

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM
DALI



GERÇEK ZAMANLI SÜRÜCÜ YORGUNLUK TESPİTİ VE
UYARI SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK
LİSANS TEZİ

MURAT AVŞAR

TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi Mithat ÖNDER

BOLU, ARALIK 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Murat AVŞAR tarafından hazırlanan “**GERÇEK ZAMANLI SÜRÜCÜ YORGUNLUK TESPİTİ VE UYARI SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir. **12/12/2025**

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mithat ÖNDER
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Nihat DALDAL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Fatih KAYAALP
Düzce Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....
MURAT AVŞAR

ÖZET

**GERÇEK ZAMANLI SÜRÜCÜ YORGUNLUK TESPİTİ VE UYARI
SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MURAT AVŞAR
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ MİTHAT ÖNDER)**

**BOLU, ARALIK - 2025
XIII + 43 sayfa**

Sürücü yorgunluğu, uzun süreli araç kullanımı sonucunda ortaya çıkan ve sürücünün dikkat düzeyini, karar verme becerisini ile tepki süresini olumsuz etkileyen önemli bir trafik güvenliği problemidir. Yorgunluk, bilişsel performansın azalmasına, çevresel farkındalığın zayıflamasına ve tepki süresinin uzamasına neden olarak trafik kazalarının başlıca sebeplerinden biri haline gelmektedir. Bu nedenle sürücü yorgunluğunun gerçek zamanlı olarak tespit edilmesi ve sürücünün uyarılması, trafik güvenliğini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, sürücünün yorgunluk düzeyini gerçek zamanlı olarak belirleyebilen Raspberry Pi 4 tabanlı düşük maliyetli bir sistem tasarlanmıştır. Sistem, görüntü işleme ve hareket analizi bileşenlerinin bütünleşik çalışmasıyla sürücünün göz ve baş hareketlerini izlemektedir. Görüntü işleme sürecinde araç içi kamera ve OpenCV kütüphanesi kullanılarak sürücünün yüz ve göz bölgesi tespit edilmiştir. Göz En-Boy Oranı (EAR) ve Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS) değerleri hesaplanarak sürücünün uykululuk durumu analiz edilmiştir. Hareket analizi aşamasında ise MPU6050 ivmeölçer ve jiroskop sensöründen alınan veriler kullanılarak başın eğilme ve sapma hareketleri değerlendirilmiştir. Veri toplama, işleme ve analiz süreçleri Raspberry Pi 4 üzerinde Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntü ve sensör verileri, gerçek zamanlı olarak işlenmiş ve belirli eşik değerleriyle karşılaştırılarak sürücünün yorgunluk durumu algoritma ile tespit edilmiştir. Sistem, düşük donanım maliyeti ve taşınabilir yapısı sayesinde araç içi uygulamalara kolaylıkla entegre edilebilecek pratik bir çözüm sunmaktadır. Çalışmanın sonucunda geliştirilen sistemin, sürücünün yorgunluk belirtilerini yüksek doğruluk oranı ile tespit edebildiği görülmüştür. Görüntü ve sensör tabanlı verilerin bir arada kullanılması, tek bir yöntemle elde edilebilecek sonuçlara kıyasla daha güvenilir ve kararlı bir performans sağlamıştır. Bu yönüyle çalışma, sürücü yorgunluğunun erken tespiti konusunda önemli bir katkı sunmakta ve gelecekte yapay zekâ tabanlı sınıflandırma algoritmaları ile kablosuz uyarı sistemlerinin entegre edilmesiyle daha gelişmiş sürücü destek sistemlerinin geliştirilmesine temel oluşturmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Gerçek Zamanlı Sistemler, Sürücü Yorgunluk Sistemi, Görüntü İşleme, Raspberry Pi 4

ABSTRACT

**DEVELOPMENT OF A REAL-TIME DRIVER DROWSINESS
DETECTION AND ALERT SYSTEM
MASTER THESIS
MURAT AVŞAR
BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF ELECTRICAL-ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASS. PROF. DR., MİTHAT ÖNDER)**

BOLU, DECEMBER 2025

XIII + 43 pages

Driver fatigue is a significant traffic safety problem that arises from prolonged vehicle use and negatively affects the driver's attention level, decision-making ability, and reaction time. Fatigue is one of the leading causes of traffic accidents as it leads to decreased cognitive performance, weakened environmental awareness, and prolonged reaction time. Therefore, the real-time detection of driver fatigue and the warning of the driver are of great importance in terms of increasing traffic safety. In this thesis study, a low-cost, Raspberry Pi 4-based system was designed that can determine the driver's fatigue level in real-time. The system monitors the driver's eye and head movements through the integrated operation of image processing and motion analysis components. In the image processing stage, the driver's face and eye region were detected using an in-car camera and the OpenCV library. The driver's drowsiness status was analyzed by calculating the Eye Aspect Ratio (EAR) and the Percentage of Eyelid Closure Over the Pupil Over Time (PERCLOS) values. In the motion analysis stage, the tilting and yawing movements of the head were evaluated using data obtained from the MPU6050 accelerometer and gyroscope sensor. The data collection, processing, and analysis processes were implemented on Raspberry Pi 4 using the Python programming language. Image and sensor data were processed in real-time and compared with specific threshold values to classify the driver's fatigue status. The system offers a practical solution that can be easily integrated into in-car applications thanks to its low hardware cost and portable structure. The study concluded that the developed system could detect the driver's fatigue symptoms with a high accuracy rate. The combined use of image and sensor-based data provided a more reliable and stable performance compared to the results that could be obtained with a single method. In this respect, the study offers a significant contribution to the early detection of driver fatigue and forms a basis for the development of more advanced driver assistance systems in the future by integrating artificial intelligence-based classification algorithms and wireless warning systems.

KEYWORDS: Real Time System, Drowsiness Detection System, Image Processing, Raspberry Pi 4

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	ix
FOTOĞRAF LİSTESİ	x
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xi
TEŞEKKÜR	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Çalışmanın Önemi	1
1.3 Problemin Tanımı	2
1.4 Problem Hakkında Yapılan Literatür Taraması.....	4
1.5 Tezin Yapısı.....	11
2. MATERYAL VE YÖNTEM	12
2.1 Sistem Tasarımı	12
2.2 Kullanılan Donanım Bileşenleri	14
2.3 Yazılım Bileşenleri ve Algoritmalar	15
2.4 Sistem Akış Diyagramı.....	22
2.5 DeneySEL Kurulum ve Test Aşaması.....	23
3. BULGULAR	24
3.1 Görüntü İşleme Modülünden Elde Edilen Bulgular	24
3.2 Göz En-Boy Oranı Analizi(EAR).....	26
3.3 Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS) Değerinin Değerlendirilmesi	28
3.4 MPU6050 Sensör Verilerinin Analizi	29
3.5 Görsel ve Sensör Verilerinin Entegrasyonu	30
3.6 Uyarı Mekanizması Performansı	32
4. TARTIŞMA	34
4.1 Literatürle Karşılaştırmalı Değerlendirme.....	34
4.2 Çalışmanın Sınırlılıkları.....	34
4.3 Tartışma ve Genel Değerlendirme	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	36
5.1 Genel Değerlendirme	36

5.2 Bulguların Değerlendirilmesi	36
5.3 Bilimsel Katkılar	37
5.4 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	38
5.5 Sonuç	38
KAYNAKLAR	40



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Sistem Mimarisi.....	13
Şekil 2.2. Bağlantı Şeması	14
Şekil 2.3. Yüz Koordinatları	16
Şekil 2.4. Bir görüntüden çıkarılan Haar Özellikler	17
Şekil 2.5. Örnek Haar Özellikli Giriş Görüntüsü ve Birleştirilmiş Görüntülerin Piksel Sayıları.....	19
Şekil 2.6. Yorgunluk Belirleme Sistemi Algoritması	22
Şekil 3.1. Anlık Göz En-Boy Oranı Değeri(EAR)	27
Şekil 3.2. MPU 6050 Sensöründen Gelen Anlık Ölçüm Verileri	30

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 Fizyolojik Durumlara Göre Yapılan Çalışmalar	6
Tablo 1.2 Yüz ve Göz Tespitine Yönelik Yapılmış Çalışmalar	9
Tablo 1.3 Önerilen Sistemin Literatür Taramasında Elde Edilen Bulgulara Dayalı Mevcut Çalışmalarla Karşılaştırmalı Analizi	10
Tablo 3.1. Yüz Açılarının Kameradan Tespit Edilme Oranı	26
Tablo 3.2. Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS)’a Ait Anlık Veriler	29
Tablo 3.3. Görüntü ve Sensör Verisi Kombinasyonlarına Göre Doğruluk Oranları	31
Tablo 3.4. Farklı Kullanım ve Çevresel Koşullara Göre Doğruluk Tespit Oranları	32

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 2.1 Yorgunluk Belirleme Donanım Devresi	14
Fotoğraf 2.2 Alıcı Donanım Devresi.....	15
Fotoğraf 2.3. Yüz Bölgesi için Haar Özelliklerinin Görüntüsü	18
Fotoğraf 2.4. Algoritma Sonucu Yüz ve Göz Bölgesinin Belirlenmesine Ait Bir Görüntü	20
Fotoğraf 3.1. Gözlerin ve Yüzün Tespit Edilmesi	25
Fotoğraf 3.2. Yorgunluğun Tespit Edilmesini İçeren Görüntü 1	28
Fotoğraf 3.3. Yorgunluğun Tespit Edilmesini İçeren Görüntü 2	28
Fotoğraf 3.4. Sürücü Uyarı Sistemi	33



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

DC	: Doğru Akım
DVM	: Destek Vektör Makineleri
EAR	: Göz En-Boy Oranı
EEG	: Elektroensefalografi
EKG	: Elektrokardiyografi
EMG	: Elektromiyografi
ESA	: Evrişimli Sinir Ağı
KAH	: Kalp Atış Hızı
RF	: Radyo Frekans
YSA	: Yapay Sinir Ağları
PERCLOS:	Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi

TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatımın bir kısmı olan lisansüstü eğitimimde;

