



T.C.

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FİTNESS EGZERSİZLERİNİN GERÇEK ZAMANLI
DOĞRULUK KONTROLÜ**

Ebubekir DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Serhat KILIÇARSLAN

HAZİRAN 2025

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FİTNESS EGZERSİZLERİNİN GERÇEK ZAMANLI
DOĞRULUK KONTROLÜ**

Ebubekir DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Serhat KILIÇARSLAN

HAZİRAN 2025

ONAY

Ebubekir DOĞAN tarafından hazırlanan “Fitness Egzersizlerinin Gerçek Zamanlı Doğruluk Kontrolü” adlı tez çalışması 16/06/2025 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedİ Eylöl Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Serhat KILIÇARSLAN (BANÜ)

(Danışman)

Doç. Dr. Bekir ÇAR (BANÜ)

(Üye)

Doç. Dr. Kemal ADEM (SCÜ)

(Üye)

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Serhat DUMAN

Enstitü Müdürü

**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ
EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI**

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “Fitness Egzersizlerinin Gerçek Zamanlı Doğruluk Kontrolü” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim.
16/06/2025

Ebubekir Doğan
İmza

ÖNSÖZ

Teknolojinin gelişimi, spor ve fitness alanında büyük bir dönüşüm yaratmıştır. Modern antrenman yöntemleri, bireylerin fiziksel performanslarını daha verimli şekilde geliştirmelerine olanak tanırken, hareket doğruluğunu artırmaya yönelik sistemler, egzersizlerin daha güvenli ve etkili olmasını sağlamaktadır. Sporun sağlık üzerindeki olumlu etkileri göz önüne alındığında, doğru yapılan egzersizlerin kas gelişimi, esneklik ve dayanıklılık açısından kritik bir rol oynadığı görülmektedir. Bu nedenle, hareket analizine dayalı değerlendirmeler, bireylerin egzersizlerini daha bilinçli bir şekilde gerçekleştirmelerine yardımcı olmaktadır.

Görüntü işleme teknikleri, spor ve fitness alanında hareketlerin incelenmesi ve doğruluklarının belirlenmesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Vücut pozisyonlarının tespit edilmesi, antrenman hatalarının giderilmesi ve sporcuların performanslarının detaylı şekilde analiz edilmesi için kullanılan bu yöntemler, bireysel ve profesyonel seviyede büyük avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, dört farklı fitness hareketinin doğruluk analizini yaparak, egzersizlerin daha doğru ve etkili şekilde uygulanmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden başlayarak son aşamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serhat Kılıçarslan'a, Doç.Dr. Ahmet Kurtoğlu'na ve Doç.Dr. Bekir Çar hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan eşim Dr. Sedanur Şentaş Doğan'a ve kıymetli babam Salih ve annem Hanife Doğan'a şükranlarımı sunarım.

Ebubekir DOĞAN

Ankara 2025

ÖZET

Günümüzde fitness ve spor, bireylerin fiziksel ve zihinsel sağlığını destekleyen temel unsurlardan biri haline gelmiştir. Ancak, yanlış uygulanan egzersizler sakatlanmalara yol açabilmekte ve antrenman verimliliğini düşürebilmektedir. Geleneksel yöntemlerde antrenör desteğiyle doğru formun sağlanması mümkün olsa da, bireysel spor yapanlar için bu her zaman erişilebilir değildir. Bu çalışma, hareket doğruluğunu analiz ederek egzersizlerin daha güvenli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır.

Bu doğrultuda, MediaPipe kütüphanesi ve Pose Detection teknolojisi kullanılarak vücut noktalarının koordinatları belirlenmekte, eklem açıları hesaplanarak hareket analizi gerçekleştirilmektedir. Optimizasyon ve istatistiksel yöntemlerle işlenen veriler, anlık geri bildirim sağlayarak egzersizlerin doğruluğunu değerlendirmekte ve bireylere rehberlik etmektedir. Bu çalışma, fitness alanında dijital teknolojilerin entegrasyonunu destekleyerek kişisel antrenör ihtiyacını azaltmakta ve daha geniş bir kullanıcı kitlesine erişilebilir çözümler sunmaktadır. Böylece, bireylerin fiziksel gelişimlerini optimize etmelerine ve uzun vadeli sağlıklı yaşam hedeflerine ulaşmalarına katkıda bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Egzersiz Analizi, Fitness, Form Kontrolü, Poz Tahmini ,Sağlık Teknolojileri

ABSTRACT

Today, fitness and sports have become essential components in supporting individuals' physical and mental well-being. However, improperly performed exercises can lead to injuries and reduce training efficiency. While traditional methods ensure proper form under the supervision of a trainer, this is not always accessible for individuals training alone. This study aims to analyze movement accuracy to enhance the safety and effectiveness of exercises.

To achieve this, the MediaPipe library and Pose Detection technology are utilized to determine body keypoint coordinates, calculate joint angles, and perform movement analysis. Optimized and statistical methods process the obtained data, providing real-time feedback to assess exercise accuracy and guide individuals accordingly. This study supports the integration of digital technologies into the fitness domain, reducing the need for personal trainers and offering accessible solutions to a broader user base. Consequently, it contributes to optimizing individuals' physical development and achieving long-term health goals.

Keywords: Exercise Analysis, Fitness, Form Correction, Pose Estimation, Health Technologies

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ETİK BEYANI	I
ÖNSÖZ.....	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT	IV
İÇİNDEKİLER	V
TABLO LİSTESİ	VIII
ŞEKİL LİSTESİ.....	IX
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tez İçeriği	2
1.2 Tezin Amacı ve Katkısı	2
1.3 Tez Çalışması Organizasyonu	3
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
3.YÖNTEM.....	11
3.1. Görüntü İşleme ve Poz Tahmini	11
3.1.1 Görüntü İşleme Nedir?	11
3.2 Poz Tahmin Teknikleri	12
3.2.1 OpenPose	12
3.2.3 MoveNet	13
3.2.4 BlazePose	14
3.2.5 Mediapipe.....	14
3.2.5.1 MediaPipe’ın Avantajları ve Dezavantajları	15
3.2.5.2 MediaPipe Mimarisi ve Çalışma Prensipleri	16

3.3 Uygulamanın Geliştirilmesi ve MediaPipe'ın Rolü	17
3.3.1 Uygulamanın Geliştirilme Süreci.....	17
3.3.2 Uygulamanın Akış Şeması	18
3.3.3 Veri Girişi ve Ön İşleme	19
3.3.3.1 Poz Tahmini ve Açı Hesaplamaları	19
3.3.4 Hareketin Değerlendirilmesi ve Geri Bildirim Mekanizması	19
3.3.5 İnaktif Süre Takibi ve Kullanıcı Etkileşimi	20
3.3.6 Sonuçların Güncellenmesi ve Görselleştirilmesi.....	20
3.3.7 Sürecin Sonlandırılması.....	20
Sistem Durdurulur: Video akışı durdurulursa veya kullanıcı işlemi sonlandırırsa sistem süreci tamamlar.	20
3.4 Uygulamanın Front-End ve Back-End Mimarisi.....	21
3.5 Uygulamanın Back-End Mimarisi ve .NET Core Entegrasyonu.....	21
3.5.1 Back-End Mimarisi ve API Tasarımı	22
3.5.2. Entity Framework Core ile Veri Yönetimi	22
3.5.3. Yetkilendirme ve Kimlik Doğrulama	23
3.5.4. Back-End ve Front-End Entegrasyonu	23
3.5.5 MediaPipe ile Gerçek Zamanlı Hesaplamalar ve İş Mantığı	24
3.5.5.1. MediaPipe'ın Front-End'de Kullanımı	24
3.5.5.2 Hareketlerin Analizi ve İstatistiksel Sonuçlar	24
3.5.5.3. Hareket Doğruluk Ölçüm Kriteri	25
3.5.5.4 Açı Hesaplama Yöntemleri	26
3.6 Gerçek Zamanlı Geri Bildirim.....	29
4.BULGULAR	30
4.1 Shoulder Press Hareketi	30
4.2 Triceps Extension Hareketi	31

4.4 Biceps Curl Hareketi.....	33
5. TARTIŞMA	35
Çalışmanın Katkıları.....	37
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	38
6.1. Çalışmanın Katkıları.....	38
6.2. Çalışmanın Sınırlamaları	38
6.3. Gelecek Çalışmalar	39
6.4. Sonuç	39
KAYNAKLAR	40

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3-1 : Fitness Hareketlerinin Açısal Analizi.....	26
Tablo 4-1 : Shoulder press hareketine ait açı değerleri.....	31
Tablo 4-2 : Triceps Extension hareketine ait açı değerleri	32
Tablo 4-3 : Squat hareketine ait açı değerleri	33
Tablo 4-4 : Biceps curl hareketine ait açı değerleri	34

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3-1 : OpenPose Vücut Referans Poz İşaretçisi [28]	12
Şekil 3-2 : Detectron2 Vücut Referans Poz İşaretçisi. [29].....	13
Şekil 3-3 : MoveNet Vücut Referans Poz İşaretçisi [31]	14
Şekil 3-4 : MediaPipe Vücut Referans Poz İşaretçisi [32]	15
Şekil 3-5 : Uygulama Akış Şeması	18
Şekil 3-6 - Geçiş Durum Diyagramı.....	25
Şekil 4-1 - Shoulder Press hareketi.....	30
Şekil 4-2 – Tricep Extension hareketi.....	31
Şekil 4-3 – Squat hareketi.....	32
Şekil 4-4 – Biceps Curl hareketi.....	33

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kisaltmalar

Açıklama

AI	:Yapay Zeka (Artificial Intelligence)
API	:Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface)
CPU	:Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
DMD	: Duchenne Kas Distrofisi (Duchenne Muscular Dystrophy)
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EF Core	: Varlık Çerçevesi Çekirdeği (Entity Framework Core)
FPS	: Saniyedeki Kare Sayısı (Frame Per Second)
GPU	: Grafik İşlem Birimi(Graphics Processing Unit)
HPE	: İnsan Poz Tahmini (Human Pose Estimation)
HTTP	: Hipermetin Aktarım Protokolü (Hyper Text Transfer Protokol)
JSON	: Javascript Nesne Gösterimi (Javascript Object Notation)
LINQ	: Dil Bütünleşik Sorgu (Language Integrated Query)
ML	: Makine Öğrenmesi (Machine Learning)
ORM	: Nesne-İlişkisel Eşleme (Object-Relational Mapping)
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error)
UI	: Kullanıcı Arayüzü (User Interface)
YZ	: Yapay Zeka

Simgeler

Açıklama

θ (Theta)	: Açı sembolü
------------------	---------------

1. GİRİŞ

Fitness, bireylerin fiziksel ve zihinsel sağlığını geliştiren, yaşam kalitesini artıran çok yönlü bir kavramdır. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), fiziksel aktivitenin kronik hastalıkların önlenmesi, ruh sağlığının iyileştirilmesi ve genel yaşam süresinin uzatılmasındaki önemini vurgulamaktadır. DSÖ'nün 2022 Küresel Fiziksel Aktivite Durum Raporu'na göre, dünya genelinde yetişkinlerin yaklaşık üçte biri, yani 1,8 milyar kişi, yeterli fiziksel aktivite yapmamaktadır [1]. Düzenli egzersiz, kardiyovasküler hastalıklar, diyabet ve obezite gibi kronik hastalıkların önlenmesinde kritik bir rol oynarken, kas-iskelet sistemini güçlendirerek postüral bozuklukları ve kas kaybını engeller. Ayrıca, fiziksel aktivite, stres, kaygı ve depresyon gibi zihinsel sağlık sorunlarının azaltılmasında da etkilidir. Örneğin, düzenli spor yapmanın stres ve kaygı düzeylerini azalttığı, depresyon semptomlarını hafiflettiği ve genel ruh halini iyileştirdiği gösterilmiştir [2].

Fitness odaklı bir yaşam tarzı benimsemek, bireylerin hem fiziksel hem de zihinsel sağlığını destekleyerek daha kaliteli ve uzun bir yaşam sürmelerine katkıda bulunur. Özellikle yoga, tekvando, pilates gibi disiplinler; esneklik, denge, koordinasyon ve nefes kontrolü üzerinde yoğunlaşarak hem fiziksel hem de zihinsel sağlığı destekleyen unsurlar içermektedir. Ancak, fitness hareketlerinin uygulanışı bireyden bireye değişiklik gösterebilir ve hareketlerin doğru formda yapılmaması sakatlık riskini artırabilir. Geleneksel antrenörler, bireysel gözlem ve deneyimleri doğrultusunda geri bildirim sağlarken, bilgisayar tabanlı hareket analiz sistemleri eklem noktalarının doğruluğunu hassas ölçümlerle değerlendirebilir. Göz kontrollü spor aktivitelerinde ise, özellikle hızlı ve kompleks hareketlerin olduğu tekvando gibi sporlarda anlık geri bildirimin eksikliği, sistemin doğru analiz yapmasını zorlaştırabilir. Buna karşılık, yoga gibi statik ve kontrollü hareketlerin ön planda olduğu sporlarda bilgisayar tabanlı sistemler daha yüksek doğrulukla analiz yapabilir. Bu bağlamda, geleneksel antrenörler ile bilgisayarla görü tabanlı sistemlerin birleşimi, bireylere en doğru form ve teknikle egzersiz yapma fırsatı sunarak fitnessın sağlık üzerindeki olumlu etkilerini en üst seviyeye çıkarabilir.

