüzük parmağı kombinasyonlarında kısmi karışmalar gözlemlenmiştir.

İkinci Eldiven Hareket Seti

İkinci eldiven prototipinde, birinci çalışmada kullanılan hareket setine ek olarak tendon gliding egzersizleri dahil edilmiştir. Toplamda 10 hareket sınıfı tanımlanmıştır (Şekil 18, a-j).

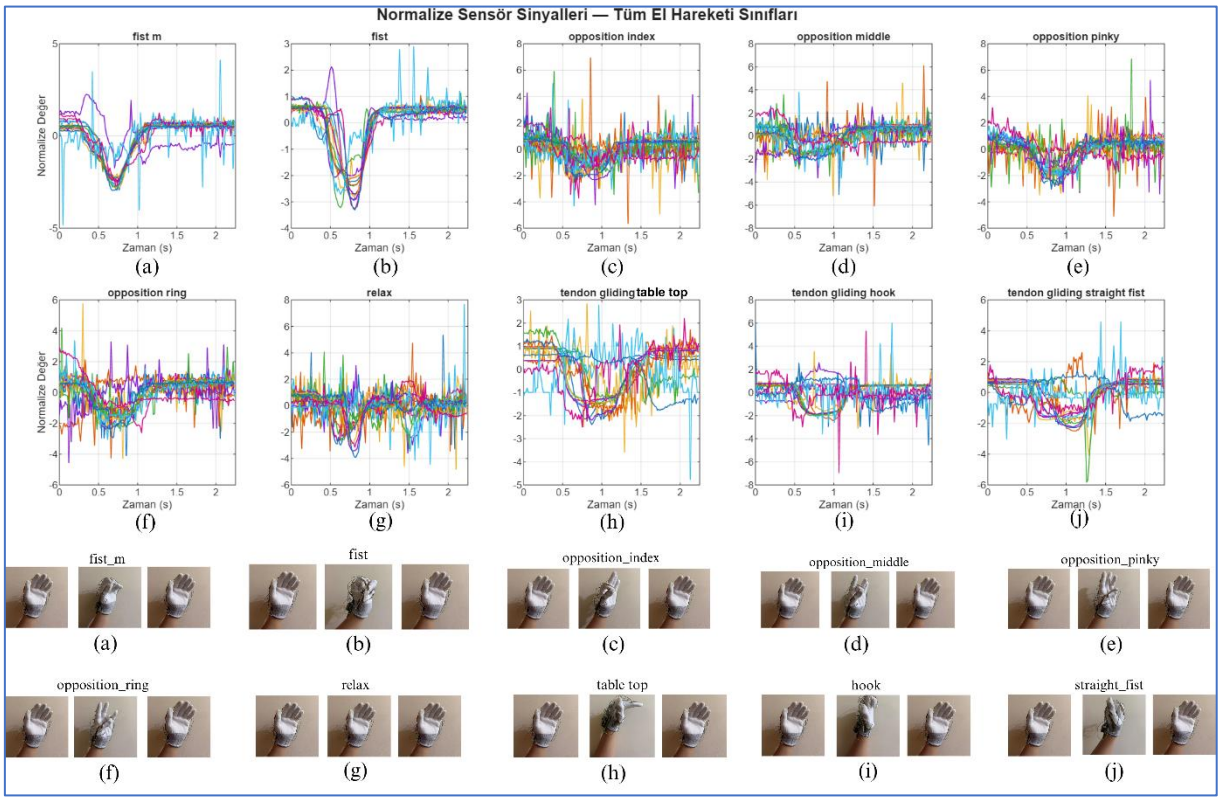
Tendon gliding egzersizleri, karpal tünel sendromu başta olmak üzere çeşitli el patolojilerinin konservatif tedavisinde yaygın olarak kullanılan standart bir rehabilitasyon protokolüdür [9]. Bu çalışmada kullanılan dört tendon gliding pozisyonu şöyle tanımlanabilir: Full Fist pozisyonunda tüm eklemler tam fleksiyona getirilerek kapalı yumruk oluşturulur (Şekil 18, b); Table Top pozisyonunda MCP eklemleri bükülü tutulurken PIP ve DIP eklemleri düz kalır (Şekil 18, h); Hook pozisyonunda PIP ve DIP eklemleri bükülürken MCP eklemleri düz tutulur (Şekil 18, i); Straight Fist pozisyonunda ise parmak uçları avuç içine dokundurulurken PIP eklemleri düz konumda kalır (Şekil 18, j).