Bana yardımcı olan maddi ve manevi destekleyen en başta anneme, eşime ve oğluma,

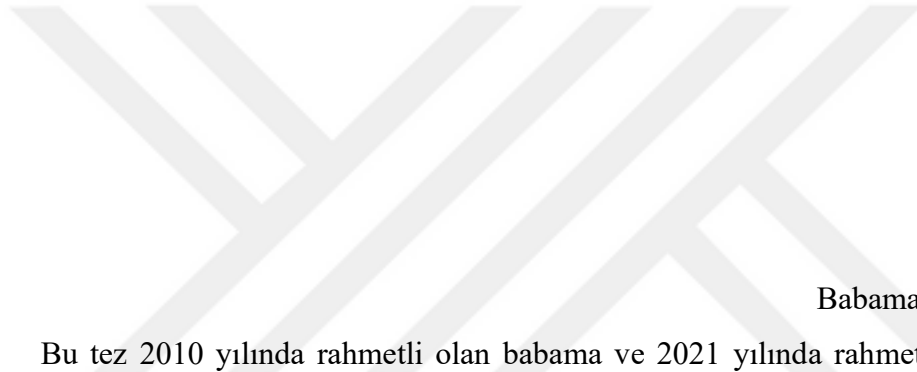
Hayatımın dönüm noktası olan benim bugünlere gelmeme vesile olan saygıdeğer Doç. Dr. Nihat Daldal'a

Beni bugüne kadar desteleyip yönlendiren saygıdeğer değerli Hocam Dr. Öğr. Üyesi Mithat Önder'e

Tezimi bitirmemde beni sürekli motive eden eşime tekrardan,

Teşekkür ederim.

Murat AVŞAR



Babama ve kardeşime

Bu tez 2010 yılında rahmetli olan babama ve 2021 yılında rahmetli olan Down Sendromlu kardeşime adanmıştır. Mekanları cennet olsun...

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, sürücü yorgunluğunu gerçek zamanlı olarak tespit edebilen ve sürüş güvenliğini artırabilen düşük maliyetli, entegre edilebilir bir sistem tasarlamaktır. Sistem, sürücünün yüz ve göz hareketlerini Haar Kaskat algoritması kullanarak analiz ederken, aynı zamanda bir araç içi kamera ve bir MPU6050 ivmeölçer sensörü aracılığıyla baş hareketlerini de izlemektedir. Böylece, yalnızca görsel verilere dayanan sistemlerin karşılaştığı sınırlamaların ötesine geçilerek, birden fazla veri kaynağının kullanılmasıyla yorgunluk tespiti daha güvenilir hale gelmektedir. Özellikle, ivmeölçer sensöründen elde edilen baş eğimi, ani düşüşler ve yönelim değişikliklerinin analizi, yorgunluk algısına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Literatürdeki yalnızca görüntü işleme tekniklerine odaklanan birçok önceki çalışmaların aksine, önerilen sistem hem görsel hem de hareket verilerini birleştirerek daha sağlam bir analitik temel sunmaktadır. Ayrıca, sistemin düşük maliyetli donanım bileşenleriyle (Raspberry Pi, Pi kamera modülü, MPU6050 sensörü) inşa edilebilme yeteneği, erişilebilirliğini ve ticari potansiyelini artırmaktadır. Sisteme bir titreşim motorunun entegre edilmesiyle, yorgunluk tespit edildiğinde çalışma sırasında sürücüye dokunsal geri bildirim sağlanarak sürücünün dikkatini yeniden toplamasına yardımcı olunmaktadır. Bu açıdan, önerilen yaklaşım hem teknik yetenek hem de pratik uygulanabilirlik açısından mevcut çalışmalara göre önemli avantajlar sunmaktadır.

1.2 Çalışmanın Önemi

Uykusuzluk, bireyin enerji eksikliğinden kaynaklanan bilinç düzeyinin azaldığı, dikkat ve tepki kapasitesinin düşüş gösterdiği bir fizyolojik durumdur. “Uykulu” terimi ise, kişinin uykuya dalma eğilimini ifade etmektedir(Sahayadhas vd., 2012). Uykulu halde araç kullanan bir sürücünün karar alma süresi uzamakta, çevresel farkındalığı azalmakta ve bilişsel performansı düşmektedir. Bu durum, sürüş güvenliğini doğrudan etkileyerek yaralanmalı veya ölümlü trafik kazalarına neden olabilmektedir(Al-Bayati vd., 2021). Son yıllarda, uykulu halde araç kullanımı nedeniyle artan trafik kazaları, hem sürücülerin hem de yolcuların güvenliği açısından önemli bir tehdit haline gelmiştir. Bilimsel araştırmalar, karayolu trafik kazalarının; yol altyapısı, araç durumu, çevresel koşullar ve en

önemlisi sürücülerin fizyolojik ve bilişsel durumları gibi çok boyutlu faktörlerin karmaşık etkileşiminden kaynaklandığını ortaya koymuştur(Shaik, 2023). Bu faktörler arasında sürücü yorgunluğu ve uykululuk hali kazaların oluşumunda merkezi bir rol oynamakta olup, bu durumların göz ardı edilmesi ciddi sonuçlara yol açmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki trafik kazalarının yaklaşık %20'sinin öncelikli olarak sürücü yorgunluğundan kaynaklandığı bildirilmiştir(Gottlieb vd., 2018).

Sürücülerin fizyolojik durumunu inceleyen çalışmalar, uykululuğun uzun süreli araç kullanımı, uyku bozuklukları, fiziksel yorgunluk ve dikkat seviyesindeki azalma ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Literatürde bu koşullar, sürüş performansını olumsuz yönde etkileyen temel belirleyiciler olarak kabul edilmekte; özellikle uzun mesafe seyahatlerde bilişsel ve fizyolojik tükenmenin kaza riskini artırdığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, yorgunluk kaynaklı kazaların önemli bir kısmının gece yarısı ile sabahın erken saatleri arasında, yoğunlukla yalnız sürücüler tarafından gerçekleştiği ve bu sürücülerin genellikle yorgunluk belirtilerini fark etmedikleri ya da bilinçli olarak göz ardı ettikleri belirlenmiştir. Bu durum, sürücü yorgunluğunu gerçek zamanlı olarak tespit edip önleyici uyarılar verebilen otomatik sistemlerin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır(Bergasa vd., 2006). Bu nedenle sürücü durumunu anlık olarak izleyebilen ve yorgunluk tespit edildiğinde uyarı verebilen sistemlerin geliştirilmesi hayati öneme sahiptir. Bu çalışma, düşük maliyetli donanım bileşenleriyle herkesin erişebileceği bir güvenlik çözümü sunarak literatürdeki boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

1.3 Problemin Tanımı

Sürücü yorgunluğu, trafik kazalarının en önemli sebeplerinden biridir. Yapılan araştırmalara göre gelişmiş ülkelerdeki trafik kazalarının yaklaşık %20'si doğrudan sürücü yorgunluğuna bağlı olarak gerçekleşmektedir(Gottlieb vd., 2018). Özellikle gece saatlerinde, uzun yolculuklarda ve monoton sürüşlerde sürücünün dikkat seviyesi önemli ölçüde düşmektedir. Bu durum tepki sürelerinin uzamasına, algılama hatalarına ve karar verme becerisinin azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, sürücünün yorgunluk düzeyini erken tespit eden sistemlerin geliştirilmesi trafik güvenliği açısından büyük önem taşır.

Günümüzde teknolojik ilerlemeler sayesinde, sürücünün uyuklaması sebebiyle oluşan kazaları önlemek amacıyla çeşitli sistemler geliştirilmiştir.

Uyuşukluk belirleme sistemleri, modern otomotiv endüstrisinde sürücülerin uykulu olup olmadığını tespit etmek, olağandışı durumlarda sürücüyü uyararak trafik kazalarını minimize etmeyi amaçlayan yenilikçi çözümler olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler genellikle görüntü işleme algoritmalarını kullanarak sürücünün göz hareketlerini, yüz ifadelerini ve diğer davranışsal özelliklerini analiz eder. Özellikle göz kapağı hareketi, esneme sıklığı, göz kırpma oranı ve göz kapalı kalma süresi gibi fizyolojik göstergeler, uykululuk düzeyinin belirlenmesinde etkili parametrelerdir(Danışman vd., 2010). Ancak bu sistemler genellikle yüksek maliyetli sensörler, karmaşık donanımlar veya sadece tek bir veri kaynağı (örneğin sadece yüz analizi) kullanmaktadır. Bu durum sistemlerin yaygınlaşmasını ve doğruluğunu sınırlandırmaktadır.

Çalışma kapsamında sürücünün yüz, göz ve baş hareketleri dikkate alınmıştır. Gerçek zamanlı video analizinde yüz özelliklerinin ve ifadelerinin doğru şekilde tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır(Sikander, 2019). Bu bağlamda Haar Kaskat algoritması, yüz özellikleri ve hareketlerini tespit etmedeki başarısı, hızlı işlem kapasitesi ve sağlam yapısı sayesinde nesne tespiti uygulamalarında güvenilir ve verimli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Kalp Atış Hızı(KAH), cilt sıcaklığı veya Elektroensefalografi(EEG) verileri gibi biyolojik sinyaller çalışmanın kapsamı dışındadır. Deneysel testler, laboratuvar ortamında belirli ışık koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, sürücünün uykulu olup olmadığını belirlemek amacıyla göz kapanma oranı algoritması ve Haar Kaskat algoritması bir arada değerlendirilmiştir. Ana mikrodenetleyici olarak Raspberry Pi 4 kullanılmış, sürücünün görüntülerini yakalamak için 5 MP Raspberry Pi kamera sensörü sisteme entegre edilmiştir. Ayrıca sürücünün kafa hareketlerini algılamak için MPU6050 ivme sensörü kullanılmış, sensör verileriyle sistemin güvenliği ve doğruluğu artırılmıştır. Uykusuzluk tespit edildiğinde sürücüye görsel uyarı veren geri bildirim mekanizması geliştirilmiş olup ayrıca emniyet kemeriye bağlı titreşim motorunu aktif eden bir radyo frekans alıcı modülü ile sürücü aktif olarak uyarılmaktadır. Raspberry Pi, kamera modülü, sensör, radyo frekans alıcı ve ekran bileşenlerinden oluşan bir prototip oluşturulmuştur. Çalışma, gelecekte yapay zekâ tabanlı sınıflandırma algoritmaları ve kablosuz uyarı sistemleriyle desteklenerek daha gelişmiş sürücü destek sistemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

1.4 Problem Hakkında Yapılan Literatür Taraması

Literatürde, sürücü yorgunluğunu tespit etmek amacıyla Kalp Atış Hızı(KAH), vücut sıcaklığı, Elektroensefalografi(EEG) ve Elektrokardiyografi (EKG) gibi farklı fizyolojik parametrelerin kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Elektroensefalografi(EEG), bireyin uyku hali ve uyanıklık durumu hakkında bilgi sağlayan temel fizyolojik ölçüm yöntemlerinden biridir. Gerçek zamanlı olarak elde edilebilen Elektroensefalografi(EEG) verileri, bireyin uyku düzeni ve dikkat seviyesini yüksek doğrulukla yansıtmakta ve bu nedenle yorgunluk tespitinde en güvenilir araçlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Elektroensefalografi(EEG), yorgunluğun fizyolojik olarak ölçülmesinde literatürde sıklıkla vurgulanan yöntemlerden biridir(Demir vd., 2022).