Fitness ve sağlık sektörlerine bilgisayarlı görü teknolojilerinin entegrasyonu, kişisel antrenman, egzersiz takibi ve form düzeltme gibi birçok alanda önemli

gelişmelere yol açmıştır [3].Özellikle, egzersizlerin doğru şekilde yapılmasını izlemek, kişisel antrenman programları oluşturmak ve kullanıcıların performanslarını değerlendirmek için bilgisayarlı görü tabanlı sistemler giderek daha yaygın bir araç haline gelmiştir [4] .Bu çalışma, fitness alanında MediaPipe kütüphanesini kullanarak yapılan mevcut araştırmaları ve kullanılan yöntemleri kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. MediaPipe'in gerçek zamanlı poz tahmini ve hareket analizi yetenekleri, egzersizlerin doğru formda yapılıp yapılmadığını değerlendirmek için etkili bir çözüm sunmaktadır.

MediaPipe ve OpenCV tabanlı bu çalışmada, gerçek zamanlı egzersiz takip sistemi geliştirilmiştir. Sistem, vücut eklemleri ve açılarını hesaplayarak kullanıcılara egzersiz sırasında anlık geri bildirim sağlar. 33 vücut işaret noktası MediaPipe Pose kullanılarak algılanmış ve OpenCV ile eklem açıları trigonometri yardımıyla hesaplanmıştır. Örneğin, biceps curl hareketinde dirsek açısının 30 derece altına düşmesi "up" pozisyonu olarak değerlendirilmiş ve tekrar sayımı yapılmıştır. Sistem, farklı ışıklandırma ve arka plan koşullarında etkili bir şekilde çalışarak egzersiz formunun iyileştirilmesini sağlamış ve olası sakatlıkları önlemede başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca, bu sistemin düşük maliyetli donanımlarda çalışabilmesi ve kullanıcılara erişilebilir bir çözüm sunması, fitness teknolojisine önemli bir katkı sağlamaktadır. [5]

1.1 Tez İçeriği

Bu çalışmanın içeriğinde, fitness egzersizleri kapsamında gerçek zamanlı kameradan alınan sporcunun görüntüsünü kullanarak MediaPipe kütüphanesi aracılığıyla yapılan hareketlerin analizini yaparak, egzersiz tekrarlarını doğru ve yanlış olarak tespit ederek bireylerin performans analizini yapmak, antrenörler veya kullanıcılar için uzaktan takip altyapısı sağlamaktadır.

1.2 Tezin Amacı ve Katkısı

Bu çalışmanın amacı, fitness hareketlerinin gerçek zamanlı analizi için Google tarafından geliştirilen MediaPipe kütüphanesinin Pose Estimation ve Landmark

Detection yeteneklerini kullanarak, insan vücudunun eklem noktalarını ve hareket dinamiklerini yüksek doğrulukla algılayarak tespit etmektir. Çalışma kapsamında, özellikle biceps curl, shoulder press, triceps extension ve squat gibi temel fitness hareketlerinin açı analizi yapılarak ve kullanıcıya gerçek zamanlı ve sayısal geri bildirimler verilerek yapılan spor aktivitesinin doğru formda yapılmasına ve olası sakatlanmaların önüne geçilmesi üzerine çalışılmıştır. MediaPipe'in hafif ve optimize yapısı sayesinde, düşük kaynak tüketimi ile yüksek performans elde edilmiş ve bu da çalışmanın gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilirliğini artırmıştır [4]. Bu çalışma, fitness hareketlerinin analizi alanında pratik ve ölçeklenebilir bir çözüm önererek literatüre katkıda bulunmaktadır. MediaPipe'in bu tür uygulamalardaki etkinliği, daha önce yapılan çalışmalarda da benzer şekilde vurgulanmıştır. [3]

1.3 Tez Çalışması Organizasyonu

Bu tez çalışması, beş ana bölümden oluşan bir yapı çerçevesinde organize edilmiştir. Bölüm 2'de, önceki çalışmaların genel bir değerlendirmesini sunan kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3'te, fitness hareketlerinin analizi için gerekli olan kütüphanesi ve uygulama içerisinde kullanılan fonksiyonlar ve hareketlerin değerlendirilmesinde kullanılan eklem açısı hesaplama yöntemleri detaylı olarak açıklanmıştır. Bölüm 4'te, uygulamanın performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel analizler sunulmuştur. Bu kapsamda, fitness hareketlerinin doğruluk oranları, tekrar sayım sonuçları ve istatistiksel veriler eklenmiştir. Elde edilen bulgular, yöntemin güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Son bölümde ise, elde edilen bulguların değerlendirildiği tartışma bölümü ve genel çıkarımların sunulduğu sonuç bölümü ile tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, fitness alanında yapılan çalışmalar ele alınarak sırasıyla sunulmuştur. Öncelikle fitness hareketlerinin doğruluğunu analiz eden çalışmalar incelenmiş, ardından hareket tanıma ve performans değerlendirme konularına odaklanan araştırmalara yer verilmiştir. Bu alanda kullanılan teknolojiler, özellikle bilgisayarla görme tabanlı yaklaşımlar açısından değerlendirilmiştir. Literatürde yer alan bu çalışmalar, fitness hareketlerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi konusundaki mevcut durumu anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Kim tarafından yapılan çalışmada (2023), insan hareketlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesi, özellikle bilgisayarlı görü ve hareket tahmini alanında çeşitli uygulamalara olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, “Human Pose Estimation Using MediaPipe Pose and Optimization Method Based on a Humanoid Model” başlıklı çalışma, MediaPipe Pose çözümü ile insansı bir model tabanlı optimizasyon yöntemini bir araya getirerek insan pozu tahminine yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle derinlik belirsizliği sorununu çözmek için, destekleyici ayakların merkezinden sapma kaybı ve eklem açısı dönüş aralığına ilişkin ceza fonksiyonları entegre edilmiştir. Bu yöntem, egzersiz analizi, düşme tespiti ve benzeri birçok uygulama için yeni olanaklar sunmaktadır ve 3D poz tahmini alanında önemli bir ilerleme sağlamaktadır [6].

Yapılan bu çalışmada ise insan hareketlerinin analizi için hem 2D hem de 3D poz anahtar noktalarının ve anatomik referansların birleştirildiği yeni birçok modlu veri kümesi sunmaktadır. Araştırmada, 71 katılımcının 8 farklı hareket sırasında (yürüme, koşma, çömelme, zıplama gibi) oluşturulan 51.051 pozdan oluşan bir veri kümesi oluşturulmuştur. Her bir katılımcının hareketleri 2D poz anahtar noktaları MediaPipe Pose modeli ile tespit edilmiş ve ardından 3D anahtar noktalar doğrusal üçgenleme ile hesaplanmıştır. Bu çalışma, markerless insan hareketi yakalama sistemlerinin doğruluğunu artırmayı hedeflemekte ve ileri seviye biyomekanik analizler için değerli bir kaynak sunmaktadır [7].

Roggio, insan hareketi ve duruş analizi için Pose Estimation Modelleri (PEM) üzerine bir inceleme sunmaktadır. Sistem, MediaPipe, OpenPose ve BlazePose gibi

modelleri analiz ederek rehabilitasyon, spor performansı ve ergonomik uygulamalardaki etkilerini değerlendirmektedir. Modeller, düşük maliyetli ve non-invaziv çözümler sunarak geniş bir erişim olanağı sağlamaktadır. Bu çalışma sayesinde, uzaktan sağlık hizmetleri ve spor bilimlerinde erişilebilir ve bireyselleştirilmiş analizlere olanak sağlamaktadır. Bu tür modellerin daha geniş bir uygulama alanı bulabilmesi için farklı bağlamlara özel optimizasyonlar yapılması gerektiği belirtilmiştir [8].

Latyshev yaptığı bu çalışmada, insan duruş tahmininde kullanılan bilgisayarla görme teknolojilerinin doğruluğunu ve uygulama sınırlamalarını araştırmaktadır. Çalışmada, OpenPose ve MediaPipe modelleri temel alınmış ve bu modellerin 15 ve 18 anahtar nokta üzerinden doğruluk performansları incelenmiştir. Bulgular, OpenPose için 15 anahtar noktadan 11'inin, MediaPipe için ise 18 anahtar noktadan 7'sinin ortalama sapma eşik değerini aştığını göstermiştir. En belirgin sapmalar, ayak ve bilek bölgelerinin tespitinde meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, modellerin yalnızca belirli görevleri yerine getirebildiğini ve insan duruş tahmini için ek rafinasyon gerektirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, özellikle rehabilitasyon, spor performansı analizi ve ergonomi gibi alanlarda, modellerin hem avantajlarını hem de kısıtlamalarını ortaya koymakta ve gelecekteki çalışmalarda odaklanılması gereken noktaları işaret etmektedir [9].

Bagga tarafından yapılan çalışmada (2024), manuel kaldırma görevlerinde kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını (MSD) önlemek için gerçek zamanlı duruş izleme ve risk değerlendirme sistemi geliştirdiklerini bildirmişlerdir. Çalışma, Google MediaPipe kullanılarak gerçek zamanlı duruş analizi ve düzeltici geri bildirim sağlama yeteneğine odaklanılmıştır. MediaPipe tarafından çıkarılan anahtar noktalar sayesinde gerçek zamanlı risk analizi ve geri bildirim mekanizmalarıyla öne çıkarıldığı gözlemlenmiştir [10].

Yapılan bu çalışmada, bilgisayarlı görü teknikleri ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak yoga duruşlarının tespiti ve düzeltilmesine yönelik bir sistem geliştirilmiştir. MediaPipe, OpenCV ve OpenPose çerçevelerinin entegrasyonu ile gerçek zamanlı geri bildirim ve görsel temsiller sağlanmış, kullanıcıların duruş hizalamasını ve formunu iyileştirmeleri hedeflenmiştir. Çalışmada, Adho Mukha Svanasana (Downward-facing Dog Pose), Utkatasana (Chair Pose), Bhujangasana

(Cobra Pose), Sarvangasana (Shoulder Stand Pose) ve Vrikshasana (Tree Pose) gibi temel yoga duruşlarından oluşan bir veri kümesi kullanılmıştır. Sistem, kullanıcıların hatalarını görsel olarak işaretlemiş ve doğru hizalama için gerçek zamanlı yönlendirme sağlamıştır. Sonuç olarak, geliştirilen sistemin yoga uygulamalarının güvenliğini ve etkinliğini artırdığı, bireysel uygulamalarda rehberlik sunarak fiziksel ve zihinsel sağlık üzerinde olumlu katkılar sağladığı gözlemlenmiştir [11].

Bu çalışma, MediaPipe Pose kullanılarak stereo kamera verilerinin birleştirilmesiyle fiziksel egzersizler için 3D poz rekonstrüksiyon algoritmalarının doğruluğunu değerlendirmektedir. Ayrıca, diz ve kalça açılarındaki hata oranlarının (10.7° RMSE) altın standart yöntemlere yakın olduğu ve bu metriklerin hatalı ve doğru egzersizlerin ayırımında yeterli olduğu gösterilmiştir. Monoküler tahminlerden ve basit ortogonal birleştirme yöntemlerinden daha başarılı olan bu yaklaşım, ekonomik ve etkili bir çözüm sunarak fiziksel terapi ve egzersiz denetimi için otomatik değerlendirme sistemlerinin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Gelecekte, biyomekanik modelleme ve sensör verilerinin entegrasyonu ile sistemin kapsamının genişletilmesi hedeflenmektedir [12].

Stereo kamera verilerini birleştirerek 2D insan duruş tahmini (HPE) ile 3D duruş tahmini doğruluğunu artırmayı hedefleyen bir yöntem sunulmuştur. Veri seti olarak CMU Panoptic referans alınmıştır. Araştırmacılar, 31 farklı HD kameradan alınan 2D görüntü verilerini birleştirerek 3D pozları oluşturmak için doğrudan üçgenleme ve sinyal işleme tekniklerinden yararlanmıştır. Çalışma, 3D pozlama doğruluğunu artırmak için iki kamera açısı arasındaki en uygun konumları belirlemeye odaklanmıştır. Çalışma, özellikle kamera açısı bağımlılığını analiz ederek ideal kamera konumlarını belirlemiş ve bu yöntemle elde edilen 3D rekonstrüksiyon sonuçlarının etkileyici doğruluk seviyelerine ulaştığını göstermiştir [13].

Egzersiz yaparken yanlış postürlerden kaynaklanan yaralanmalar, bireylerin fiziksel aktivitelerini olumsuz etkileyebiliyor. Bu problemten yola çıkarak, OpenCV ve MediaPipe kullanılarak geliştirilmiş bir sistem, kullanıcıların vücut açılarının hesaplanmasını ve doğru duruşlarının sağlanmasını hedeflemiştir. Sistem, squat ve şınav gibi temel egzersizlerde anlık geri bildirim sağlayarak kullanıcılara görsel ve işitsel yönergeler sunmuştur. Veri seti olarak, 10 gönüllünün gerçekleştirdiği hareketlerden oluşturulmuş, manuel olarak etiketlenmiş ve sistem temel trigonometrik

hesaplamalarla açı ölçümleri yaparak doğruluğunu test etmiştir. Çalışma, açık kaynaklı araçların kullanıcı dostu çözümler geliştirmedeki önemini vurgulamaktadır [14].

Egzersiz sırasında yanlış form nedeniyle ortaya çıkan yaralanma risklerini en aza indirmeyi amaçlayan PoseRight, kullanıcıların postürlerini analiz eden ve gerektiğinde düzeltmeler yapan bir sistem sunmuştur. MediaPipe BlazePose gibi teknolojileri kullanan sistem, yoga ve spor egzersizlerinde yüksek doğruluk oranları ile dikkat çekmiştir. Çalışmada, Yoga82 ve UCF101 gibi geniş veri setlerinden yararlanılmış, özellikle kullanıcıların ev ortamında profesyonel rehberlik olmaksızın doğru egzersiz yapmalarına olanak tanınmıştır. Bu sistem, düşük maliyetli ve erişilebilir olmasıyla fitness alanında devrim niteliği taşımaktadır [15].