Şekil 18. *İkinci Prototip Eldiven ile Gerçekleştirilen 10 Hareket Sınıfı: (a) Half Fist, (b) Fist, (c) Opposition Index, (d) Opposition Middle, (e) Opposition Pinky, (f) Opposition Ring, (g) Relax, (h) Table Top, (i) Hook, (j) Straight Fist*

İkinci Eldiven Veri Toplama Protokolü

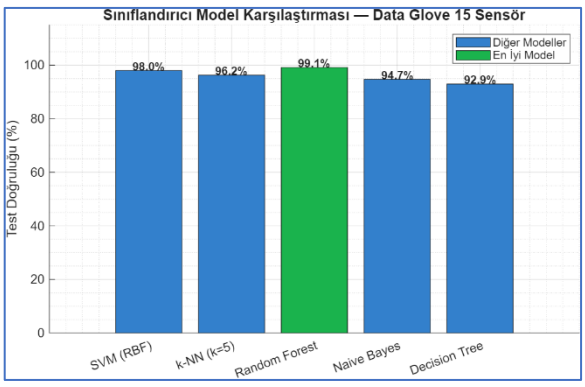
Yedi sağlıklı gönüllü katılımcıdan veri toplanmıştır. Her katılımcı belirlenen 10 hareket sınıfını birden fazla kez gerçekleştirmiş; her kayıt için beş sensör kanalından 150 zaman adımı boyunca ham veri okunmuştur. Ham sensör sinyalleri doğrudan sınıflandırma sürecine girdi olarak kullanılmıştır (Şekil 19).



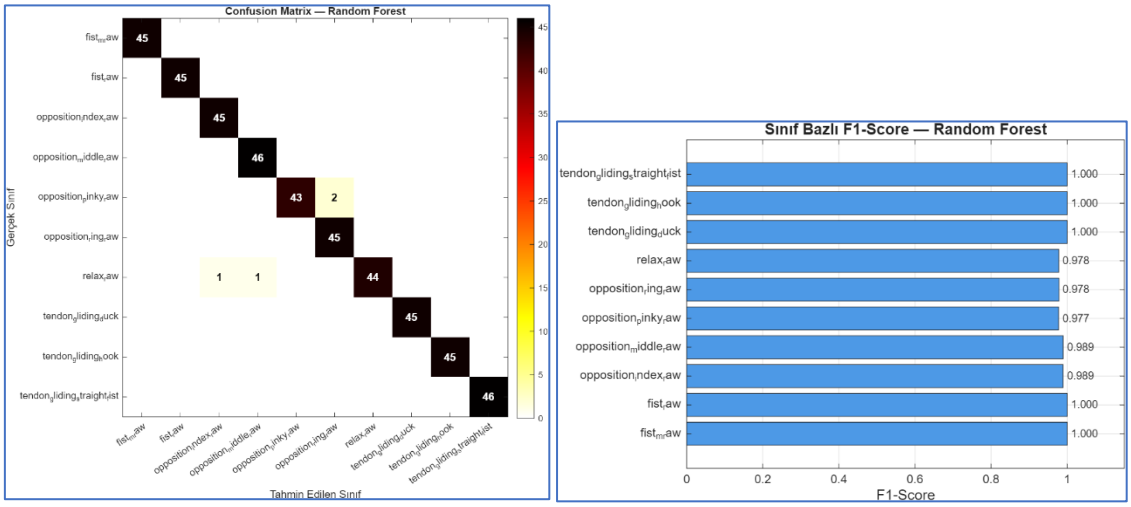
Şekil 19. *Normalize Sensör Sinyalleri ve Hareket Görselleri*

İkinci Eldiven Model Karşılaştırması

Bu çalışmada CNN tabanlı yaklaşım yerine klasik makine öğrenmesi sınıflandırıcıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir: Random Forest, SVM (RBF kernel), k-NN (k=5), Naive Bayes ve Decision Tree. En yüksek test doğruluğuna %99.1 ile Random Forest ulaşmıştır (Şekil 20).