Beyindeki elektriksel aktivite, Elektroensefalografi(EEG) yöntemiyle ölçülerek analiz edilebilmektedir. Elektroensefalografi(EEG), beynin uyanıklık düzeyini ve bilişsel durumunu yansıtan önemli bir biyofizyolojik göstergedir. Beyin aktivitesindeki değişimler, bireyin dikkat, yorgunluk ve uykululuk düzeylerini doğrudan etkilemekte; bu sayede uyuşukluk derecesinin ve farklı uyku evrelerinin tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. (Picot vd., 2011) beyin sinyalleri ile görsel aktiviteyi bir arada kullanarak sürücü yorgunluğunu tespit eden bir sistem önermiş ve nörofizyolojik verilerin bu amaçla etkin biçimde kullanılabileceğini göstermiştir.

(Shan ve Bowlds, 2009) tarafından geliştirilen yöntemde, sürücünün yorgunluğunu tespiti amacıyla bir nabız dalga sensörü kullanılmıştır. Bu sensör, sürücünün avuç içinden kalp atış dalgalarını ölçerek fizyolojik verilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Çalışmada, direksiyon üzerindeki el sıkma kuvvetinin değişiminden kaynaklanan ölçüm gürültüsünü azaltmak amacıyla adaptif filtreleme tekniği uygulanmıştır. Adaptif filtre, gürültü bileşenlerini ortadan kaldırarak kalp atış sinyalinin daha kararlı ve doğru biçimde elde edilmesine olanak tanımıştır. Böylece filtrelenmiş sinyal, Kalp Atış Hızı(KAH) analizinde kullanılmak üzere temiz bir nabız dalgası sağlamış ve bu yaklaşımın sürücü yorgunluğu tespitinde güvenilirliği artırdığı rapor edilmiştir.

(Furman vd., 2008) sürücü yorgunluğunu Elektrokardiyografi(EKG) temelli bir yaklaşımla analiz etmişlerdir. On katılımcı üzerinde yürütülen deneylerde, iki saatte bir Elektroensefalografi(EEG), Elektrokardiyografi(EKG), Elektromiyografi(EMG) verileri ve göz hareketleri video kaydı aracılığıyla

toplanmıştır. Katılımcılardan, bu verilerle uyanıklık koruma testi veya sürüş simülasyonu gerçekleştirmeleri istenmiştir. Sonuçlar, uykuya geçiş durumunda Kalp Atış Hızının(KAH) çok düşük frekans bileşenlerinde zamanla azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada, zaman ve zaman-frekans alanlarında elde edilen parametrelerin sürücülerin uyuklama durumlarını izlemek için uygun bir sistemin temelini oluşturabileceği belirtilmiştir.

(Barua, 2019) sürücü yorgunluğu tespitinde Destek Vektör Makineleri (DVM) tekniğini kullanarak ikili sınıflandırmada (uykulu/normal) %93, çoklu sınıflandırmada (normal/uykulu/çok uykulu) ise %79 doğruluk oranı elde etmiştir. (Akın, 2008), Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımını kullanmış ve sürücü sayısının fazla olduğu veri setinde daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. (Gao vd., 2019), on katılımcıdan elde edilen Elektroensefalografi(EEG) sinyallerini kullanarak uyuşukluk düzeylerini sınıflandırmış, böylece Elektroensefalografi (EEG) tabanlı sistemlerin sürücü yorgunluğunu belirlemedeki etkinliğini göstermiştir. (Zhu vd., 2014) ise giyilebilir Elektroensefalografi(EEG) tabanlı bir Evrişimli Sinir Ağı(ESA) sistemi önermiş ve hareket halindeki araçlarda sürücü yorgunluğunu fizyolojik parametreler aracılığıyla tespit etmede oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

(Becerra vd., 2019) sürücülerden gerçek zamanlı Elektroensefalografi (EEG) sinyalleri toplayarak Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritması ile bir uyku tahmin modeli geliştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen modelin %93 doğruluk oranı ile en iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir. (Gwak vd., 2020), sürüş izleme sistemi kurarak sürücünün Elektroensefalografi(EEG) sinyallerini, davranışsal indekslerini ve sürüş performansını değerlendirmiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak dikkatli ve uykulu durumlar 10 saniyelik veri pencereleri üzerinden sınıflandırılmış ve %95,4 doğruluk oranına ulaşılmıştır.

Tablo 1.1 Fizyolojik Durumlara Göre Yapılan Çalışmalar

Kaynak	Sensör	Sınıflandırma Metodu	Sınıflandırma Doğruluğu
Picot vd., 2011	Elektroensefalografi (EEG)	Bulanık Mantık	%80,6
Barua, 2019	Elektroensefalografi (EEG)	Destek Vektör Makinesi	%78-%93
Akın, 2008	Elektroensefalografi (EEG)	Yapay Sinir Ağları	%98-%99
Gao vd., 2019	Elektroensefalografi (EEG)	Evrişimli Sinir Ağları	%92,95
Zhu vd., 2014	Elektroensefalografi (EEG)	Evrişimli Sinir Ağları	%94,68
Becerra vd., 2019	Elektroensefalografi (EEG)	Destek Vektör Makinesi	%93
Gwak vd., 2020	Elektroensefalografi (EEG)	Destek Vektör Makinesi	%95,4

Sürücü yorgunluğu ve uykululuk tespiti, son yıllarda bilgisayarlı görü ve yapay zekâ alanında en çok araştırılan konular arasında yer almaktadır. Bu çalışmalar, özellikle yüz ifadeleri, göz hareketleri ve baş pozisyonları gibi görsel özniteliklerin analizine dayanmakta ve farklı donanım ve yazılım yaklaşımlarıyla gerçekleştirilmiştir.

(Kaushik ve Yadav, 2024) benzer teknikleri kullanarak uykulu hâl tespitinde gerçek zamanlı yüz ifadeleri tanıma sistemlerinin verimliliğini artırmışlardır. (Kumar vd., 2021) ise Haar Kaskat algoritması temelli bir sürücü destek sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, uykululuk tespitine odaklanarak araç stabilitesini artırmayı ve kazaları önlemeyi hedefleyen birbiriyle bağlantılı modüllerden oluşmaktadır. (Priadana ve Habibi, 2019) görüntülerden Haar özniteliklerini çıkararak yüz algılama yöntemi kullanmışlardır. (Savaş ve Becerikli, 2020), sürücü yorgunluğunu baş hareketleri ve göz kırpma özelliklerine dayalı olarak sınıflandıran bir yaklaşım önermiştir. (Alshaqaqi vd., 2013) ana bileşeni Raspberry Pi 3 Model B olan bir sistem geliştirmiştir. Bu sistem, Pi kamera modülü ile belirli yüz işaret noktalarını kullanarak yüz ifadelerini sürekli izlemektedir. (Hossain ve George, 2018) Raspberry Pi, kamera modülü ve sesli uyarı bileşenlerinden oluşan müdahalesiz ve gerçek zamanlı bir uykululuk tespit sistemi önermiştir. Bu sistemde Haar Kaskat algoritması ile yüz işaret noktaları tespit edilmekte, Göz En-Boy Oranı(EAR) değeri 0,25'in altına düştüğünde sürücünün uykulu olduğu

belirlenmektedir. (Constantin vd., 2018) sürücü yüzleri ve gözleri üzerinde Haar Kaskat algoritmasını eğiterek etkili yüz ve göz algılayıcılar geliştirmiş ve bunların hiyerarşik sistemlere entegrasyonunu önermiştir.

Araştırmacılar, uyuşukluğu tespiti amacıyla göz hareketleri ve değişikliklerini de incelemişlerdir. (Liu vd., 2010) göz kapağı hareketlerinin zaman farkı görüntüleriyle analiz edilmesine dayalı bir yöntem önermiştir. Gözün açık veya kapalı olması, görüntülerin beyaz piksel sayısına ve ardışık karelerdeki farklarına göre değerlendirilmiştir. (Arimitsu vd., 2007) sürücülerin uyanık kalmalarını sağlamak için koltuk kemerine entegre titreşim motoru kullanan bir uyarı sistemi geliştirmiştir. Uyarının etkinliği, titreşimin büyüklüğü, süresi ve tekrarlama sıklığına göre değişmektedir. (Sigari, 2009) gözün açık veya kapalı olmasına bakmadan yüzün üst yarısının yatay projeksiyonunu kullanarak hipovijilans (dikkat azalması) tespiti yapmıştır. (Tabrizi ve Zoroofi, 2008) gözün açık veya kapalı olma durumunu belirleyerek yorgunluk tespitini müdahalesiz biçimde gerçekleştiren bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, kromatik tabanlı bir algoritma kullanmakta olup gözlerin kapalı olduğu durumda daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. (Omidyeganeh vd., 2011) yapısal benzerlik ölçümüne dayalı bir yöntem geliştirerek göz konumunu belirlemiş ve Göz En-Boy Oranını (EAR) analiz etmiştir.