Fitness ve teknoloji entegrasyonunun yükseldiği bir dönemde, Virtual Gym Tracker sistemi, bireylerin ev ortamında güvenli ve etkili egzersiz yapmalarını sağlamak için geliştirilmiştir. MediaPipe araçlarını kullanan bu sistem, squat, plank ve şınav gibi egzersizlerin doğru duruş analizini gerçekleştirmiştir. Yapılan sistem, kullanıcı dostu bir arayüz ile bireylerin performanslarını izlemesine ve gelişimlerini takip etmesine olanak tanımıştır. Sistem, özellikle hatalı egzersizlerin neden olduğu yaralanmaları azaltmak ve kullanıcı motivasyonunu artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Geliştirilen sistemde, yüksek doğru/yanlış duruş tespiti yapmış ve kullanıcıya anlık geri bildirim sağlayarak fitness alanında yenilikçi bir çözüm sunmuştur [16].

Chen ve arkadaşları (2019) tarafından geliştirilen "Fitness Done Right" (FDR) sistemi, plank ve squat gibi egzersizlerde kullanıcıların duruşlarını analiz ederek doğru hareket etmelerini sağlamak amacıyla tasarlanmış bir gerçek zamanlı akıllı egzersiz platformudur. Egzersiz hareketlerini tanımlamak için test görüntüleri ile standart bir veri tabanındaki görüntüler, ağırlıklı Öklid uzaklığı ve açı uzaklığı yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Plank egzersizlerinde sırtın düz olması ve kalça yüksekliğinin dengede tutulması gerektiği, squat egzersizlerinde ise dizlerin 90 derece bükülmesi ve vücut ağırlığının topuklara aktarılması gerektiği vurgulanmıştır. Hatalı duruşlar, standart pozların kilit özellikleriyle kıyaslanarak belirlenmiş ve kullanıcıya gerçek zamanlı düzeltme önerileri sağlanmıştır. Sonuç olarak, sistem, kullanıcıların egzersiz hareketlerini optimize ederek yaralanma risklerini azaltmak ve doğru duruş alışkanlıkları geliştirmek için etkili bir araç olarak tanımlanmıştır [17].

Zhang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmanın amacı, fitness hareketlerinin doğruluğunu tespit etmek için kullanılan yöntemler, teknik detaylar ve sistemin çalışma prensibini ayrıntılı bir şekilde açıklamaktır. Çalışma, bilgisayarlı görü, poz tahmini ve gerçek zamanlı açı analizi tekniklerine dayanmaktadır. İnsan pozunu tahmin etmek için kullanılan birkaç popüler çerçeve arasında OpenPose, AlphaPose, YoloV7 ve MediaPipe gibi kütüphaneler bulunmaktadır. Ancak, CPU üzerindeki yüksek çıkarım hızı ve düşük kaynak tüketimi nedeniyle, insan anahtar noktalarını tahmin etmek için MediaPipe'in Pose işlem hattını kullanmayı tercih ettik. Bu tercih, gerçek zamanlı performans ve hesaplama verimliliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır [3].

Wagh'ın yaptığı bu çalışmada, MediaPipe'in hareket tahminlerini bilinen bir standart olan dokunmatik ekran verileri ile karşılaştırarak, klinik ve araştırma alanlarında kullanımı için potansiyelini incelemiştir. Katılımcılar, bir dokunmatik ekran üzerinde şekil izleme görevi yapmış ve bu sırada hareketleri hem dokunmatik ekran hem de bir video kamera ile kaydedilmiştir. Video kayıtlarından MediaPipe kullanılarak çıkarılan koordinatlar, dokunmatik ekran verileriyle Prokrustes dönüşümleri ve kök ortalama kare hatası (RMSE) üzerinden karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, evde fizik tedavi ve tele rehabilitasyon gibi alanlarda MediaPipe'in kullanımının, hareket analizinin daha erişilebilir hale getirilmesi için umut vadetmektedir [18].

Gowrish ve arkadaşları (2024), MediaPipe ve OpenCV tabanlı bir duruş tahmini sistemi geliştirerek RGB görüntüler üzerinden 3D vücut pozisyonlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlamıştır. Sistem, kullanıcıdan alınan video verileri üzerinde MediaPipe kullanarak vücudun 33 anatomik noktasını tespit etmekte ve OpenCV yardımıyla bu noktalar arasındaki açısal ilişkileri hesaplayarak duruş analizi yapmaktadır. Çalışmada geliştirilen yöntem, farklı ışıklandırma koşullarında ve arka plan gürültüsü olmaksızın yüksek doğrulukta performans göstermiştir. Ancak, sistem temel olarak belirli egzersiz hareketlerinin takibine odaklandığı için, dinamik ve karmaşık hareketler karşısında sınırlı bir genelleme yeteneğine sahiptir. Kullanılan veri seti de daha çok statik ve tekrarlayan hareketlere yöneliktir. Buna rağmen, geliştirilen yöntem kullanıcı dostu arayüzü ve gerçek zamanlı geri bildirim kabiliyeti

sayesinde spor eğitimi, fiziksel rehabilitasyon ve evde egzersiz takibi gibi alanlarda değerli bir araç olarak öne çıkmaktadır. [19].

Ali (2024) yaptığı çalışmada, Duchenne Kas Distrofisi (DMD) ve sağlıklı bireylerin yürüme paternlerini değerlendirmek için işaretçisiz insan poz tahminine dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. 2D ve 3D poz tahmin algoritmaları kullanılarak adım süresi, adım uzunluğu, yürüyüş hızı ve eklem açıları gibi spatiotemporal ve kinematik özellikler analiz edilmiştir. OpenPose ve MeTRAbs algoritmaları, yürüyüş döngüsündeki kritik anatomik noktaların tespiti için kullanılmıştır. YouTube gibi açık kaynaklardan toplanan videolar işlenmiş ve yalnızca bir RGB kamera ile klinik açıdan önemli yürüyüş ölçümlerinin çıkarılabileceği gösterilmiştir. Sonuçlar, yöntemin DMD ve diğer yürüyüş bozukluklarının erken tanı ve izlenmesi için etkili bir araç olabileceğini ortaya koymaktadır [20].

Habibi (2024) koşu kinematiğini inceleyen bu çalışma, MediaPipe ile elde edilen 33 vücut işaret noktasını analiz ederek dört temel koşu duruşunu sınıflandırmıştır. Video kayıtları iPhone 12 Pro Max ile 60 FPS hızında toplanmış ve toplamda 6300 görüntüden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Bu analiz yöntemi sayesinde, laboratuvar ortamlarından bağımsız olarak gerçek koşu verilerini kullanmış ve uzman koçların geri bildirimleriyle valide edilmiştir. Çalışma, koşucuların tekniklerini optimize etmelerine ve potansiyel sakatlık risklerini belirlemelerine yardımcı olacak bir dijital araç geliştirmiştir. Ayrıca, bu yöntemin koşu performansının biyomekanik açıdan optimize edilmesinde önemli bir katkı sunduğu ifade edilmiştir [21].

Ko (2024), bench press, squat ve deadlift gibi üç ana powerlifting egzersizi için gerçek zamanlı duruş düzeltme hizmeti sunmayı amaçlamaktadır. MediaPipe teknolojilerinden yararlanılarak geliştirilen sistem, kullanıcıların yanlış duruş kaynaklı yaralanma risklerini azaltmayı hedeflemektedir. Sistem, kullanıcıların yanlış duruşlarını algılayıp gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak hareket doğruluğunu ve verimliliğini artırmıştır. Özellikle, ayrıntılı geri bildirim mekanizması, eklem açılarındaki sapmaları tespit ederek kullanıcıları anlık olarak yönlendirmektedir. Sonuçlar, bu sistemin hem performans artırma hem de yaralanma önleme konusunda etkili olduğunu ortaya koymuştur [22].

Arya ve arkadaşları (2024) yaptıkları çalışmada, MediaPipe BlazePose çerçevesi kullanılarak rehabilitasyon amaçlı insan duruş tahmini ve hareket analizi gerçekleştirilmiştir. IntelliRehabDS veri setini temel alan bu araştırma, özellikle fizik tedavi ve rehabilitasyon süreçlerinde kullanılabilecek yüksek doğrulukta duruş tahmini yöntemleri geliştirmeyi hedeflemiştir. BlazePose çerçevesi, 33 eklem işaret noktasını kullanarak 2D ve 3D insan duruş tahmini gerçekleştirmiştir. BlazePose, 140 fps işlem hızı ile gerçek zamanlı uygulamalarda dikkate değer bir performans sunmuştur. Sonuç olarak, bu yöntemlerin insan etkinliği tanıma ve hareket analizi alanlarında önemli ilerlemeler sağladığı ortaya koyulmuştur [23].

3.YÖNTEM

3.1. Görüntü İşleme ve Poz Tahmini

3.1.1 Görüntü İşleme Nedir?

Görüntü işleme, dijital görüntülerin elde edilmesi, analizi ve yorumlanmasını sağlayan bir bilgisayar bilimi dalıdır. Temel amacı, görüntüleri belirli algoritmalar aracılığıyla işleyerek, nesne tanıma, sınıflandırma ve özellik çıkarımı gibi işlemleri gerçekleştirmektir [24]. Dijital görüntüler, piksel matrislerinden oluşur ve bu piksellerin değerleri manipüle edilerek belirli desenlerin ve nesnelerin tespiti sağlanır. Görüntü işleme teknikleri, temel olarak gürültü giderme, kenar belirleme, histogram dengeleme, segmentasyon ve özellik çıkarımı gibi aşamalardan oluşur. Bu bağlamda, insan pozu algılama (pose estimation) teknolojileri, bir kişinin vücut duruşunu belirlemek için görüntü işleme teknikleriyle anahtar noktaların (keypoints) çıkarılmasına dayanır. İnsan poz tahmini için yaygın olarak kullanılan beş popüler derin öğrenme tabanlı kütüphane bulunmaktadır ve bu kütüphaneler, özel insan poz tahmin uygulamalarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu kütüphaneler, farklı kullanım senaryolarına uyarlanabilir olup, çeşitli alanlarda hassas ve verimli poz tahmini çözümleri sunmak için tercih edilmektedir [25].

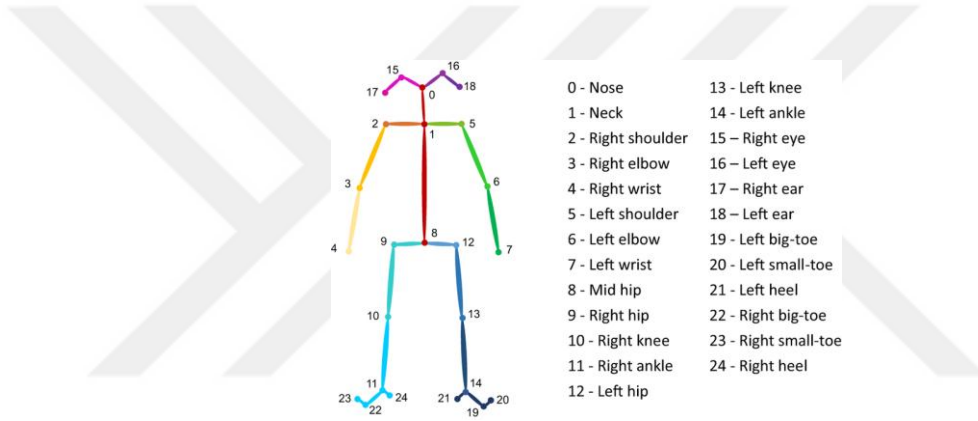
Görüntü işleme, genel olarak şu alt kategorilere ayrılır:

- Görüntü İyileştirme (Image Enhancement): Görüntünün kalitesini artırmak için kullanılır (örneğin, parazit giderme, kontrast artırma).
- Nesne Tanıma (Object Detection): Görüntüdeki belirli nesnelerin tespit edilmesini sağlar.
- Poz Tahmini (Pose Estimation): İnsan vücudundaki eklem noktalarının tespit edilerek vücut pozisyonunun anlaşılmasını sağlar [26].

3.2 Poz Tahmin Teknikleri

3.2.1 OpenPose

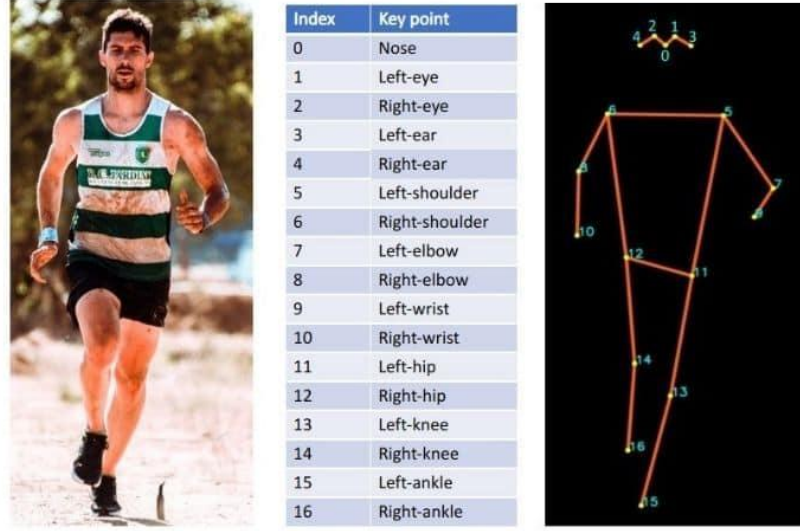
Carnegie Mellon Üniversitesi tarafından geliştirilen OpenPose, çoklu kişi tespiti yapabilen ve insan vücudu, yüz ve el eklemlerini tanımlayabilen bir kütüphanedir. Derin öğrenme tabanlı bir yapı kullanarak 2D ve 3D poz tahmini yapabilmektedir. Ancak, yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle mobil cihazlarda ve gömülü sistemlerde kullanımı sınırlıdır [27].