Şekil 20. *Sınıflandırıcı Model Karşılaştırması (15 Sensörlü Eldiven)*



Şekil 21. *Random Forest Confusion Matrix ve Sınıf Bazlı F1-Score*

3. SONUÇ

3.1 Projenin Genel Değerlendirmesi

Bu proje, resistif flex sensör tabanlı bir veri eldiveni geliştirme ve el hareketlerini makine öğrenmesi yöntemleriyle sınıflandırma hedefiyle başlamış; süreç içinde hem donanım hem de yazılım katmanlarında birbirini doğrulayan ve besleyen bir araştırma mimarisine dönüşmüştür. Birinci aşamada geliştirilen 5 sensörlü prototip, ticari referans sistem olan 5DT Data Glove Ultra ile eş zamanlı kullanılarak doğrulanmıştır. İki sistemden elde edilen zaman serisi verilerinin benzer örüntüler sergilemesi, özel tasarım eldivenden toplanan verinin güvenilirliğini ortaya koymuş ve sonraki aşamalar için sağlam bir temel oluşturmuştur. Bu aşamada ResNet50 tabanlı transfer öğrenme pipeline'ı 7 hareket sınıfında %99.49 test doğruluğuna ulaşmıştır.

İkinci aşamada ise birinci prototipin temel kısıtı olan eklem bazlı ayrıştırma sorunu ele alınmıştır. Her parmak için MCP, PIP ve DIP eklemlerine bağımsız sensör atanmasıyla oluşturulan 15 sensörlü mimari, yalnızca sensör sayısını artırmakla kalmamış; klinik açıdan anlamlı hareketlerin sisteme dahil edilmesinin önünü açmıştır. Tendon gliding egzersizleri beş sensörlü yapıda temsil edilmesi mümkün olmayan, ancak karpal tünel sendromu, tenosinovit ve el cerrahisi sonrası rehabilitasyonun temel bileşenlerini oluşturan hareketlerdir. Bu hareketlerin Random Forest sınıflandırıcısıyla F1=1.000 doğruluğuna ulaşması, sistemin klinik kullanım potansiyelini somut biçimde ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, sensör tabanlı el hareketi analizini günlük yaşam jestlerinden eklem bazlı klinik değerlendirmeye taşıyan, iki aşamalı ve karşılıklı doğrulamalı bir araştırma çerçevesi sunmaktadır.

Tablo 3. *İş Paketi Değerlendirmesi*

İP	İş Paketi	Başvuru Hedefi	Gerçekleşen
1	Bileşen Temini	Tüm ekipman	Sensör, ESP32, PCB, tekstil tamamlandı
2	Veri Toplama Yazılımı	10 kanal analog veri	15 kanal
3	Eldiven Tasarımı	Ortalama boy sol ve sağ el	2 nesil prototip
4	Tümleştirme	Eldivenden veri alınması	15 sensör gerçek zamanlı veri akışı
5	Jest Tanıma (≥3)	En az 3 hareket	16 jest sınıfı (Birinci Prototip) + 10 Jest Sınıfı (İkinci Prototip)

4. ÇIKTILAR

4.1 Teknik Çıktılar

- ESP32-S2 Mini tabanlı, 5 flex sensörlü birinci nesil veri eldiveni prototipi
- ESP32-WROOM-32E-H4 tabanlı, MCP–PIP–DIP eklem izleme destekli 15 flex sensörlü ikinci nesil veri eldiveni prototipi
- 5DT Data Glove ile toplanan, 16 el hareketi sınıfını kapsayan 3.096 PNG görüntüsü ve ham zaman serisi verisinden oluşan etiketli veri seti
- İkinci nesil eldiven ile toplanan, 10 el hareketi sınıfını kapsayan 2.250 örneklik dengeli biyomekanik veri seti
- MATLAB tabanlı gerçek zamanlı veri toplama, görselleştirme ve sınıflandırma yazılımı