(Jadhav vd., 2020) sürücü güvenliğini artırmak amacıyla makine öğrenmesi algoritmalarını kullanarak sürücülerin fiziksel ve duygusal durumlarını anlık olarak izleyen bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu sistem, kamera tabanlı göz hareketi izleme yoluyla uyuşukluğu tespit etmekte ve gerekli durumlarda işitsel veya titreşimli uyarılar vermektedir. Araştırmacılar, özellikle Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS) algoritmasının yüksek verimliliği sayesinde sürücü yorgunluğunun erken tespitinin mümkün olduğunu vurgulamışlardır. (Hong vd., 2007) yüz bölgesini belirlemek için Viola-Jones algoritması kullanmış ve göz konumunu geometrik projeksiyonla belirleyen gerçek zamanlı bir sistem geliştirmiştir. (Mandal vd., 2016) otobüs sürücülerinin gözünün kapalı olup olmadığını kontrol etme tabanlı bir yorgunluk tespit sistemi geliştirmiştir. Sistem; baş-omuz tespiti, yüz tespiti, göz tespiti ve göz kapağı kapanma oranı gibi modüllerden oluşmaktadır. Gözün açık veya kapalı olma durumunu tahmin etmek için spektral regresyon ve birleştirme algoritmaları kullanılmıştır.

(Kumar ve Bhowmick, 2009) kızılötesi kameralarla göz bebeklerini izleyerek sürücü uyuşukluğunu belirlemiş ve sistemin yüksek doğrulukla çalışabilmesi için geniş bir eğitim veri setine ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. (Deng ve Wu, 2019) sürücülerin göz kırpma, ağız hareketleri ve göz kapalı kalma süresini analiz eden DriCare adlı sistemi önermiştir. Bu sistem, 68 yüz işaret noktasına dayalı yüz takip algoritması kullanmakta ve %92 doğruluk oranı elde etmektedir.

(Ananthi vd., 2023) Göz En-Boy Oranı(EAR) yöntemini kullanarak sürücünün göz kapanma oranını analiz eden bir sistem geliştirmiştir. Eğer sürücünün gözü en az 40 kare boyunca kapalı kalıyor veya dakikadaki göz kırpma oranı 8'den az oluyorsa, sistem sürücünün uykulu olduğunu tespit etmektedir. (Yan vd., 2016) ise gri tonlamalı görüntü işleme ve Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS) temelli gerçek zamanlı bir uyuşukluk tespit sistemi önermiştir. Sistem; yüz konumunu belirleme, göz pozisyonu hesaplama ve kişisel yorgunluk modeline dayalı sürekli izleme modüllerinden oluşmaktadır.

Tablo 1.2 Yüz ve Göz Tespitine Yönelik Yapılmış Çalışmalar

Kaynak	Metrik	Sensör	Sınıflandırma Metodu	Doğruluk
Liu vd., 2010	Göz Tespiti	Kamera	Yüzün Bölümleri	%98
Arimitsu vd., 2007	Göz Tespiti	Kamera	Elektrookülo grafi	Gerçek Zamanlı Tespit
Sigari, 2009	Göz Tespiti	Kamera	PERCLOS	Gerçek Zamanlı Tespit
Tabrizi ve Zoroofi, 2008	Göz Tespiti	Kamera	PERCLOS	%96,9
Omidyeganeh vd., 2011	Göz ve Yüz Tespiti	Kamera	Bulanık Mantık	%98
Jadhav vd., 2020	Göz Tespiti	Kamera	PERCLOS	Düşük Işıқта Etkisiz
Hong vd., 2007	Göz Tespiti	Kamera	Haar Algoritması	Gerçek Zamanlı Sistem
Mandal vd., 2016	Göz Tespiti	Kamera	PERCLOS	Gerçek Zamanlı Sistem
Kumar ve Bhowmick, 2009	Göz ve Yüz Tespiti	IR Kamera	Euler	Gerçek Zamanlı Sistem
Deng ve Wu, 2019	Göz ve Yüz Tespiti	Video	DriCare	%92
Ananthi vd., 2023	Göz Tespiti	Video	Haar Algoritması	Gerçek Zamanlı Sistem
Yan vd., 2016	Göz Tespiti	Kamera	PERCLOS	Gerçek Zamanlı Sistem

Görüntü verilerinin yanında hareket sensörleri de yorgunluk tespitinde etkili şekilde kullanılmaktadır. Özellikle MPU6050 sensörü, başın eğim ve ivme değerlerini ölçerek sürücünün dikkat kaybı veya uyuklama hareketlerini analiz etmede kullanılmaktadır. (Hossain ve George, 2018) Raspberry Pi ve MPU sensörü

kullanarak baş eğimlerini izleyen bir sistem geliştirmiştir. Bu çalışmalarda görsel verilerle sensör verilerinin birleştirilmesi doğruluğu artırmıştır.

Tablo 1.3 Önerilen Sistemin Literatür Taramasında Elde Edilen Bulgulara Dayalı Mevcut Çalışmalarla Karşılaştırmalı Analizi

Çalışma	Yıl	Metodlar	Test
Alshaqaqi vd.,	2013	Gözün Kapanma Süresi ile Yorgunluk Tespit Yöntemi	Gerçek Zamanlı
Schmidt ve Kasinski	2007	Haar Kaskat Görüntüsünden Yorgunluk Tespit Yöntemi(Fotoğraf Alarak)	Gerçek Zamanlı
Hossain ve George	2018	Gözün Kapanma Oranı ile Yorgunluk Tespit Sistemi	Gerçek Zamanlı
Constantin vd.,	2018	OpenCV-Haar Kaskat ile Yorgunluk Tespiti	Gerçek Zamanlı
Priadana ve Habibi	2019	Fotoğraftan OpenCV-Haar Kaskat ile Yorgunluk Tespit Sistemi	Gerçek Zamanlı
Savaş ve Becerikli	2020	Yapay Sinir Ağları ile Yorgunluk Tespiti	Gerçek Zamanlı
Kumar vd.,	2021	OpenCV-Haar Kaskat ile Yorgunluk Tespiti	Gerçek Zamanlı
Önerilen Çalışma	2025	OpenCV-Haar Kaskat ile MPU6050 Sensörü Kullanarak Yorgunluk Tespiti	Gerçek Zamanlı

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, mevcut sistemlerin büyük çoğunluğunun tek bir veri kaynağına dayandığı ve bu nedenle gerçek zamanlı izleme performansının sınırlı kaldığı görülmektedir. Özellikle, fizyolojik verilere dayalı sürücü yorgunluğu tespit sistemleri yüksek doğruluk oranları sunsa da bazı uygulama kısıtlamalarına sahiptir. Sensörlerin doğrudan vücutla temas etmesi, kullanıcıda rahatsızlık hissi oluşturmakta ve ölçüm sürecinin uzunluğu bu tür sistemlerin gerçek zamanlı sürücü izleme uygulamalarında etkin biçimde kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerle son yıllarda yapılan araştırmalar, görüntü işleme tabanlı, temassız ve gerçek zamanlı tespit sistemlerine yönelmiştir. Ancak yalnızca görsel verilere dayanan bu sistemler, aydınlatma koşulları, kamera açısı ve sürücünün fiziksel özelliklerinden etkilenmeleri sebebiyle tespit doğruluğu

açısından sınırlılıklar taşımaktadır. Bu çalışma, söz konusu sınırlamaları aşmak amacıyla sürücü yorgunluğunu gerçek zamanlı olarak tespit edebilen, düşük maliyetli ve entegre edilebilir bir sistem tasarlamayı hedeflemektedir. Önerilen sistem, Haar Kaskat algoritması yöntemi ile sürücünün yüz ve göz hareketlerini analiz ederken, aynı zamanda araç içi kamera ve MPU6050 ivmeölçer sensörü aracılığıyla baş hareketlerini izlemektedir. Bu bütünleşik yapı sayesinde, yalnızca görsel verilere dayanan sistemlerin eksik kaldığı durumların ötesine geçilmekte; birden fazla veri kaynağının bir arada kullanımıyla yorgunluk tespiti daha güvenilir ve kararlı hale getirilmektedir. Özellikle, ivmeölçer sensöründen elde edilen baş eğimi, ani düşüşler ve yönelim değişikliklerinin analizi, sürücü yorgunluğunun doğru biçimde algılanmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Literatürde yer alan ve çoğunlukla yalnızca görüntü işleme tekniklerine odaklanan önceki çalışmaların (Alshaqaqi vd., 2013; Schmidt ve Kasinski, 2007; Hossain ve George, 2018; Constantin vd., 2018; Priadana ve Habibi, 2019; Savaş ve Becerikli, 2020; Kumar vd., 2021) aksine, bu çalışma hem görsel hem de hareket verilerini birleştirerek daha sağlam bir analitik temel sunmaktadır. Ayrıca, sistemin düşük maliyetli donanım bileşenleri (Raspberry Pi, Pi kamera modülü, MPU6050 sensörü) ile inşa edilebilmesi, erişilebilirliğini ve ticari uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bununla birlikte, sisteme titreşim motorunun entegrasyonu sayesinde, yorgunluk tespit edildiğinde sürücüye dokunsal geri bildirim verilmekte ve bu sayede sürücünün dikkatinin yeniden toplanması sağlanmaktadır. Sonuç olarak, literatürdeki mevcut çalışmalar göz önüne alındığında, önerilen yaklaşım hem teknik kapasite hem de pratik uygulanabilirlik açısından önemli bir yenilik sunmakta ve görüntü işleme tabanlı yorgunluk tespit sistemlerinde mevcut boşluğu büyük ölçüde doldurmaktadır.

1.5 Tezin Yapısı

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde araştırmanın amacı, kapsamı ve önemi ele alınarak konuya genel bir bakış sunulmuştur. İkinci bölümde araştırmada kullanılan materyal ve yöntemler ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Üçüncü bölümde elde edilen bulgular sunulmuş, dördüncü bölümde ise bu bulgular literatürle karşılaştırılarak tartışılmıştır. Son bölümde sonuçlar özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler geliştirilmiştir.