Şekil 3-1 : OpenPose Vücut Referans Poz İşaretçisi [28]

3.2.3 Detectron2

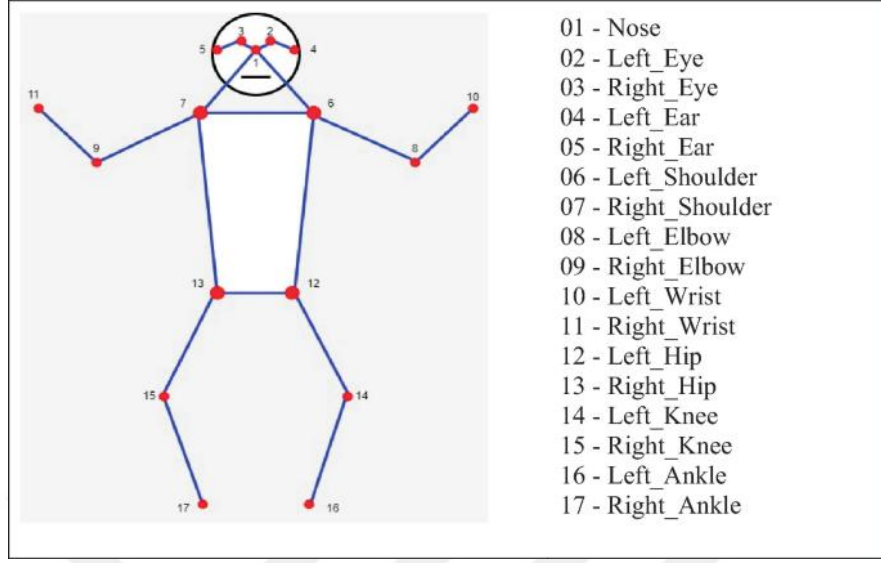
Facebook AI Research (FAIR) tarafından geliştirilen, PyTorch tabanlı bir nesne tespit ve segmentasyon kütüphanesidir. Bilgisayarla görü alanında çeşitli görevler için kullanılan bu kütüphane, nesne algılama, örnek tabanlı segmentasyon, semantik segmentasyon ve insan poz tahmini gibi işlemleri gerçekleştirebilir. Bu sistem, omuzlar, dirsekler ve dizler gibi 17 temel eklem noktasını tespit edebilir. Böylece insan hareketlerinin ve vücut duruşlarının detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır.



Şekil 3-2 : Detectron2 Vücut Referans Poz İşaretçisi. [29]

3.2.3 MoveNet

Google tarafından geliştirilen ve gerçek zamanlı insan vücut duruş tahmini için optimize edilmiş bir derin öğrenme modelidir. Özellikle mobil cihazlar ve donanım kısıtlamalarına sahip ortamlarda, yüksek doğruluk ve düşük gecikme süresi sunmak üzere tasarlanmıştır. Model, insan vücudundaki 17 temel eklem noktasını (burun, gözler, kulaklar, omuzlar, dirsekler, bilekler, kalçalar, dizler ve ayak bilekleri) tespit edebilmesi sayesinde çeşitli hareket analizi uygulamalarında kullanılabilir. (Grover, 2022). İki farklı sürüme sahiptir: Lightning ve Thunder. Lightning versiyonu, hafif yapısı sayesinde mobil ve düşük güç gerektiren cihazlar gibi performans açısından uygunken, Thunder versiyonu daha yüksek doğruluk ve performans sağlamak amacıyla geliştirilmiştir [30].



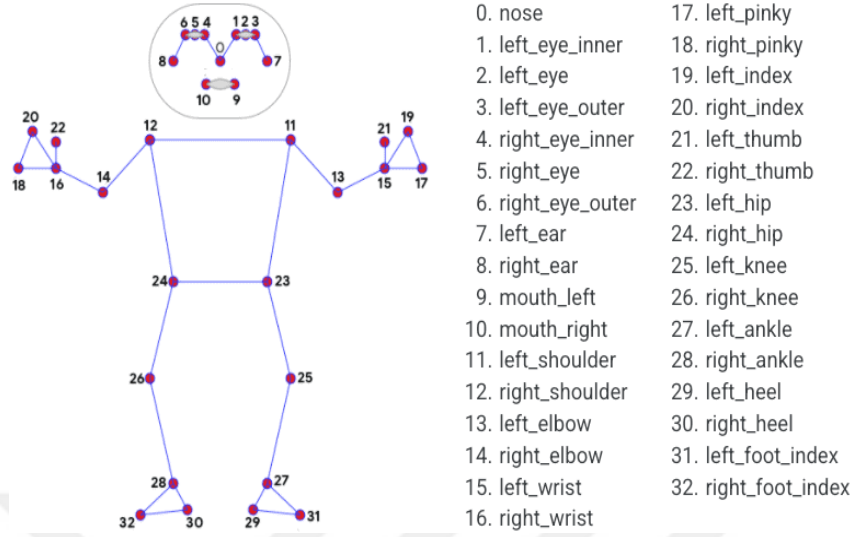
Şekil 3-3 : MoveNet Vücut Referans Poz İşaretçisi [31]

3.2.4 BlazePose

Google'ın Mediapipe kütüphanesi içerisinde bulunan BlazePose, yüksek doğruluklu vücut pozunu tahmini yapabilen ve özellikle fitness ve spor analizlerinde kullanılan bir modeldir. Geleneksel yöntemlere göre 33 anahtar noktayı kullanarak daha detaylı analizler yapılmasını sağlamaktadır [3].

3.2.5 Mediapipe

Google tarafından geliştirilen MediaPipe, gerçek zamanlı makine öğrenimi tabanlı bilgisayarla görme (computer vision) ve işaret işleme (signal processing) çözümleri sunan bir çerçevedir [4]. PoseNet gibi geleneksel derin öğrenme tabanlı yöntemlerin aksine, MediaPipe, hafif ve optimize edilmiş boru hatları (pipelines) kullanarak cihaz üzerinde çalışabilen, düşük gecikmeli ve yüksek verimli hareket algılama, yüz tanıma ve el takibi gibi görevleri gerçekleştirebilir. MediaPipe Pose, insan vücut duruşunu anlamak için kullanılan bir bileşen olup, BlazePose modeli ile yüksek doğruluklu pose estimation (duruş tahmini) sunar [3].



Şekil 3-4 : MediaPipe Vücut Referans Poz İşaretçisi [32]

3.2.5.1 MediaPipe'in Avantajları ve Dezavantajları

Google tarafından geliştirilen açık kaynaklı bir framework olan MediaPipe, bilgisayarla görü (computer vision) ve makine öğrenmesi tabanlı uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle el, yüz, vücut ve nesne tespiti gibi alanlarda gerçek zamanlı performans sunarak, geliştiricilere minimal gecikme ile yüksek doğrulukta analiz yapma imkânı tanımaktadır. MediaPipe'in en büyük avantajlarından biri, çapraz platform desteği sağlamasıdır; Android, iOS, web ve masaüstü ortamlarında çalışabilmesi, onu esnek bir çözüm hâline getirmektedir [4]. Ayrıca, optimize edilmiş tespit ve takip algoritmaları sayesinde GPU veya TPU kullanımı olmadan dahi tatmin edici bir performans sunabilmesi, düşük güçlü cihazlarda bile uygulanabilirliğini artırmaktadır. Özellikle, önceden eğitilmiş modelleri ile anlık hareket tespiti ve segmentasyon süreçlerini kolaylaştırarak, geliştiricilerin model eğitme sürecine zaman harcamadan doğrudan entegrasyon yapmasına olanak tanımaktadır.

Bununla birlikte, MediaPipe'in bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle, özelleştirme açısından sınırlamalar barındırmaktadır; mevcut modelleri değiştirmek veya yeni veri kümeleri ile eğitmek, diğer açık kaynaklı framework'lere kıyasla daha zorlayıcı olabilir. Örneğin, TensorFlow veya PyTorch ile geliştirilen özel modellerin MediaPipe ile entegrasyonu, ek optimizasyon gerektirebilir. Ayrıca,

MediaPipe'in belirli senaryolarda yüksek doğruluk oranına ulaşabilmesi için aydınlatma koşulları ve kamera açısı gibi çevresel faktörlere duyarlılığı bulunmaktadır. Örneğin, düşük ışık koşullarında veya karmaşık arka planlara sahip ortamlarda el ve yüz tespiti gibi işlemlerin doğruluğunda düşüşler gözlemlenebilir [3]. Bunun yanı sıra, açık kaynaklı olmasına rağmen, belgelemelerinin bazı bölümlerinin yetersiz kalması ve güncellemelerinin belirli periyotlarla sınırlı olması, gelişmiş projelerde kullanımını zorlaştırabilmektedir.

Sonuç olarak, MediaPipe, gerçek zamanlı bilgisayarla görü uygulamaları geliştirmek isteyenler için güçlü bir araç sunarken, özellikle özelleştirme ihtiyacı duyan geliştiriciler açısından belirli sınırlamalar barındırmaktadır. Performans, platform desteği ve kullanım kolaylığı gibi faktörlerde avantaj sağlayan bu framework, özelleştirme ve belirli çevresel faktörlere duyarlılık konularında geliştirilmesi gereken yönlerde sahiptir.

3.2.5.2 MediaPipe Mimarisi ve Çalışma Prensibi

MediaPipe'in temelinde, veri akışlarını işlemek için kullanılan işlem grafikleri (computational graphs) yatmaktadır. Bu grafikler, verilerin bir dizi işlem adımından geçerek sonuçların üretilmesini sağlayan yapısal bir model sunar. MediaPipe'in çalışma prensibi, birbirine bağlı bileşenlerden oluşan bu grafikler üzerine inşa edilmiştir. İlk olarak, veri kaynakları (input sources), framework'ün işleyeceği ham veriyi sağlar. Bu kaynaklar, kamera akışları, mikrofon verileri, dosya sistemleri veya diğer sensörler olabilir. Örneğin, bir video akışı veya gerçek zamanlı kamera verisi, MediaPipe'in temel girdi kaynaklarından biridir. Bu veriler, işlem grafiğine aktararak, bir dizi işlem adımından geçer.

İşlem grafiği, düğümler (nodes) ve kenarlar (edges) olarak adlandırılan iki temel bileşenden oluşur. Her düğüm, belirli bir işlemi temsil ederken, kenarlar bu işlemler arasındaki veri akışını tanımlar. Örneğin, bir el takibi uygulamasında, ilk düğüm görüntüyü alır, ikinci düğüm görüntüyü işler ve üçüncü düğüm el pozisyonlarını tespit eder. Bu süreçte, veriler paketler (packets) halinde işlenir. Her paket, belirli bir zaman damgasına sahip veri birimidir ve bu yaklaşım, gerçek zamanlı uygulamalarda veri senkronizasyonunu sağlar.

Ayrıca, işlem grafiğindeki her düğüm, bir hesap ünitesi (calculator) tarafından temsil edilir. Hesap üniteleri, girdi verilerini işleyerek çıktı üreten temel işlem birimleridir. Örneğin, bir görüntü işleme hesap ünitesi, görüntüyü filtreleyebilir veya nesne tespiti yapabilir.

MediaPipe'in bir diğer önemli özelliği, çapraz platform desteği sunmasıdır. Framework, Android, iOS, Linux, macOS ve web gibi çeşitli platformlarda çalışabilir. Bu esneklik, geliştiricilere farklı ortamlarda uygulama geliştirme imkanı sunar ve MediaPipe'ı birçok proje için ideal bir seçenek haline getirir.