4.2 Akademik Çıktılar

- DEÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü bitirme projesi
- DEÜ Girişimsel Olmayan Araştırmalar Etik Kurulu onaylı çalışma
- TÜBİTAK 2209-A Sonuç Raporu
- Planlanan: IEEE EMBC veya IEEE Sensors Journal'da 1 bildiri + 1 index makale
- Planlanan: DEÜ FTR Fakültesi ile ADEP projesi — interdisipliner klinik çalışma

5. PROJE İLE İLGİLİ HARCAMA KALEMLERİ HAKKINDA AYRINTILI BİLGİ

Tablo 4. *Proje Harcama Kalemleri*

Malzeme / Hizmet	Kategori	Planlanan (TL)	Gerçekleşen (TL)	Açıklama
Flex Sensör	Teçhizat	—	0	Önceki bir proje kapsamında temin edilmiş sensörler kullanım için paylaşılmıştır.
ESP32-WROOM-32E-H4, ESP32-WROVER-B, ESP32-WROVER-IB	Teçhizat	6.000	1.348,51	Farklı modeller deneme amaçlı temin edilmiş; nihai sistemde ESP32-WROOM-32E-H4 kullanılmıştır
Epoksi Çift Taraflı PCB (5×7 cm)	Sarf	2.000	0	Kendin yap ile ikame edildi
Tekstil, kablo, konnektör	Sarf	1.000	0	Laboratuvar stoğundan
TOPLAM	—	9.000	1.348,51	

6. İMZA

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI – SOYADI – İMZA	DANIŞMANIN ADI – SOYADI – İMZA
Hatice İrem Akyüz İmza: _____ Tarih: _____	**Doç. Dr. Ahmet Özkurt** İmza: _____ Tarih: _____

7. KAYNAKÇA

[1] Z. Lou, L. Li, L. Wang, and G. Shen, “Recent progress of self-powered sensing systems for wearable electronics,” Small, vol. 13, no. 1701791, 2017.

[2] M. Caeiro-Rodríguez, I. Otero-González, F. A. Mikic-Fonte, and M. Llamas-Nistal, “A Systematic Review of Commercial Smart Gloves: Current Status and Applications,” Sensors, vol. 21, no. 2667, pp. 1–31, 2021.

[3] B. K. Murad and A. H. H. Alasadi, “Advancements and Challenges in Hand Gesture Recognition: A Comprehensive Review,” Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering, Early View, Dec. 2024.

[4] Fifth Dimension Technologies, “5DT Data Glove Ultra Manual,” Version 1.3, 2011.

[5] P. J. Ezigbo et al., “Hand Gesture Recognition and Control for Human-Robot Interaction

[6] K. Senthil, “Implementation of IoT Based Smart Assistance Gloves for Disabled People,” 7th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst., 2021.

[7] “Kernel PCA-Based Gesture Recognition,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 2023

[8] Cooper, C. (2020). Clinical Examination of the Hand. In C. Cooper (Ed.), Fundamentals of Hand Therapy: Clinical Reasoning and Treatment Guidelines for Common Diagnoses of the Upper Extremity (3rd ed.). Elsevier. Retrieved from https://musculoskeletalkey.com/clinical-examination-of-the-hand/

[9] Nazarieh, M., Hakakzadeh, A., Ghannadi, S., Maleklou, F., Tavakol, Z., & Alizadeh, Z. (2020). Non-Surgical Management and Post-Surgical Rehabilitation of Carpal Tunnel Syndrome: An Algorithmic Approach and Practical Guideline. Asian Journal of Sports Medicine, In Press. https://doi.org/10.5812/asjsm.102631