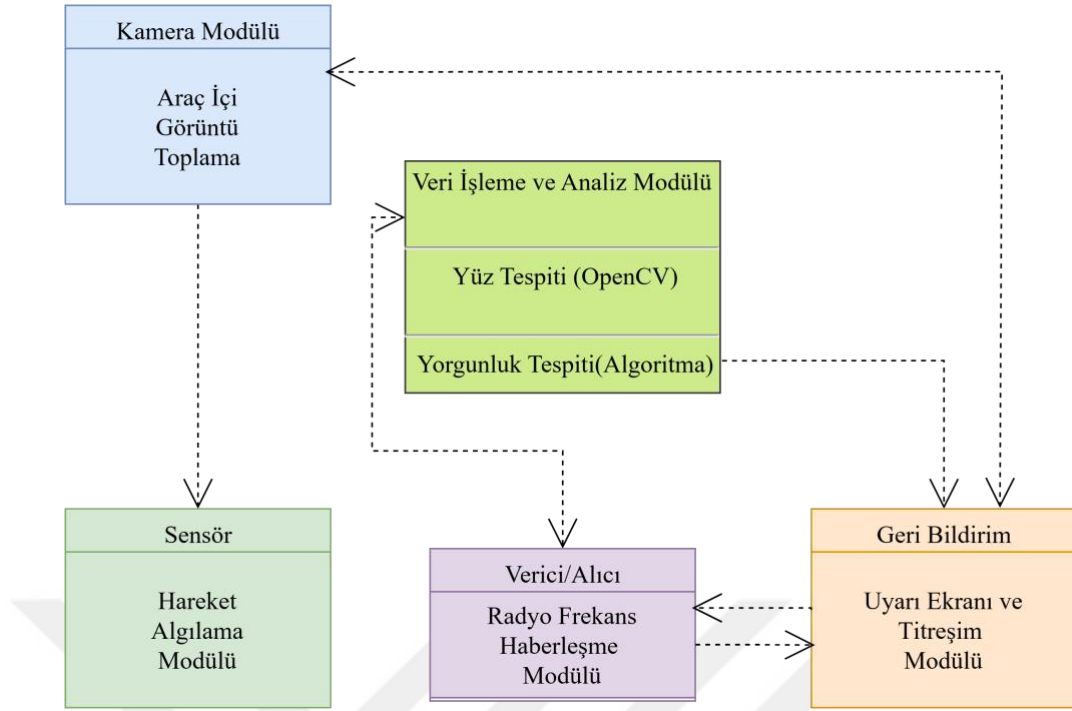
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde geliştirilen sistemin mimarisi, sistemde kullanılan donanım bileşenleri, sistemin yazılım algoritması, yüz tespit aşamaları ve deneysel ortamda test aşaması hakkında bilgi verilmiştir.

2.1 Sistem Tasarımı

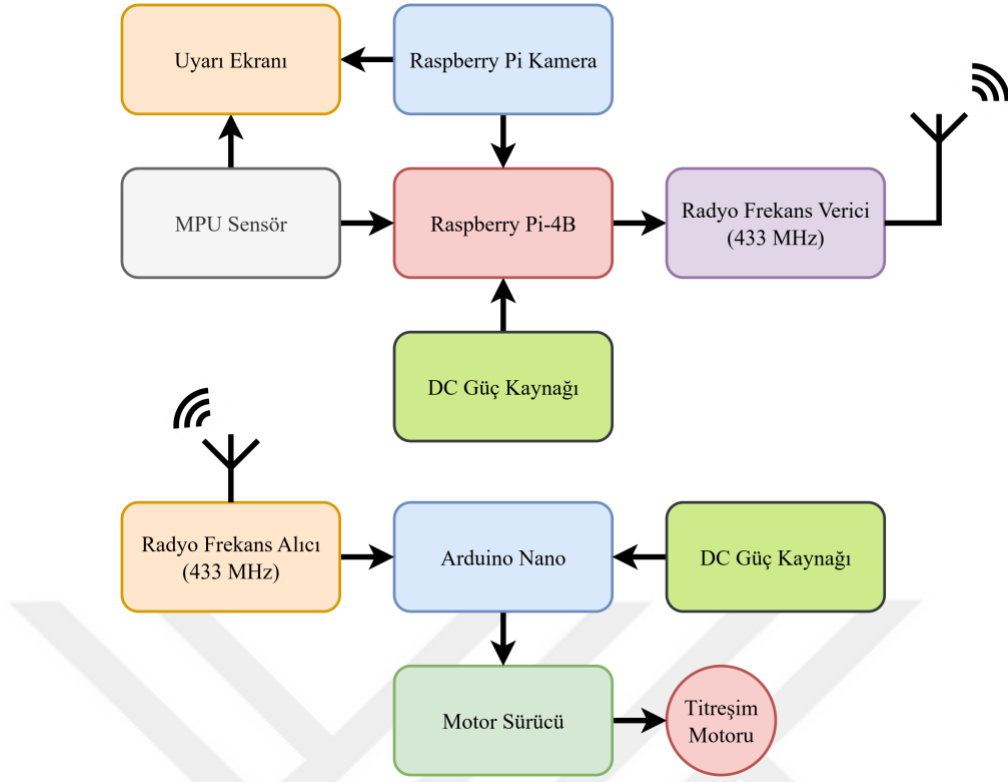
Geliştirilen sürücü yorgunluğu tespit sistemi, birden fazla donanım ve yazılım bileşeninin entegre çalışmasıyla gerçek zamanlı veri işleme ve uyarı mekanizması oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem mimarisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Sistem, beş ana modülden oluşmaktadır: Kamera modülü, sensör modülü, veri işleme ve analiz modülü, verici/alıcı (Radyo frekans haberleşme) modülü ve geri bildirim modülü.

Kamera modülü, araç içi görüntü toplama görevini üstlenmektedir. Bu modül, sürücünün yüz bölgesine ait görüntüleri gerçek zamanlı olarak yakalayıp veri işleme ve analiz modülüne iletir. Görüntü verileri, sistemin temel giriş bileşenidir. Sensör modülü, araç içinde sürücünün baş hareketlerini tespit etmek için MPU6050 ivmeölçer ve jiroskop tabanlı sensör kullanılmıştır. Bu modül, sürücünün ani baş hareketlerini ya da vücut pozisyonundaki değişimleri algılayarak veri toplar. Elde edilen sensör verileri, sürücünün fiziksel aktivitesini değerlendirmek üzere yine analiz modülüne aktarılır. Veri işleme ve analiz modülü, sistemin çekirdek bileşenidir. Bu modülde OpenCV kütüphanesi versiyon 4.11.0 kullanılarak yüz tespiti gerçekleştirilmekte ve Göz En-Boy Oranı(EAR) ile yorgunluk düzeyi hesaplanmaktadır. Görüntü işleme algoritması, belirlenen eşik değerleri üzerinden sürücünün uykulu ya da yorgun olup olmadığını analiz eder. Analiz sonuçları, verici/alıcı modülü aracılığıyla geri bildirim modülüne iletilir. Bu modül, sistem bileşenleri arasında Radyo Frekans(RF) haberleşmesi sağlar. Böylece, sürücü kabininde bulunan uyarı sistemine veriler kablosuz olarak aktarılır. Son aşamada geri bildirim modülü, sürücüye görsel ve titreşimli uyarı verir. Uyarı ekranı, sürücüye sistemin algıladığı durumu gösterirken, titreşim motoru aracılığıyla fiziksel uyarı sağlanır. Bu çift yönlü uyarı mekanizması, sürücünün dikkatinin yeniden toplanmasını hedefler. Bu mimari yapı sayesinde sistem, düşük maliyetli donanımlar kullanılarak hem görüntü hem sensör tabanlı verileri bütünleştirir ve sürücünün yorgunluk durumunu tespit eder.



Şekil 2.1 Sistem Mimarisi

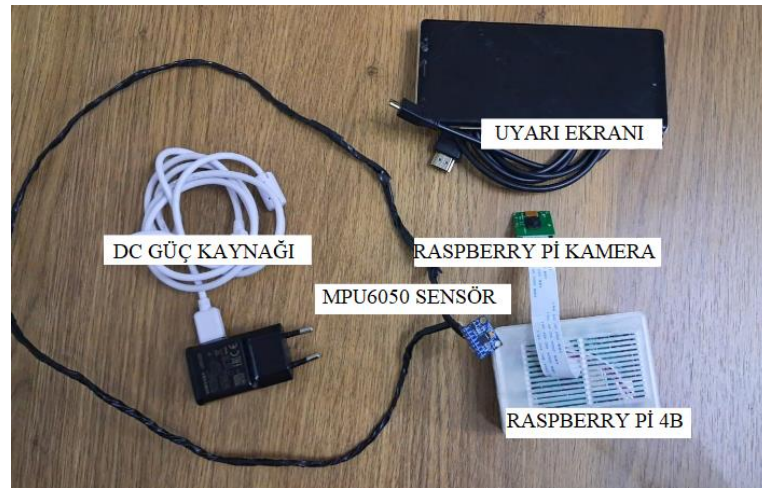
Şekil 2.2’de sürücü yorgunluğu tespit sisteminin donanım bileşenleri arasındaki veri akışını gösteren blok diyagram sunulmaktadır. Bu yapı, sistem mimarisinde tanımlanan modüllerin fiziksel bileşenler üzerinden nasıl entegre edildiğini ortaya koymaktadır. Sistemin merkezinde yer alan Raspberry Pi 4B, hem görüntü işleme hem de sensör verilerinin analizinden sorumlu olan ana kontrol birimidir. Raspberry Pi Kamera Modülü ile sürücünün yüz görüntüsü elde edilirken, MPU sensör aracılığıyla baş ve vücut hareketlerine ilişkin veriler toplanır. Bu veriler, Raspberry Pi üzerinde çalışan OpenCV tabanlı yorgunluk tespit algoritması tarafından işlenmektedir. Elde edilen analiz sonuçları, 433 MHz radyo frekans verici modülü aracılığıyla kablosuz olarak Arduino Nano kartına iletilmektedir. Arduino Nano, radyo frekans alıcı modülü üzerinden aldığı verileri işleyerek sürücüyü fiziksel olarak uyarmakla görevlidir. Motor sürücü devresi, Arduino’dan aldığı komut doğrultusunda titreşim motorunu çalıştırır. Sistemdeki tüm bileşenler Doğru Akım (DC) güç kaynağı ile beslenmektedir. Ayrıca, sürücüye görsel bildirim sağlamak amacıyla bir uyarı ekranı da Raspberry Pi’ye bağlanmıştır.