3.3 Uygulamanın Geliştirilmesi ve MediaPipe'in Rolü

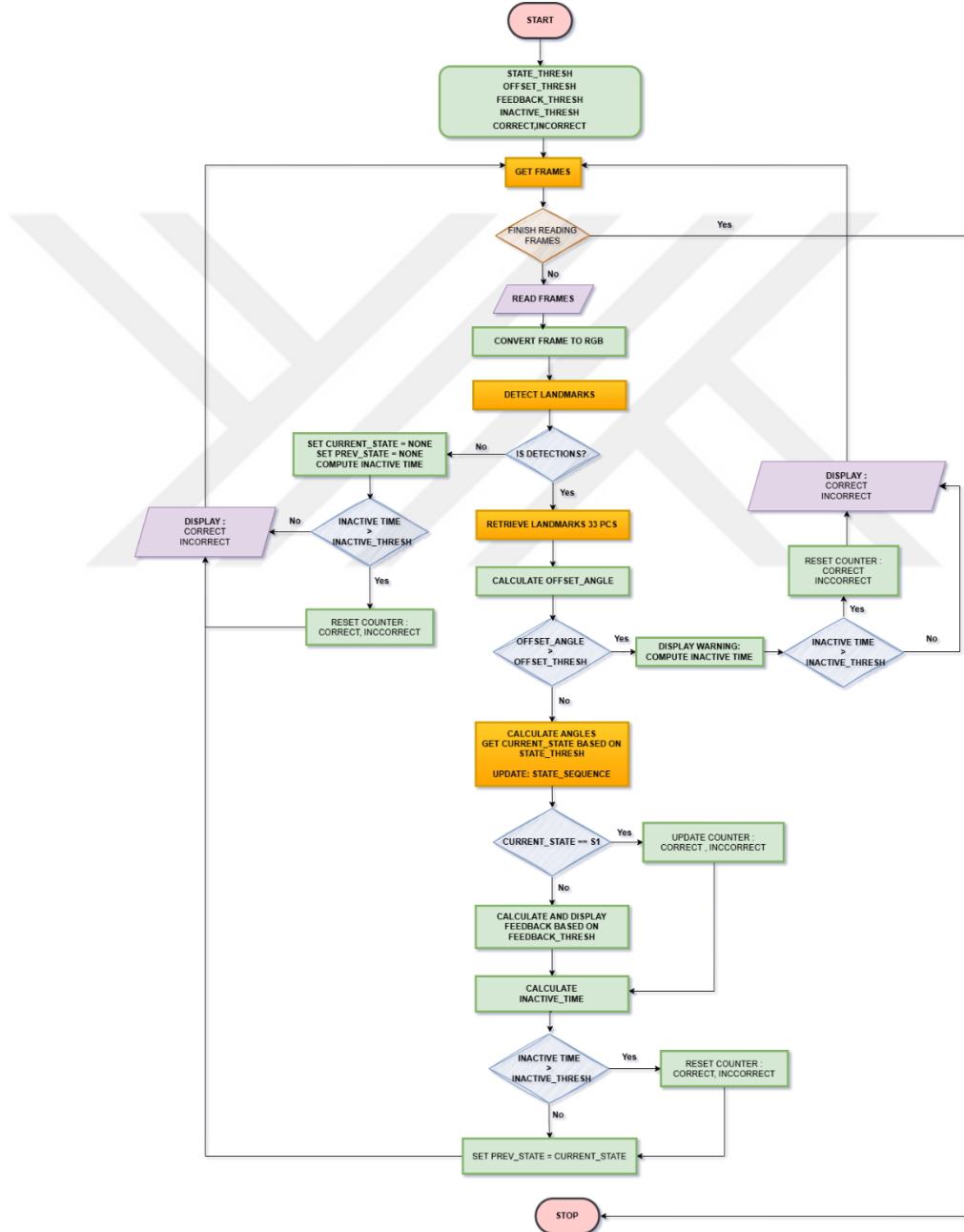
MediaPipe'in avantajları ve mimarisi üzerine yapılan bu detaylı incelemenin ardından, bu çalışmada MediaPipe'in nasıl kullanıldığı ve uygulamanın geliştirilme süreci ele alınacaktır. Bu bölümde, MediaPipe'in sağladığı esnek yapıdan yararlanarak, fitness egzersizlerinin gerçek zamanlı doğruluk kontrolü uygulaması geliştirilmiştir.

3.3.1 Uygulamanın Geliştirilme Süreci

Bu çalışmada, MediaPipe'in poz tahmini (pose estimation) modülü kullanılmıştır. MediaPipe'in yüksek performanslı ve gerçek zamanlı işlem yeteneklerinden faydalanılarak, sistemde tanımlı dört temel fitness hareketi (biceps curl, triceps extension, squat ve shoulder press) doğru bir şekilde tespit edilmiştir. Sistem, sporcuların bu hareketleri doğru veya yanlış yapma durumlarını analiz ederek geribildirim sağlamak ve hareketlerin sayısını kaydederek istatistiksel veriler oluşturmaktadır. Bu sayede, kullanıcılar daha bilinçli ve veriye dayalı bir spor deneyimi elde edebilmektedir.

3.3.2 Uygulamanın Akış Şeması

Uygulamanın çalışma prensibi, aşağıda sunulan akış şeması ile görselleştirilmiştir. Bu şema, uygulamanın temel adımlarını ve MediaPipe'in bu süreçteki rolünü açık bir şekilde göstermektedir.



Şekil 3-5 : Uygulama Akış Şeması

Şemada görüldüğü üzere, uygulamanın çalışma süreci şu adımlardan oluşmaktadır:

3.3.3 Veri Girişi ve Ön İşleme

Çerçevelerin Alınması: Sistem, video akışından veya kayıtlı bir video kaynağından çerçeveleri alır.

Çerçevenin Uygunluğunun Kontrolü: Çerçeve alınamazsa sistem hata mesajı döndürerek süreci sonlandırır.

Çerçevelerin Okunması: Alınan görüntü verisi okunur ve işlenmek üzere hazırlanır.

Çerçevenin RGB Formatına Dönüştürülmesi: Görüntü işleme sürecini optimize etmek amacıyla çerçeve RGB formatına dönüştürülür.

3.3.3.1 Poz Tahmini ve Açı Hesaplamaları

Poz İşaretlerinin Algılanması: MediaPipe kullanılarak insan vücuduna ait temel 33 işaret noktası tespit edilir.

Poz İşaretlerinin Mevcudiyetinin Kontrolü: İşaret noktaları tespit edilmemişse analiz gerçekleştirilemez ve süreç durdurulur.

Poz İşaretlerinin Çıkarılması: Başarıyla tespit edilen 33 adet vücut işaret noktası işlenmek üzere alınır.

Offset Açısının Hesaplanması: Kullanıcının vücut duruşundaki açısal sapmalar hesaplanır.

Offset Açısının Eşik Değerini Aşıp Aşmadığının Kontrolü:

- Eğer hesaplanan offset açısı belirlenen OFFSET_THRESH değerini aşıyorsa, hareketin doğruluğu hakkında değerlendirme yapılır.
- Aksi takdirde sistem normal sürecine devam eder.

3.3.4 Hareketin Değerlendirilmesi ve Geri Bildirim Mekanizması

Açıların Hesaplanması ve Hareket Durumunun Belirlenmesi:

- Tespit edilen vücut işaret noktalarına dayalı olarak, belirli hareketlere ilişkin açılar hesaplanır.

- Kullanıcının mevcut durumu (current_state) belirlenerek STATE_THRESH eşik değeri baz alınarak güncellenir.
- Hareket durumu dizisi (STATE_SEQUENCE) güncellenerek istatistiksel analiz için kaydedilir.

Mevcut Durumun Güncellenmesi: Kullanıcının hareket durumu değiştiğinde sistem güncellenir.

Geribildirim Mekanizmasının Çalıştırılması: Kullanıcının hareketleri FEEDBACK_THRESH eşikğine göre değerlendirilerek, hareketin doğru veya yanlış olduğuna dair anlık geri bildirim sağlanır.

3.3.5 İnaktif Süre Takibi ve Kullanıcı Etkileşimi

Kullanıcının İnaktif Süresinin Hesaplanması: Kullanıcının belirli bir süre boyunca hareketsiz kalması durumunda INACTIVE_TIME hesaplanır.

İnaktif Süre Eşik Değerinin Aşılıp Aşılmadığının Kontrolü:

- Eğer inaktif süre INACTIVE_THRESH değerini aşıyorsa sistem uyarı verir.
- Kullanıcı aktifse süreç kesintisiz devam eder.

3.3.6 Sonuçların Güncellenmesi ve Görselleştirilmesi

Sayaçların Güncellenmesi: Kullanıcının doğru ve yanlış yaptığı hareketlerin sayacı güncellenir.

Önceki Durumun Güncellenmesi: Önceki hareket durumu, mevcut hareket durumuna eşitlenerek kaydedilir.

Sonuçların Görüntülenmesi:

- Kullanıcının gerçekleştirdiği hareketlerin doğruluğu veya yanlışlığı ekranda görselleştirilir.
- Yeni değerlendirme süreci için doğru ve yanlış hareket sayaçları sıfırlanır.

3.3.7 Sürecin Sonlandırılması

Sistem Durdurulur: Video akışı durdurulursa veya kullanıcı işlemi sonlandırırsa sistem süreci tamamlar.

3.4 Uygulamanın Front-End ve Back-End Mimarisi

Front-end katmanı, kullanıcıların uygulama ile etkileşimde bulunduğu arayüzü temsil eder. Bu katman, React kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir. React'in bileşen tabanlı yapısı, uygulamanın modüler ve ölçeklenebilir olmasını sağlamıştır. Front-end arayüzü, başlangıçta GymLife adlı hazır bir Bootstrap teması üzerine inşa edilmiştir. Bu tema, kullanıcı dostu bir arayüz sunarken, React'e entegre edilerek dinamik bir yapıya kavuşturulmuştur.

Front-end mimarisinin temel bileşenleri şunlardır:

Kullanıcı Arayüzü (UI): Uygulamanın arayüzü, kullanıcıların egzersiz hareketlerini gerçek zamanlı olarak izleyebileceği ve istatistiksel sonuçları görüntüleyebileceği bir profil sayfası içermektedir. Arayüz, kullanıcıların hareketlerini kamera üzerinden kaydetmelerine ve bu hareketlerin doğruluğunu değerlendirmelerine olanak tanır.

MediaPipe Entegrasyonu: MediaPipe kütüphanesi, front-end'e entegre edilerek, kullanıcıların hareketlerinin gerçek zamanlı olarak analiz edilmesi sağlanmıştır. MediaPipe'in el takibi ve vücut poz tahmini modülleri, kullanıcıların hareketlerini izlemek ve açısız değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır.

Hareket Bileşenleri: Uygulama kapsamında üzerinde çalışılan dört temel hareket (biceps curl, squat, triceps extension, shoulder press), React bileşenleri olarak modüler bir şekilde yapılandırılmıştır. Her bir hareket için ayrı bileşenler oluşturularak, kodun yeniden kullanılabilirliği ve bakımı kolaylaştırılmıştır.

Kullanıcı Etkileşimi: Kullanıcılar, kamera üzerinden yaptıkları hareketlerin doğruluğunu gerçek zamanlı olarak görüntüleyebilir ve profil sayfalarında istatistiksel sonuçlara erişebilir.

3.5 Uygulamanın Back-End Mimarisi ve .NET Core Entegrasyonu

Uygulamanın back-end katmanı, .NET Core framework'ü kullanılarak geliştirilmiştir. .NET Core, yüksek performanslı, platform bağımsız ve modüler bir yapı sunması nedeniyle tercih edilmiştir. Back-end, temel olarak bir REST API olarak tasarlanmıştır ve kullanıcı işlemleri, yetkilendirme mekanizmaları, veri yönetimi gibi

işlevleri yerine getirmektedir. Bu bölümde, back-end mimarisinin teknik detayları ve Entity Framework Core ile veri yönetimi ele alınacaktır.

3.5.1 Back-End Mimarisi ve API Tasarımı

Back-end katmanı, uygulamanın iş mantığını yöneten ve front-end ile veri alışverişini sağlayan bir REST API olarak tasarlanmıştır. API, aşağıdaki temel işlevleri yerine getirmektedir:

Kullanıcı İşlemleri: Kullanıcıların kaydolma, giriş yapma, profil bilgilerini güncelleme gibi işlemleri yönetir.

Yetkilendirme ve Kimlik Doğrulama: Kullanıcıların yetkilerine göre erişim kontrolü sağlar. Örneğin, admin kullanıcılar tüm verilere erişebilirken, normal kullanıcılar sadece kendi verilerini görüntüleyebilir.

Veri Yönetimi: Kullanıcıların egzersiz hareketlerine ait istatistiksel verileri saklar ve yönetir.

Hareket Analizi: Front-end'den gelen hareket verilerini işler ve bu verileri kullanıcı profiliyle ilişkilendirir.

API, HTTP protokolü üzerinden çalışır ve JSON formatında veri alışverişini yapar. Bu sayede, front-end ve back-end arasında hızlı ve etkili bir iletişim sağlanır.

3.5.2. Entity Framework Core ile Veri Yönetimi

Uygulamanın veri yönetimi, Entity Framework Core (EF Core) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. EF Core, bir ORM (Object-Relational Mapping) aracıdır ve veritabanı işlemlerini nesne tabanlı bir şekilde yönetmeyi sağlar. Bu sayede, veritabanı tabloları ile uygulama nesneleri arasında kolay bir eşleme yapılabilir.

EF Core ile aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir:

Veritabanı Modelleme: Uygulamanın veritabanı yapısı, EF Core'un Code-First yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşımda, veritabanı tabloları C# sınıfları olarak tanımlanır ve bu sınıflar üzerinden veritabanı şeması otomatik olarak oluşturulur.

Veri Ekleme, Silme ve Güncelleme: EF Core, veritabanı üzerinde CRUD (Create, Read, Update, Delete) işlemlerini kolaylaştıran bir yapı sunar. Bu işlemler, LINQ (Language Integrated Query) sorguları kullanılarak gerçekleştirilir.

Veri Sorgulama: EF Core, LINQ sorguları ile veritabanından veri çekmeyi kolaylaştırır. Örneğin, bir kullanıcının egzersiz istatistiklerini getirmek için Where ve Select gibi LINQ metodları kullanılır.

Migrations: Veritabanı şemasında yapılan değişiklikler, EF Core'un Migrations özelliği kullanılarak yönetilir. Bu sayede, veritabanı şeması uygulama geliştikçe güncellenebilir.

3.5.3. Yetkilendirme ve Kimlik Doğrulama

Uygulamanın back-end katmanı, kullanıcıların yetkilerine göre erişim kontrolü sağlamak için JWT (JSON Web Token) tabanlı bir kimlik doğrulama mekanizması kullanır. Bu mekanizma, aşağıdaki adımları içerir:

Kullanıcı Girişi: Kullanıcılar, front-end üzerinden kullanıcı adı ve şifre ile giriş yapar.

Token Üretme: Back-end, kullanıcı bilgilerini doğruladıktan sonra bir JWT token üretir ve bu token'ı front-end'e gönderir.

Yetkilendirme: Front-end, bu token'ı her API isteğinde kullanarak, kullanıcının yetkilerine göre işlem yapmasını sağlar.

Admin ve Kullanıcı Yetkileri: Admin kullanıcılar, tüm verilere erişebilirken, normal kullanıcılar sadece kendi verilerini görüntüleyebilir ve yönetebilir.