Şekil 2.2. Bağlantı Şeması

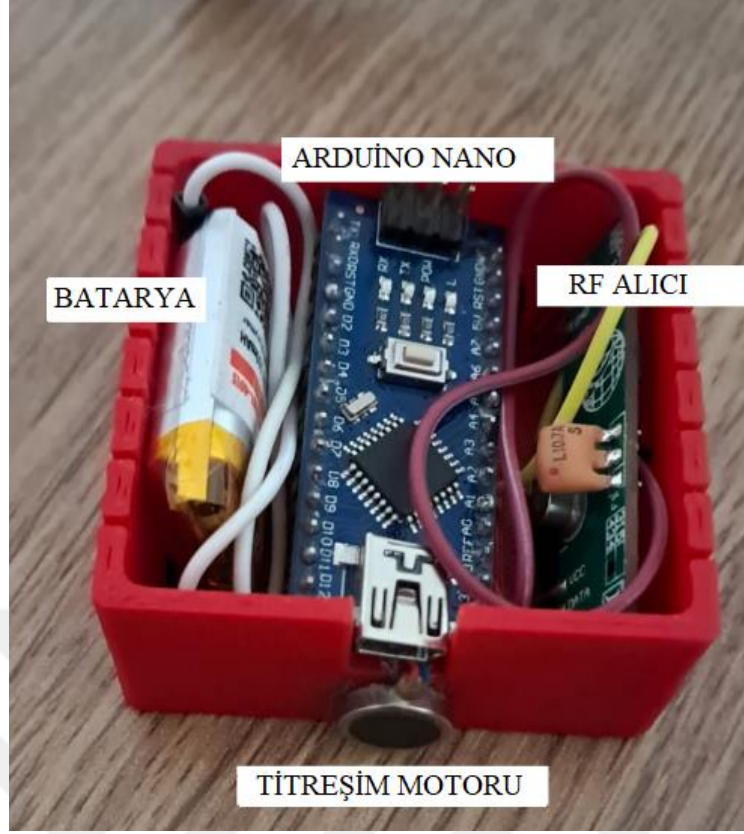
2.2 Kullanılan Donanım Bileşenleri

Geliştirilen sistemde yorgunluk belirleme donanım devresi Fotoğraf 2.1’de gösterilmiştir.



Fotoğraf 2.1 Yorgunluk Belirleme Donanım Devresi

Fotoğraf 2.2’de ise sürücüye fiziksel uyarıyı sağlamak amacıyla tasarlanan taşınabilir alıcı donanım devresi gösterilmiştir.

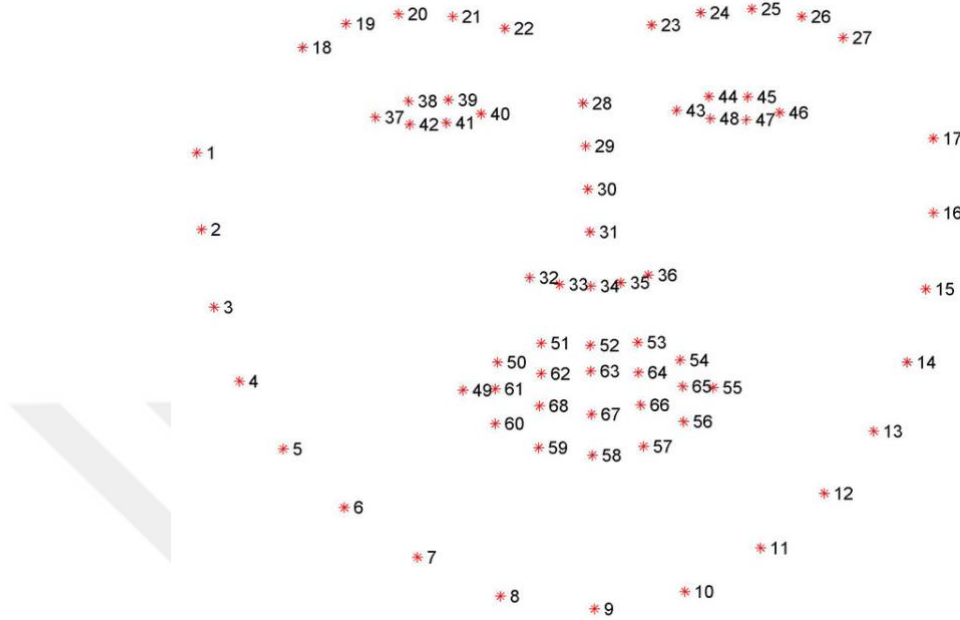


Fotoğraf 2.2 Alıcı Donanım Devresi

2.3 Yazılım Bileşenleri ve Algoritmalar

Sistem, Python dili ile geliştirilmiştir. Görüntü işleme için OpenCV versiyon 4.11.0, yüz ve göz koordinatlarını belirlemek için Dlib Python versiyon 3.12 kütüphanesi kullanılmıştır. Dlib kütüphanesi tarafından sağlanan 68 noktalı yüz işaretleyici modeli kullanılmıştır. Bu model, gözler, kaşlar, burun, ağız ve çene hattı gibi temel yüz bölgelerine karşılık gelen 68 anahtar noktanın doğru bir şekilde tespit edilmesini ve konumlandırılmasını sağlar. Dlib'in 68 noktalı yüz işaretleyici dedektörü, yüz analizi, hizalama ve yüz ifadelerinin tanınması gibi çeşitli bilgisayarla görme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olup, hem akademik hem de endüstriyel alanlarda etkinliğini kanıtlamıştır. Şekil 2.3'te gösterildiği üzere, özellikle 37 ila 48 numaralı yüz işaret noktaları göz bölgelerini tanımlamak için kullanılmıştır. Bu noktalara dayanarak bir alan değeri hesaplanmış ve önceden belirlenmiş bir eşik değeriyle karşılaştırılmıştır; eğer hesaplanan alan bu eşik değerinin altına düşerse, bu durum göz kapalı olarak yorumlanmıştır. Göz kapanma tespiti, uykululuk durumunun zamanında belirlenebilmesi için gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemsel yaklaşım, birden fazla yüz

özelliğini entegre ederek sürücü uykululuk tespit sisteminin genel performansını ve güvenilirliğini artırmakta, böylece sürücünün farkındalık düzeyinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır(Kazemi ve Sullivan, 2014).



Şekil 2.3. Yüz Koordinatları

Yüz bölgesinin tespiti için 2001 yılında Paul Viola ve Michael Jones tarafından geliştirilen Haar Kaskat algoritması yöntemi, bu sorunlara gerçek zamanlı bir çözüm sunarak yüz tespiti alanında devrim yaratmıştır (Viola & Jones, 2001). Algoritma, dört temel bileşen üzerine kuruludur:

1. Haar benzeri özellikler
2. Birleşik görüntü
3. AdaBoost algoritması
4. Kaskat yapı

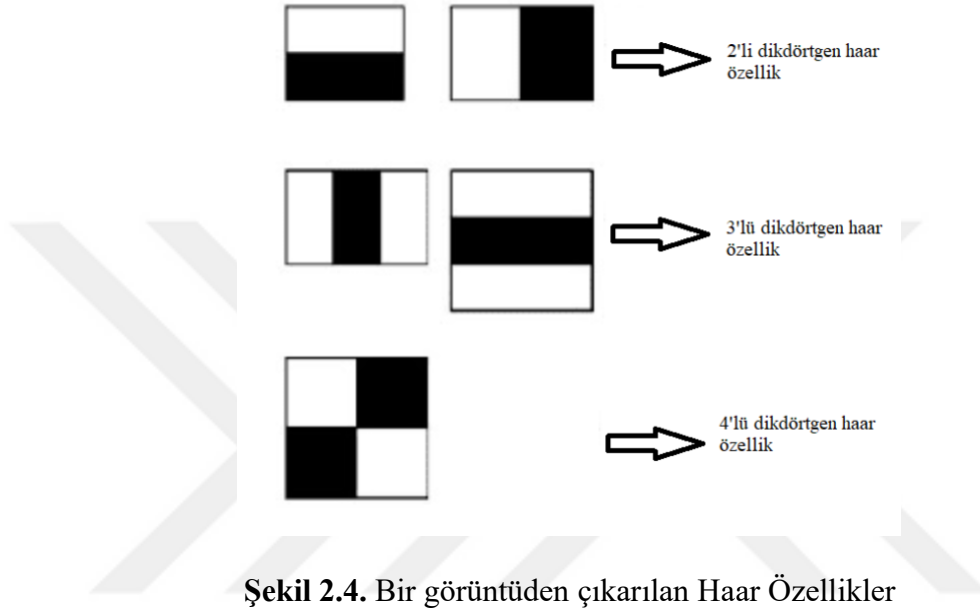
Haar özellikleri, bir görüntü üzerindeki parlaklık farklarını temsil etmek için kullanılan basit dikdörtgen biçimli filtrelerdir. Bu özellikler, görüntü üzerinde belirli bölgelerin parlaklığını hesaplayarak nesneleri tanımlamada kullanılır. Her Haar özelliği, beyaz ve siyah alanlar arasındaki yoğunluk farkına dayanır.

Bir Haar özelliği şu şekilde tanımlanabilir:

$$f = \sum_{(x,y) \in beyaz} I(x,y) - \sum_{(x,y) \in siyah} I(x,y) \quad (1,1)$$

Burada $I(x,y)$, (x,y) koordinatındaki pikselin gri seviye değerini verir(Viola & Jones, 2001).

Yüz bölgesinin tespiti için iki tip örnek görüntü örnekleri toplanır. Bu örnekler sırasıyla pozitif örnekler ve negatif örnekler olarak sınıflandırılır. Pozitif örnekler yüz görüntüsünü içerirken negatif görüntüler yüz dışındaki herhangi bir görüntü olabilir. Bu sınıflandırmanın sebebi adaboost algoritmasını ve kaskat sınıflandırıcıyı kullanarak pozitif ve negatif görüntüleri ayırt etmektir(Viola & Jones, 2001).



Şekil 2.4. Bir görüntüden çıkarılan Haar Özellikler

Şekil 2.4'te bir görüntüden çıkarılan Haar özellikleri verilmiştir. 2'li dikdörtgen Haar özelliği, göz bölgesini oluşturan koyu ve açık bölgeler arasındaki farkı temsil eder. 3'lü dikdörtgen Haar özelliği, burun veya dudak bölgesi gibi ortası koyu kenarları açık alanları temsil eder. 4'lü dikdörtgen Haar özelliği ise yüzün köşelerini ve kenar parlaklıklarını temsil eder. Her bir özellik, farklı ölçek ve konumlarda uygulanarak yüzün karakteristik bölgelerini (göz, burun, ağız, alın vb.) tanımlamakta kullanılır. Fotoğraf 2.3'te yüz bölgesi için Haar özelliği gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.3. Yüz Bölgesi için Haar Özelliklerinin Görüntüsü

Algoritmanın bir sonraki aşaması olan birleşik görüntü, bir görüntüdeki yüzlerce Haar özelliğini belirlemekte ve farklı ölçeklerdeki görüntülerde kullanılır. Bütünleştirme, piksel değerlerinin küçük birimlerinin eş zamanlı olarak eklenmesidir. Her pikselin birleşim değeri sol üstten sağ alta kadar olan tüm piksellerin toplamıdır. Tüm görüntü her piksel başına birkaç tamsayı işlemi kullanılarak toplanır. Belirli özelliklerin seçimi eşik değerini belirlemek için kullanılır. Viola Jones ve AdaBoost adlı bir makine öğrenimi yöntemini kullanır. AdaBoost, yalnızca belirli özellikleri seçen büyük sayıda özellik seçen bir algoritmadır. Eğitim verilerinin her özelliğinin değerlendirilmesi özelliğin değeri olarak yapılır. Nesneler veya nesneler arasındaki en büyük kısıtlamalara sahip olan özellikler en iyi özellikler olarak kabul edilir(Soukupova ve Cech, 2016).

1	2	2	4	1
3	4	1	5	2
2	3	3	2	4
4	1	5	4	6
6	3	2	1	3

Giriş Görüntüsü

0	0	0	0	0	0
0	1	3	5	9	10
0	4	10	13	22	25
0	6	15	21	32	39
0	10	20	31	46	59
0	16	29	42	58	74

Birleşik Görüntü

Şekil 2.5. Örnek Haar Özellikli Giriş Görüntüsü ve Birleştirilmiş Görüntülerin Piksel Sayıları

Algoritmanın diğer aşaması olan AdaBoost algoritması, çok sayıda zayıf sınıflandırıcıyı birleştirerek güçlü bir sınıflandırıcı oluşturur (Freund ve Schapire, 1997). Her zayıf sınıflayıcı, bir Haar özelliğine dayalı basit bir karar verir. AdaBoost, her eğitim örneğine bir ağırlık atar ve yanlış sınıflandırılan örneklerin ağırlığını artırarak sonraki işlemlerde daha doğru sınıflandırılmasını sağlar.

Her zayıf sınıflayıcı için hata oranı şu şekilde tanımlanır:

$$\epsilon_t = \sum_i \omega_i |h_t(x_i) - y_i| \quad (1.2)$$

Burada $h_t(x_i)$ zayıf sınıflandırıcının tahmini, y_i ise gerçek etikettir. Her sınıflandırıcıya ait ağırlık:

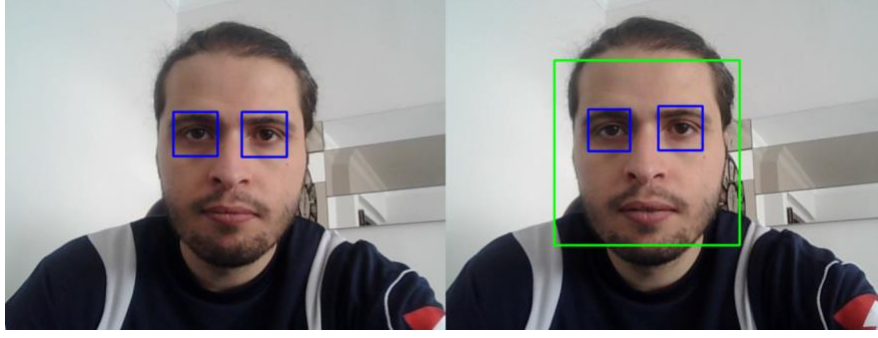
$$\alpha_t = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1-\epsilon_t}{\epsilon_t} \right) \quad (1.3)$$

olarak belirlenir. Nihai güçlü sınıflandırıcı ise şu şekilde belirlenir (Freund ve Schapire, 1997).

$$H(x) = \text{sign}(\sum_i \alpha_t h_t(x)) \quad (1.4)$$

Bu süreç sonunda yalnızca en etkili sonuçlar elde edilir. Gereksiz sonuçlar ortadan kaldırılır (Viola & Jones, 2001).

Bu aşamadan sonra eğitim süreci, pozitif (yüz içeren) ve negatif (yüz içermeyen) örneklerin hazırlanmasıyla başlar. Her örnek üzerinden Haar özellikleri çıkarılır ve AdaBoost algoritması kullanılarak en anlamlı özellikler seçilir. Daha sonra, bu özellikler kaskat yapının her bir aşamasına yerleştirilir. Eğitim tamamlandığında, sonuçta elde edilen model XML formatında saklanır ve uygulama aşamasında doğrudan kullanılabilir (Shetty ve Reberio, 2021). Şekil 2.6'da algoritma sonucu elde edilen yüz ve göz bölgesine ait bir görüntü verilmiştir.



Fotoğraf 2.4. Algoritma Sonucu Yüz ve Göz Bölgesinin Belirlenmesine Ait Bir Görüntü

Yüz tespit işlemleri bittikten sonra sürücünün yorgunluğunu tespit edebilmek için (Soukupova ve Cech, 2016) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, göz bölgesine ait işaret noktaları arasındaki geometrik ilişkiyi tanımlayan bir matematiksel model önerilmiştir. Bu model, gözün üst ve alt kenarlarını temsil eden noktalar arasındaki dikey mesafeler ile gözün yatay eksenini tanımlayan yatay mesafe arasındaki oranı kullanarak, göz şeklinin geometrik yapısını kompakt ve hesaplama açısından verimli bir biçimde ifade etmektedir. Bu geometrik ilişki, Göz En-Boy Oranı(EAR) olarak adlandırılmıştır(Soukupova ve Cech, 2016). Göz En-Boy Oranı(EAR) değeri, göz açıklığının düzeyini nicel (sayısal) olarak değerlendirmeyi mümkün kılan, dikey ve yatay mesafeler arasındaki oran esasına dayalı bir metriktir. Bu oran, göz kapaklarının hareketini sürekli ve doğru bir biçimde izleyebilme olanağı sunduğundan, gerçek zamanlı yorgunluk ve uykululuk tespiti uygulamalarında oldukça etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Özellikle değişen aydınlatma koşulları ve baş pozisyonundaki küçük değişiklikler altında dahi, göz açıklığındaki küçük varyasyonların güvenilir biçimde izlenebilmesini sağlamaktadır.

$$EAR = \frac{\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|}{2 \times \|p_1 - p_4\|} \quad (1.5)$$

Burada:

- $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ göz bölgesini temsil eden belirli yüz işaret noktalarıdır.
- $\|p_x - p_y\|$ iki nokta arasındaki Öklid uzaklığıdır.

Bu denklemden, üst ve alt göz kapaklarını temsil eden iki dikey mesafenin toplamı, gözün yatay genişliğine oranlanmaktadır. Göz En-Boy Oranı(EAR)

değeri, göz açıkken yüksek, göz kapalıyken ise düşük bir değer alır. Böylece, 25 değerinin altına düşen EAR göz kapama durumu olarak yorumlanır.

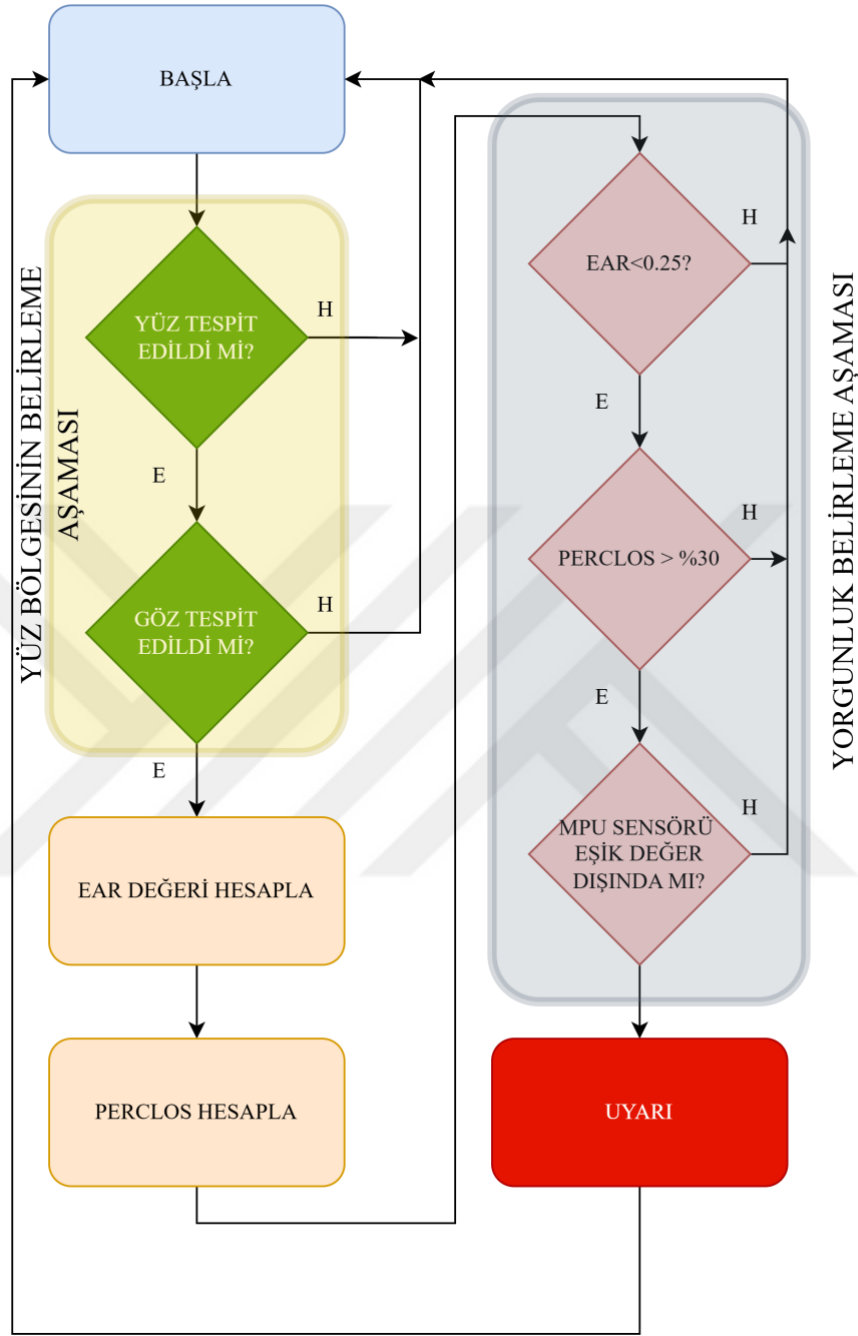
$$\text{Göz En – Boy Oranı(}EAR\text{)} = \begin{cases} x > 0,25, & \text{Gözler açık} \\ x < 0,25, & \text{Gözler kapalı} \end{cases} \quad (1.6)$$