3.5.4. Back-End ve Front-End Entegrasyonu

Back-end ve front-end katmanları, REST API'ler üzerinden entegre edilmiştir. Front-end, kullanıcı hareketlerini ve diğer verileri back-end'e gönderir. Back-end, bu verileri işleyerek sonuçları tekrar front-end'e iletir. Bu süreç, HTTP istekleri ve JSON veri formatı kullanılarak gerçekleştirilir. Örneğin, kullanıcıların egzersiz hareketlerine ait istatistikler, back-end tarafından hesaplanır ve front-end'de kullanıcı profili sayfasında görüntülenir.

3.5.5 MediaPipe ile Gerçek Zamanlı Hesaplamalar ve İş Mantığı

Bu bölümde MediaPipe kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilen gerçek zamanlı hesaplamalar ve uygulamanın iş mantığı ele alınacaktır. MediaPipe, bilgisayarlı görü kullanarak, kullanıcıların egzersiz hareketlerini analiz etmeyi ve bu hareketlerin doğruluğunu değerlendirmeyi sağlar. Bu süreçte, poz tahmini modülleri kullanılmıştır.

3.5.5.1. MediaPipe'in Front-End'de Kullanımı

MediaPipe, front-end tarafında kullanıcıların kamera üzerinden kaydettiği hareketleri gerçek zamanlı olarak analiz eder. Bu analiz süreci, aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Görüntü Yakalama: Kullanıcının kamerası üzerinden gerçek zamanlı görüntü akışı alınır. Bu görüntüler, MediaPipe'in işleyeceği ham veriyi sağlar.

Hareket Tespiti: MediaPipe'in vücut poz tahmini modülü kullanarak, kullanıcının vücudundaki ana eklem noktaları (örneğin, omuzlar, dirsekler, dizler) tespit edilir. Bu noktalar, hareketlerin açısal değerlerini hesaplamak için kullanılır.

Açısal Değer Hesaplama: Tespit edilen eklem noktaları arasındaki açılar, matematiksel formüller kullanılarak hesaplanır. Örneğin, biceps curl hareketi için dirsek ve omuz eklemleri arasındaki açı hesaplanır.

Hareket Doğrulama: Hesaplanan açısal değerler, threshold dosyasında belirlenen referans değerlerle karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda, hareketin doğruluğu belirlenir ve kullanıcıya geri bildirim sağlanır.

3.5.5.2 Hareketlerin Analizi ve İstatistiksel Sonuçlar

MediaPipe, front-end tarafında kullanıcıların kamera üzerinden kaydettiği hareketleri gerçek zamanlı olarak analiz eder. Bu analiz süreci, aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Görüntü Yakalama: Kullanıcının kamerası üzerinden gerçek zamanlı görüntü akışı alınır. Bu görüntüler, MediaPipe'in işleyeceği ham veriyi sağlar.

Hareket Tespiti: MediaPipe'in vücut poz tahmini modülü kullanarak, kullanıcının vücudundaki ana eklem noktaları (örneğin, omuzlar, dirsekler, dizler) tespit edilir. Bu noktalar, hareketlerin açısal değerlerini hesaplamak için kullanılır.

Açısal Değer Hesaplama: Tespit edilen eklem noktaları arasındaki açılar, matematiksel formüller kullanılarak hesaplanır. Örneğin, biceps curl hareketi için dirsek ve omuz eklemleri arasındaki açı hesaplanır.

Hareket Doğrulama: Hesaplanan açısal değerler, threshold dosyasında belirlenen referans değerlerle karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda, hareketin doğruluğu belirlenir ve kullanıcıya geri bildirim sağlanır.

3.5.5.3. Hareket Doğruluk Ölçüm Kriteri

Kullanıcı hareketini doğru yapıp yapmadığını anlamak için elde edilen pozlar, fitness eğitmenlerinin belirlediği en doğru formdaki açı değeriyle karşılaştırılır.

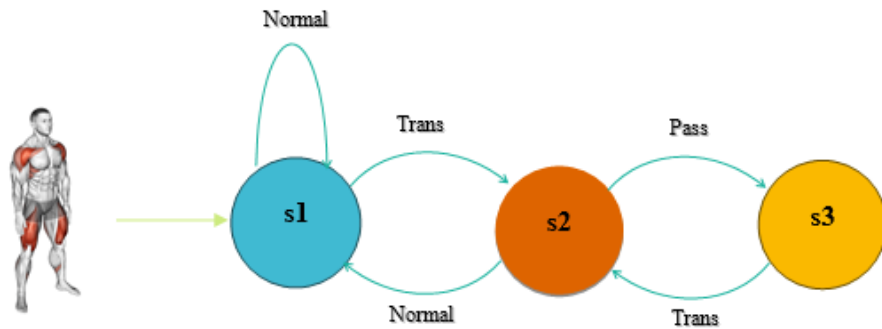
Doğruluk testi 3 aşamada gerçekleşmektedir : s1,s2 ve s3 .

Durum s1 : İlgili hareketin başlangıcını temsil etmektedir.

Durum s2 : İlgili hareketin doğru yapılma aşamasına geçerken ki geçiş durumudur.

Durum s3 : İlgili hareketin geçiş durumundan çıkıp hareketin doğru yapıldığı durumdur.

Kullanıcıya geri bildirimine bağlı olarak tüm hesaplamalar s2 ve s3 durumlarında yapılır.



Şekil 3-6 - Geçiş Durum Diyagramı

Tablo 3-1 : Fitness Hareketlerinin Açısal Analizi

Hareket	Odak Noktası	S1	S2	S3
Biceps Curl	Dirsek Açısı	0° - 20°	21° - 70°	71° - 140°
Squat	Kalça-Diz Dikey Açısı	0° - 32°	35° - 65°	70° - 95°
Shoulder Press	Omuz-Dirsek Açısı	160° - 180°	100° - 160°	70° - 100°
	Dirsek-Bilek Açısı	170° - 180°	120° - 170°	
Triceps Extension	Dirsek Açısı	0° - 5°	6° - 15°	16° - 25°

Uygulama sırasında state_sequence adında bir liste tutulur. Bu liste, sporcunun s1'den s3'e ve tekrar s1'e geri dönerken geçtiği durumu içerir. Yani aktivitenin bir tam tur yapılmasını temsil etmektedir. Maksimum durum sayısı 3'tür (örneğin: [s2, s3, s2]). state_sequence listesi, doğru veya yanlış yapılan fitness hareketlerini belirlemek için kullanılır. Eğer s1 durumuyla karşılaşırsak, state_sequence listesi sonraki ilgili fitness hareketinin sayımları için listeyi boş bir şekilde başlatırız.

3.5.5.4 Açı Hesaplama Yöntemleri

Mediapipe, hareket tespiti ve analizinde, özellikle vektörlerin yönlerinin ve açıların hesaplanmasında son derece etkili bir araçtır. Fitness hareketlerinin doğruluk analizini yaparken, bu matematiksel hesaplamalar, vücut eklemleri arasındaki açıları doğru bir şekilde hesaplayarak, hareketin doğru yapılıp yapılmadığını belirlemenize olanak tanır. Aşağıda, Mediapipe ile gerçekleştirilen fitness hareketleri doğruluk analizlerinde kullanılan matematiksel işlemler detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Skaler Çarpım (Dot Product)

Fitness hareketlerinde, vücut eklemleri arasındaki açıların hesaplanabilmesi için **dot product** (skaler çarpım) yöntemi yaygın olarak kullanılır. Bu işlem, iki vektör arasındaki ilişkiyi belirlemek için idealdir. Örneğin, bir kişinin **biceps curl** hareketini yaparken, kolun üst kısmı ile alt kısmı arasındaki açı, dot product ile hesaplanabilir.

Kolun üst kısmı ve önkolü arasındaki vektörler kullanılarak, bu iki vektör arasındaki açıyı hesaplamak mümkün olur.

Dot product formülü şu şekilde ifade edilir:

$$(v_1, v_2) = v_{1x} \cdot v_{2x} + v_{1y}v_{2y}$$

Bu hesaplama, vücut eklemleri arasındaki doğruluğu anlamak için önemli bir adımdır.

Magnitude (Büyüklik)

Fitness hareketlerinin doğruluğu, eklemler arasındaki mesafelerin doğru bir şekilde ölçülmesine dayanır. **Magnitude** (büyüklik) hesaplaması, vücut eklemleri arasındaki mesafelerin ölçülmesinde kullanılır. Örneğin, **squat** hareketinde, diz ile kalça arasındaki mesafe veya vücut hizalamasının doğruluğu **magnitude** hesaplamaları ile izlenebilir. Aynı şekilde, **push-up** hareketinde, omuzlar ile kalçalar arasındaki mesafeyi kullanarak, kişinin duruşunun düzgün olup olmadığını anlamak mümkündür.

Magnitude hesaplaması şu formülle yapılır:

$$(v) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Bu işlem, vücut hatlarının doğruluğunu ve simetrisini kontrol etmek için yararlı bir yöntemdir.

Cosine of the Angle (Açı Kosinüsü)

Cosine fonksiyonu, iki vücut eklemi arasındaki açıyı hesaplamak için kullanılır. Fitness hareketlerinin doğru yapılıp yapılmadığını anlamak için açılar kritik öneme sahiptir. Örneğin, **squat** hareketinde, diz, kalça ve ayak bileklerinin oluşturduğu açıları hesaplamak, hareketin doğru formda yapılıp yapılmadığını

belirlemek için kullanılabilir. Bu sayede, dizlerin 90 dereceye bükülüp bükülmediği gibi önemli bir kriterin doğruluğu izlenebilir.

Açı hesaplaması şu formül ile yapılır:

$$\cos(\theta) = \frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1| \cdot |v_2|}$$

Bu işlem, fitness hareketlerinin standartlarına uygunluk kontrolü için gereklidir.

Inverse Cosine (Arccos) ve Açı Hesaplama

Vektörlerin birbirine paralellik derecesini ya da dikliğini belirlemek için **inverse cosine** (arccos) fonksiyonu kullanılır. Bu işlem, doğru formun ölçülmesinde önemli bir adımdır. Örneğin, **push-up** hareketinde, kişinin kollarının doğru açıyla yere paralel olup olmadığını anlamak için bu hesaplama kullanılabilir.

Açı hesaplaması şu şekilde yapılır:

$$\theta = \cos^{-1}(\cos(\theta)) \times \frac{180}{\pi}$$

Bu işlem, kişinin vücut açılarının doğru olup olmadığını belirlemek için kullanılır ve doğru formu ölçmek adına kritik bir adımdır.

Örnek Fitness Hareketleri ve Kullanım

Mediapipe ile gerçekleştirilen doğruluk analizi, birçok yaygın fitness hareketini kapsar. Aşağıda, bu matematiksel işlemlerin kullanıldığı bazı fitness hareketlerinin doğruluk analizi örnekleri sunulmuştur:

Biceps Curl : Kolun üst kısmı ile alt kısmı arasındaki açı, dot product yöntemi ile hesaplanabilir. Kolun üst kısmı ile ön kol arasındaki açı, biceps curl hareketinin doğruluğunu belirlemek için önemlidir. Bu açı, hareketin doğru yapıp yapılmadığını

anlamak için kullanılır. Doğru bir formda, kol 90 derece bükülmeli ve tekrar başlangıç pozisyonuna getirilmelidir.

Squat : Diz ve kalça eklemleri arasındaki açıların hesaplanması ile kişinin squat hareketini doğru bir şekilde yapıp yapmadığı analiz edilebilir. Squat sırasında dizlerin 90 derece bükülmesi beklenir ve bu açı, yukarıda açıklanan cosine fonksiyonu ile hesaplanabilir. Bu hesaplama ile dizlerin fazla ileri gitmesi engellenebilir ve sırtın düz tutulması sağlanabilir.

Triceps Extension : Kolun üst kısmı ile vücut arasındaki açı, dot product ile hesaplanarak triceps extension hareketinin doğru yapıp yapılmadığı belirlenebilir. Kolun doğru bir şekilde geriye uzatılması ve dirseğin tam olarak açılması gerektiği göz önünde bulundurularak, bu açıların hesaplanması önemli bir adımdır.

Shoulder Press : Omuz, dirsek ve bilek arasındaki açıların hesaplanması, shoulder press hareketinin doğruluğunu analiz etmek için kullanılabilir. Kolun başın üstüne doğru doğru şekilde itilmesi ve dirseklerin vücuda paralel olması gerektiğinden, inverse cosine fonksiyonu ile açı hesaplamaları yapılabilir. Bu hesaplama, kolların doğru pozisyonda olup olmadığını kontrol etmek için gereklidir.

3.6 Gerçek Zamanlı Geri Bildirim

Gerçek zamanlı analiz, her karede egzersiz formunun değerlendirilmesini sağlar. MediaPipe ile her bir vücut noktası takip edilirken, bu noktalar arasındaki mesafeler ve açı değişimleri izlenir. Eğer bir hareket yanlış yapılırsa, sistem anında bu hatayı tespit eder ve kullanıcıya bir düzeltme önerisi sunar.

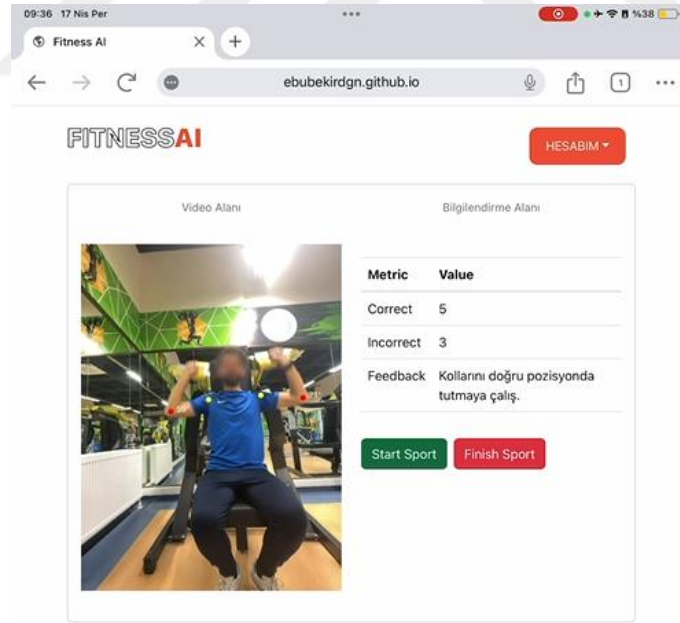
Örneğin, bir shoulder press hareketinde, kolun düzgün bir şekilde yukarı doğru hareket etmesi gerekir. Eğer kolun yolu saparsa, örneğin, bilek omuz hizasında değilse, sistem bu hatayı tespit edip, kullanıcıya düzeltme önerisi sunar.

4.BULGULAR

Bu bölümde, seçilen temel fitness hareketlerinin (Shoulder Press, Triceps Extension, Squat ve Biceps Curl) doğruluk analizine ilişkin bulgular sunulmuştur. Her bir hareket için ilgili eklem açıları belirlenmiş, hareketin başlangıç, geçiş ve başarılı tamamlanma aşamaları tanımlanmıştır. Ölçümler sırasında hareketlerin doğruluğu, açısal değişimlerin belirlenen aralıklar içinde gerçekleşip gerçekleşmediği kriterine göre değerlendirilmiştir. Bulgular, her hareket için görseller ve aşamalara özgü tablo verileri eşliğinde sistematik olarak sunulmuştur.

4.1 Shoulder Press Hareketi

Shoulder Press, omuz ve üst sırt kas gruplarını hedefleyen çok eklemlili bir egzersizdir. Bu çalışmada, kol ve omuz eklemlerinin açısal değişimleri temel alınarak hareketin doğruluğu analiz edilmiştir.



Şekil 4-1 - Shoulder Press hareketi

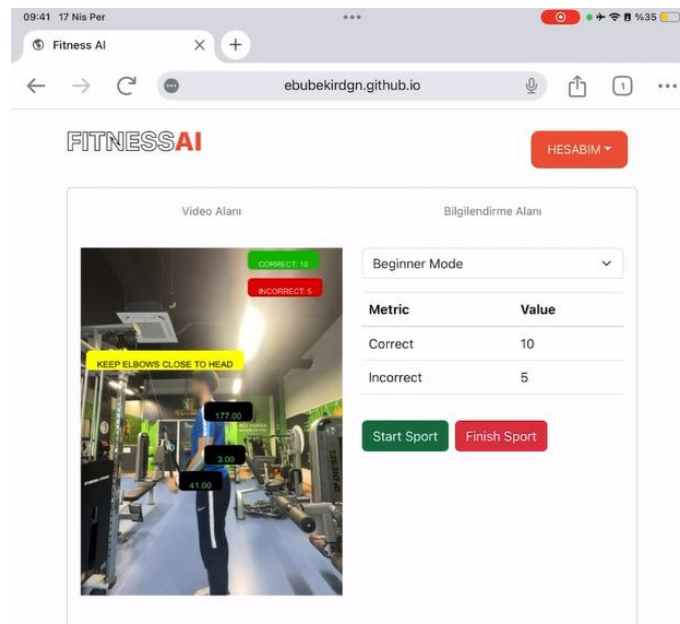
Tablo 4-1 : Shoulder press hareketine ait açı değerleri

Aşama	Açı Aralığı (°)	Açıklama
Normal (Başlangıç Pozisyonu)	45° – 70°	Kollar yere göre eğimli ve ağırlık omuz hizasında.
Geçiş (Transisyon)	71° – 100°	Kolların ağırlığı yukarıya doğru kaldırmaya başladığı aşama.
Başarılı (Tam Shoulder Press)	101° – 160°	Kollar tam yukarıya doğru uzatılmış ve ağırlık baş üstü pozisyonda.

Hareketin doğru kabul edilebilmesi için kolların tam uzatılması ve omuz açısının belirli limitler dahilinde olması sağlanmıştır. Ölçüm sırasında hareketin her aşaması minimum 30 ardışık kare üzerinden değerlendirilmiştir.

4.2 Triceps Extension Hareketi

Triceps Extension, üst kol arkasındaki *m. triceps brachii* kasını izole eden etkili bir egzersizdir. Analiz sürecinde dirsek açısındaki değişimler temel alınmıştır.



Şekil 4-2 – Tricep Extension hareketi

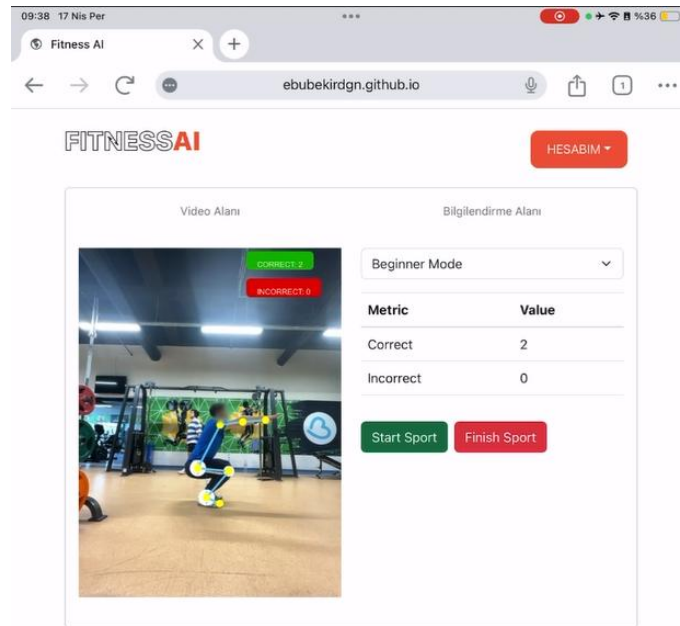
Tablo 4-2 : Triceps Extension hareketine ait açı değerleri

Aşama	Açı Aralığı (°)	Açıklama
Normal (Başlangıç Pozisyonu)	70° – 90°	Dirsek hafif bükülü ve ağırlık başın arkasında.
Geçiş (Transisyon)	91° – 130°	Ağırlığın yukarı doğru itilme aşaması.
Başarılı (Tam Extension)	131° – 170°	Dirsek tam uzamış ve ağırlık baş üstünde stabilize edilmiş.

Hareketin geçerliliği, dirsek açısının minimum 70°'den başlayıp 170°'ye kadar tam açılması şartına bağlanmıştır. Ayrıca, hareketin her aşamasında duraksama süresi 10 saniyeyi aşmamalıdır.

4.3 Squat Hareketi

Squat, kalça, uyluk ve diz çevresindeki büyük kas gruplarını çalıştıran temel bir fonksiyonel egzersizdir. Bu çalışmada, diz ve kalça eklem açılarındaki değişimler dikkate alınmıştır.



Şekil 4-3 – Squat hareketi

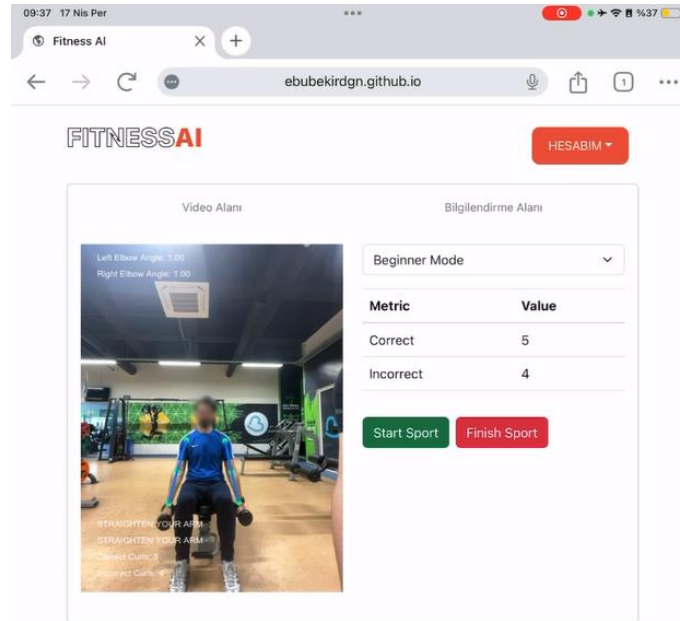
Tablo 4-3 : Squat hareketine ait açı değerleri

Aşama	Açı Aralığı (°)	Açıklama
Normal (Başlangıç Pozisyonu)	170° – 180°	Vücut dik, dizler tamamen açılmış pozisyonda.
Geçiş (Transisyon)	90° – 169°	Kalça aşağı inmekte, dizler kontrollü bir şekilde bükülmekte.
Başarılı (Tam Squat)	60° – 89°	Kalça diz hizasına kadar veya altına inmiş durumda.

Squat hareketinde diz açısının minimum 60°'ye kadar kapanması, ardından tekrar tam açılması beklenmektedir. Ölçüm kriterlerinde hareket akıcılığı ve dengenin korunması esas alınmıştır.

4.4 Biceps Curl Hareketi

Biceps Curl, üst kol kasları, özellikle de *m. biceps brachii* kasını hedefleyen temel bir izolasyon egzersizidir. Bu çalışmada, dirsek eklemindeki değişimler üzerinden hareketin doğru şekilde uygulanıp uygulanmadığı analiz edilmiştir.



Şekil 4-4 – Biceps Curl hareketi

Tablo 4-4 : Biceps curl hareketine ait açı değerleri

Aşama	Açı Aralığı (°)	Açıklama
Normal (Başlangıç Pozisyonu)	0° – 20°	Kol tamamen açık ve dinlenme pozisyonunda.
Geçiş (Transisyon)	21° – 70°	Kol kısmen bükülmüş, hareketin yarısında.
Başarılı (Tam Biceps Curl)	71° – 140°	Kol tam bükülmüş, ağırlığın en üst noktaya taşındığı pozisyon.

Hareketin doğru kabul edilebilmesi için dirsek açısının minimum 10°'ye kadar tam uzatılması ve maksimum 140°'ye kadar bükülmesi beklenmiştir. Hareketsizlik süresi azami 10 saniye olarak belirlenmiş ve hareket analizi için minimum 30 ardışık kare kullanılmıştır.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, sporcuların temel fitness hareketlerinden olan Biceps Curl, Squat, Shoulder Press ve Triceps Extension egzersizlerini doğru formda gerçekleştirmelerini sağlamak amacıyla bilgisayarla görme tabanlı bir analiz ve geri bildirim sistemi geliştirilmiştir. Uygulama, React.js ile tasarlanan kullanıcı arayüzü, .NET Core tabanlı sunucu tarafı işlemleri ve MediaPipe Pose kütüphanesi kullanılarak gerçek zamanlı insan pozu tahmini yapılması temelinde inşa edilmiştir. Ayrıca sistem, Azure Cloud altyapısında barındırılmış ve frontend kısmı GitHub Pages üzerinden ücretsiz erişime açılarak geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşılabilir hale getirilmiştir.

Kullanıcıdan tarayıcı kamerası izni alınarak çalışmaya başlayan sistem, sporcunun kamera önündeki mesafe ve hizalanmasını optimize etmekte, böylece poz tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Egzersiz sürecinde, sporcunun vücut açısal değerleri sürekli analiz edilmekte, hareket doğruluğu önceden tanımlanmış eklem hareket açıklıkları, literatürde yer alan biyomekanik çalışmaların sonuçlarına göre belirlenerek karşılaştırılmakta ve her tekrarın doğru veya yanlış olduğu anlık olarak belirlenmektedir. Bu şekilde kullanıcıya gerçek zamanlı görsel geri bildirim sunulmakta, hem hareket kalitesi artırılmakta hem de olası sakatlıkların önüne geçilmektedir.

Çalışmanın en dikkat çekici yönlerinden biri, hem masaüstü hem de tablet gibi farklı cihazlarda donma, gecikme gibi sorunlar yaşanmadan kesintisiz çalışabilmesi ve tüm işlemlerin düşük donanım gereksinimleri ile gerçekleştirilebilmesidir. Bu yönüyle sistem, özellikle MediaPipe Pose'un düşük işlem yükü ve yüksek çıkarsama hızından faydalanarak geliştirilen önceki çalışmalara paralel bir yaklaşım sergilemiştir [3], [6].

Geliştirilen sistem, mevcut literatürde yer alan bazı önemli çalışmalarla kıyaslandığında özgün katkılar sunduğu görülmektedir. Örneğin, Kim ve arkadaşları (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada [6], MediaPipe Pose kütüphanesi, insansı bir model optimizasyon yöntemi ile birleştirilerek insan pozu tahmininde derinlik belirsizliği gibi sorunların çözümü hedeflenmiştir. Bizim çalışmamız da benzer şekilde, kullanıcı mesafesinin ayarlanması yoluyla, doğru vücut poz tahmini yapılmasına odaklanmıştır. Ancak, geliştirdiğimiz sistemin sunduğu gerçek zamanlı doğru-yanlış hareket sayımı ve anlık geri bildirim mekanizması, Kim ve arkadaşlarının

(2023) çalışmasında sunulan yaklaşımdan farklı olarak kullanıcı deneyimini antrenman süreci boyunca sürekli olarak desteklemiştir [6].

Benzer şekilde, Ruescas-Nicolau (2024) tarafından sunulan çok modlu insan hareketi veri seti çalışmasında [7], hem 2D hem de 3D poz anahtar noktaları kullanılarak insan hareketlerinin daha doğru analiz edilebileceği vurgulanmıştır. Geliştirilen sistemde, doğrudan 2D poz anahtar noktaları kullanılarak hızlı ve güvenilir bir hareket analizi gerçekleştirilmiş, ancak gelecekteki geliştirmeler için 3D açısal analizlerin de sisteme entegre edilebileceği öngörülmektedir.

Roggio'nun (2024) sunduğu kapsamlı analizde [8], MediaPipe, OpenPose ve BlazePose gibi poz tahmin modellerinin, rehabilitasyon, spor performansı analizi ve ergonomik uygulamalarda düşük maliyetli ve erişilebilir çözümler sunduğu ifade edilmiştir. Bizim sistemimiz, ücretsiz erişim, düşük donanım gereksinimi ve geniş platform uyumluluğu ile bu standartların tamamını başarıyla karşılamaktadır. Ayrıca kullanıcıların bireysel egzersiz geçmişlerini grafiksel analizler aracılığıyla takip edebilmesi, motivasyonu artıran ve kişiselleştirilmiş gelişim imkânı sunan yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Avantajları değerlendirildiğinde, geliştirilen sistemin en önemli katkıları şunlardır:

- Gerçek zamanlı analiz ve anlık geri bildirim: Kullanıcı her hareketi sırasında anlık olarak doğru veya yanlış yaptığına dair bilgi alabilmekte ve bu da form düzeltmelerini anında yapmasına olanak tanımaktadır.
- Yüksek erişilebilirlik: Tarayıcı tabanlı çalışması sayesinde kullanıcılar, herhangi bir ek donanım veya yazılım yüklemeye gerek kalmadan uygulamaya erişebilmektedir.
- Kullanıcı dostu arayüz: Minimalist tasarım ve kullanıcı deneyimine önem veren yaklaşım sayesinde farklı yaş ve teknoloji seviyesindeki kullanıcıların rahatlıkla kullanabileceği bir sistem oluşturulmuştur.
- Kapsamlı performans takibi: Her kullanıcı için hareket bazlı doğru/yanlış analizi yapılmakta ve geçmiş egzersiz performansı grafiklerle izlenebilmektedir.

Bununla birlikte, çalışma belirli sınırlamalara da sahiptir. Öncelikle, Latyshev'in (2024) vurguladığı gibi [9], MediaPipe algoritmaları özellikle ayak bileği

ve el bileği gibi ekstremite bölgelerinde belirgin sapmalar gösterebilmektedir. Sistem geliştirilirken bu olası sapmalar dikkate alınarak tolerans aralıkları esnetilmiştir, ancak kompleks hareketlerde hassasiyetin daha da artırılması gerekmektedir. Ayrıca, uygulama sabit açısal eşiklere dayalı olarak tasarlandığından, her bireyin antropometrik farklılıklarını (örn. boy, kilo, eklem mobilitesi) otomatik olarak hesaba katmamaktadır. Bu da özellikle çocuklar, yaşlılar veya ekstrem fiziksel özelliklere sahip bireyler için özelleştirilmiş analizlerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen bu sistem, mevcut literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla daha dinamik, kullanıcı dostu ve etkili bir çözüm sunmakta; bireysel spor performansını artırma ve sakatlanma risklerini azaltma konusunda önemli katkılar sağlamaktadır. Tarayıcı tabanlı erişim, gerçek zamanlı anlık analiz, bireyselleştirilmiş gelişim izleme gibi güçlü özellikleri sayesinde hem bireysel kullanıcılar hem de profesyonel spor alanında geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Gelecekte yapılacak kişiselleştirme, mobil uyumluluk ve 3D analiz entegrasyonlarıyla sistemin çok daha güçlü ve kapsamlı bir çözüm haline gelmesi beklenmektedir.

Çalışmanın Katkıları

Gerçek Zamanlı Performans: MediaPipe BlazePose'ın optimize CPU çıkarımı, anlık doğru/yanlış hareket tespiti için ideal bir temel oluşturmuştur [33]. Bu özellik, özellikle evde veya spor salonunda eğitmen eşliği olmadan yapılan egzersizler için büyük bir avantaj sunmaktadır.

Kullanıcı Dostu Arayüz: React kütüphanesi kullanılarak geliştirilen kullanıcı arayüzü, sistemin kullanımını kolaylaştırmakta ve kullanıcı deneyimini artırmaktadır.

Biyomekanik Doğrulama: Fitness uzmanları tarafından belirlenen ideal açı değerleri kullanılarak, hareketlerin biyomekanik açıdan doğruluğu sağlanmıştır. Bu sayede, sakatlanma riski en aza indirilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, fitness hareketlerinin doğruluğunu gerçek zamanlı olarak analiz eden ve kullanıcıya anında geri bildirim sağlayan bir sistem geliştirilmiştir. Bir javascript kütüphanesi olan MediaPipe'ın hızlı yeteneklerinden yararlanmaktadır. MediaPipe'ın BlazePose modeli, CPU üzerinde yüksek performans sağlaması ve düşük kaynak tüketimi nedeniyle tercih edilmiştir. Bu sayede, sistem tüketici sınıfı donanımlarda bile sorunsuz bir şekilde çalışabilmektedir. React.js tabanlı ön yüz tasarımı, kullanıcı deneyimi sunarken, .NET Core altyapısı ve Azure Cloud entegrasyonu sayesinde güvenilir ve ölçeklenebilir bir yapı ortaya koymuştur.

6.1. Çalışmanın Katkıları

Gerçek Zamanlı Performans: MediaPipe BlazePose'ın optimize CPU çıkarımı, anlık doğru/yanlış hareket tespiti için ideal bir temel oluşturmuştur [33]. Bu özellik, özellikle evde veya spor salonunda eğitmen eşliği olmadan yapılan egzersizler için büyük bir avantaj sunmaktadır.

Kullanıcı Dostu Arayüz: React kütüphanesi kullanılarak geliştirilen kullanıcı arayüzü, sistemin kullanımını kolaylaştırmakta ve kullanıcı deneyimini artırmaktadır.

Biyomekanik Doğrulama: Fitness uzmanları tarafından belirlenen ideal açı değerleri kullanılarak, hareketlerin biyomekanik açıdan doğruluğu sağlanmıştır. Bu sayede, sakatlanma riski en aza indirilmiştir.

6.2. Çalışmanın Sınırlamaları

Derin Öğrenme Eksikliği: Mevcut sistem, derin öğrenme veya yapay zeka modelleri kullanmamaktadır. Bu nedenle, karmaşık hareketlerde doğruluk oranı düşebilmektedir. Özellikle, farklı vücut tipleri ve hareket varyasyonları için sistemin genelleme yeteneği sınırlıdır.

Çoklu Kullanıcı Desteği: Sistem, şu anda yalnızca tek bir kullanıcıyı analiz edebilmektedir. Grup egzersizleri veya çoklu kullanıcı senaryoları için genişletilmesi gerekmektedir.

6.3. Gelecek Çalışmalar

Derin Öğrenme Entegrasyonu: İlerleyen aşamalarda, hareketlerin daha doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için derin öğrenme modelleri (örneğin, LSTM veya CNN tabanlı modeller) kullanılması planlanmaktadır. Bu modeller, özellikle karmaşık hareketlerde daha yüksek doğruluk sağlayacaktır.

Veri Seti Oluşturma: Farklı vücut tipleri ve hareket varyasyonları için zengin bir veri seti oluşturulacak ve bu veri seti üzerinde model eğitimi gerçekleştirilecektir.

Çoklu Kullanıcı Desteği: Sistemin, aynı anda birden fazla kullanıcıyı analiz edebilmesi için genişletilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede, grup egzersizlerinde de kullanılabilir hale gelecektir.

6.4. Sonuç

Bu çalışma, fitness hareketlerinin doğruluğunu gerçek zamanlı olarak analiz eden ve kullanıcıya anında geri bildirim sağlayan bir sistem sunmaktadır. MediaPipe'in hızlı çıkarım yetenekleri ve React kütüphanesinin esnek yapısı sayesinde, sistem tüketici sınıfı donanımlarda bile yüksek performans göstermektedir. Mevcut sınırlamalar, gelecek çalışmalarla aşılacak sistemin daha da geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışma, özellikle evde veya spor salonunda eğitmen eşliği olmadan yapılan egzersizler için önemli bir katkı sağlamaktadır [3], [6].

KAYNAKLAR

- [1] Dünya Sağlık Örgütü, “2022 Küresel Fiziksel Aktivite Durum Raporu. Dünya Sağlık Örgütü”, Dünya Sağlık Örgütü, 2022.
- [2] Ateş, A., “Fiziksel Aktivitenin Sağlık Üzerindeki Etkileri.”, 2024.
- [3] Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C. L., & Grundmann, M., “Mediapipe hands: On-Device Real-Time Hand Tracking”, 2020.
- [4] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., ... & Grundmann, M., “Mediapipe: A Framework for Building Perception Pipelines.”, 2019.
- [5] V. 32. J. S., “AI-Enabled Real-Time Exercise Monitoring with MediaPipe and OpenCV”, In 2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, 2024.
- [6] K. 18. J. W., “Human Pose Estimation Using MediaPipe Pose and Optimization Method Based on a Humanoid Model”, Applied sciences, 2023.
- [7] Ruescas-Nicolau, A. V.-R., “Multimodal human motion dataset of 3D anatomical landmarks and pose keypoints”, Data in Brief, 2024.
- [8] Roggio, F., Trovato, B., Sortino, M., & Musumeci, G., “A comprehensive analysis of the machine learning pose estimation models used in human movement and posture analyses”, A narrative review, 2024.
- [9] Latyshev, M. L., “Computer Vision Technologies For Human Pose Estimation In Exercise: Accuracy and Practicality. In Society. Integration. Education.”, Proceedings of the International Scientific Conference., 2024.
- [10] Bagga,E.&., “Real-Time Posture Monitoring and Risk Assessment for Manual Lifting Tasks Using MediaPipe and LSTM. In Proceedings of the 1st International Workshop on Multimedia Computing for Health and Medicine.”, 2024.
- [11] Gayakwad, M. B., “Web Service Implementation" AI Yoga Trainer Using Human Pose Estimation" for Web Discovery. Journal of Electrical Systems.”, 2024.
- [12] Dill, S. A., “Accuracy Evaluation of 3D Pose Reconstruction Algorithms Through Stereo Camera Information Fusion for Physical Exercises with MediaPipe Pose.”, 2024.
- [13] Dill, S. R., “Evaluation of Accuracy and Angle Dependency of 3D Pose Estimation through Stereo Camera Information Fusion with MediaPipe Pose.”, In 2024 27th International Conference on Information Fusion ., 2024.

- [14] Rai, D. K., "Pose Detection Using OpenCV and Media Pipe.", In 2024 International Conference on Integrated Circuits, Communication, and Computing Systems., 2024.
- [15] Helmy, M. M., "PoseRight: An AI Empowered Automatic Posture Estimation and Correction Model.", In 2024 International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference., 2024.
- [16] Rane, M. D., "Virtual Gym Tracker: AI Pose Estimation.", In 2024 Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT)., 2024.
- [17] Chen, "Fitness Done Right: a Real-time Intelligent Personal Trainer for Exercise Correction.", arXiv preprint arXiv:1911.07935., 2019.
- [18] Wagh, V. S., "Quantifying Similarities Between MediaPipe and a Known Standard to Address Issues in Tracking 2D Upper Limb Trajectories.", Proof of Concept Study. JMIR Formative Research., 2024.
- [19] Gowrish, G. V., "AI Powered gym tracker using AI Pose estimation.", In 2024 2nd International Conference on Networking and Communications., 2024.
- [20] Ali, M. M., "Human Pose Estimation for Clinical Analysis of Gait Pathologies.", Bioinformatics and Biology Insights., 2024.
- [21] Habibi, M. N., "AI-Based Kinematic Analysis for Track Athletes.", In 2024 IEEE International Conference on Smart Computing., 2024.
- [22] Ko, Y. M., "Real-Time AI Posture Correction for Powerlifting Exercises Using YOLOv5 and MediaPipe.", IEEE, 2024.
- [23] Arya, V. &., "Enhancing Human Pose Estimation: A Data-Driven Approach with MediaPipe BlazePose and Feature Engineering Analysing.", In 2024 First International Conference on Pioneering Developments in Computer Science & Digital Technologies., 2024.
- [24] Goodfellow, I., "Deep learning", 2016.
- [25] Zheng, "Interpreting fitness: self-tracking with fitness apps through a postphenomenology lens.", Ai & Society., 2023.
- [26] Cao, Z., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y., "Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields.", In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017.
- [27] Hidalgo, G., Simon, T., & Wei, S. E., "OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields.", IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 43, 172-186., 2018.
- [28] Zhang, M., Zhou, Y., Xu, X., Ren, Z., Zhang, Y., Liu, S., & Luo, W., "Multi-view emotional expressions dataset using 2D pose estimation.", Scientific Data, 2023.

- [29] Sebastian, B., “Human Action Recognition using Detectron2 and LSTM”, 2024.
- [30] Torun, C., & Karacı, A., “Derin Öğrenmeye Dayalı 2 Boyutlu İnsan Poz Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması”, Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 2024.
- [31] Girase, S., Dutta, O., Mahadar, A., Ghodmare, A., & Bedekar, M., “Identifying Incorrect Postures While Performing Sun Salutation Using MoveNet.”, In International Conference on Communication and Intelligent Systems, 2022.
- [32] Kim, J. W., Choi, J. Y., Ha, E. J., & Choi, J. H., “Human pose estimation using mediapipe pose and optimization method based on a humanoid model.”, Applied sciences, 2023.
- [33] Yu, D., Zhang, H., Zhao, R., Chen, G., An, W., & Yang, Y., “MovePose: a high-performance human pose estimation algorithm on mobile and edge devices.”, 2024.