Göz En-Boy Oranı (EAR) değeri 25'in altına indikten sonra göz kapanma yüzdesi olarak tanımlanan Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS), belirlenen bir zaman dilimi içinde göz kapağının minimum %30'ünün kapalı kaldığı sürenin oranı olarak uyuşukluk tespit sistemlerinde kullanılan indekstir. Uyuşukluk seviyesi Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS) eşik değerine dayalı olarak değerlendirilebilir. Göz karelerinin bir dakika içinde yakalanan açık veya uyanık olma durumunu temsil etmek için N_a değişkeni kullanılmıştır. Bir dakika içinde yakalanan tüm görüntüler ise N_m değişkeninde temsil edilmiştir. $N_m - N_a$ bir dakika içinde yakalanan görüntülerden uyanık olma durumunu temsil eden görüntüler çıkarıldığı zaman sürücünün uyukladığı kareler tespit edilir. Aşağıdaki formülde sürücünün uyuklayıp uyuklamadığının tespiti için Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS) eşik değerinin yüzdesi hesaplanmıştır(Wierwille vd., 1994).

$$\text{Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS)} = \frac{N_m - N_a}{N_m} \times 100 \quad (1.7)$$

Sistem sürücünün uyuşukluğunu tespit ettikten sonra ikinci doğrulama için sürücünün baş hareketlerine odaklanır. Bu aşamada MPU6050 sensöründen gelen veriler incelenir. MPU6050 sensöründen gelen verilerin analizi 3. Bölümde yapılacaktır. MPU6050 sensöründen gelen verilerin eşik değeri aşması durumunda sürücü uyarı sistemi devreye girer.

2.4 Sistem Akış Diyagramı



Şekil 2.6. Yorgunluk Belirleme Sistemi Algoritması

Şekil 2.6’da yorgunluk belirleme sisteminin algoritması gösterilmiştir. Algoritmada önce kamera görüntüsü alınır, yüz tespiti yapılır, ardından göz koordinatları belirlenir. Göz En-Boy Oranı(EAR) ve Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS) hesaplanır, sensör verileri okunur. Eğer eşik değerler aşılsa sistem “uyarı” durumuna geçer ve sürücüye titreşim gönderilir.

2.5 Deneysel Kurulum ve Test Aşaması

Sistem bileşenleri laboratuvar ortamında monte edilmiştir. Kamera, sürücünün göz hizasında sabitlenmiş, MPU6050 sensörü ise bir baş bandına yerleştirilmiştir. RF modüllerinin kapsama alanı yaklaşık 2 metredir. Python tabanlı yazılım Raspberry Pi üzerinde çalışmaktadır. Arduino IDE ile yazılan program ise Nano'ya yüklenmiştir. İki sistem seri iletişim (UART) ve radyo frekans üzerinden haberleşmektedir.

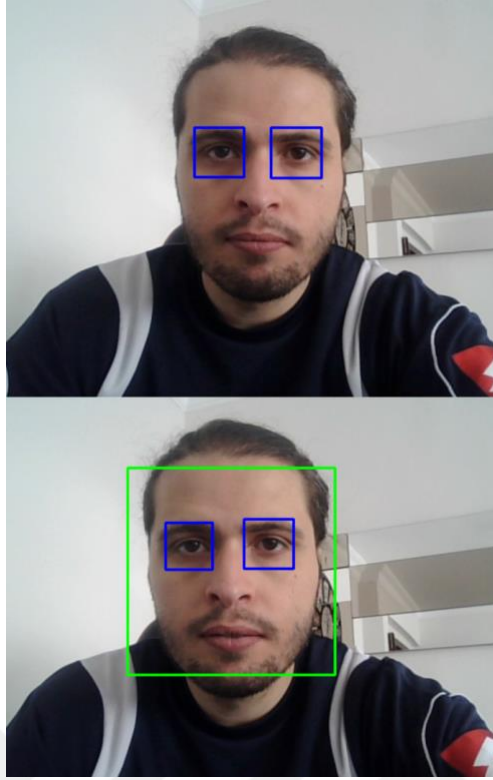


3. BULGULAR

Bu bölümde geliştirilen sürücü yorgunluk tespit sistemine ait deneysel sonuçlar, gözlemler ve performans analizleri sunulmaktadır. Çalışmada hem görüntü işleme tabanlı ölçümler Göz En-Boy Oranı(EAR) ve Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS) değerleri) hem de hareket verileri (MPU6050 sensör verileri) değerlendirilmiş, sistemin gerçek zamanlı çalışma yeteneği ve doğruluk oranları test edilmiştir.

3.1 Görüntü İşleme Modülünden Elde Edilen Bulgular

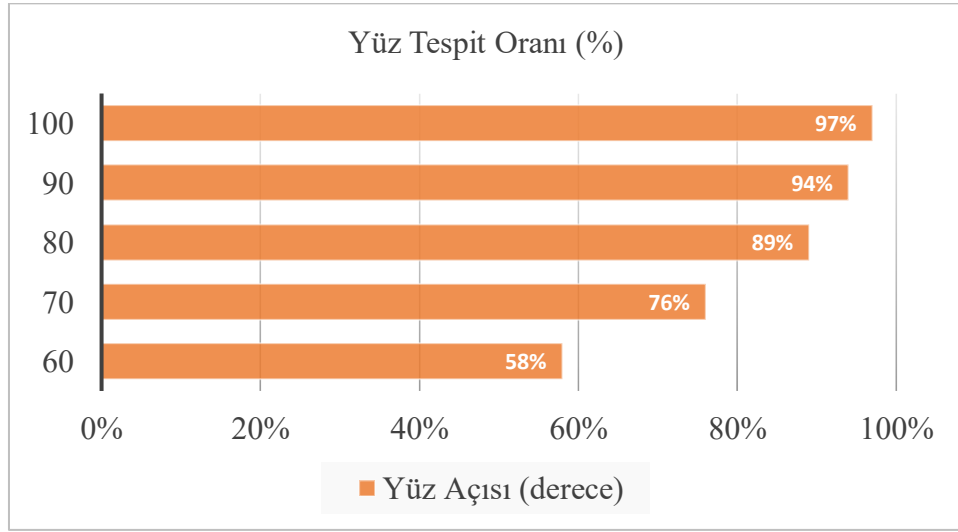
Geliştirilen sistemde sürücünün yüz ve göz hareketleri, Raspberry Pi 4B üzerinde çalışan OpenCV kütüphanesi kullanılarak analiz edilmiştir. Kamera modülü saniyede ortalama 30 kare (FPS) hızında görüntü almış, bu görüntüler gri tonlamaya çevrilerek Haar Kaskat algoritmasıyla işlenmiştir. Dlib kütüphanesi yardımıyla 68 yüz noktası tespiti yapılmış, özellikle 37–48 numaralı noktalar göz bölgesi analizi için kullanılmıştır. Fotoğraf 3.1’de görüntü işleme modülünden elde edilen görüntü verilmiştir. Yüz bölgesi ve gözler başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.



Fotoğraf 3.1. Gözlerin ve Yüzün Tespit Edilmesi

Yüz ve göz tespitinin güvenilirliğini ölçmek için deneyler farklı ışık koşullarında gerçekleştirilmiştir. Gündüz ortamında yapılan testlerde yüz ve göz tespiti oranı %97 olarak ölçülmüştür. Ancak düşük ışık koşullarında bu oran %89'a kadar düşmüştür. Bunun nedeni, düşük parlaklıkta göz kenarlarının yeterince belirgin olmamasıdır. Bu durum, sistemin gelecekte kızılötesi kamera entegrasyonu ile geliştirilebileceğini göstermektedir. Sistem ayrıca yüz yönelimindeki değişimlere karşı test edilmiştir. 0° – 20° arası açı farklılıklarında tespit başarısı yüksek kalırken, 30° 'nin üzerindeki eğimlerde yüzün kısmen kameradan çıkması sonucu tespit oranı azalmıştır. Tablo 3.1'de sistemin yüz tespit doğruluğunun farklı yüz açılara göre değişimi gösterilmektedir. Grafik, yüzün kameraya dönüklük açısı arttıkça tespit doğruluğunun azaldığını göstermektedir. Bu durum, Haar Kaskat algoritmasının önden bakışlı yüzlerde yüksek performans gösterdiğini, ancak yan profillerde (özellikle 30° üzeri) başarısının azaldığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle sistem tasarımında kamera, sürücünün göz hizasına ve ön cepheye yakın bir açıya yerleştirilmiştir.

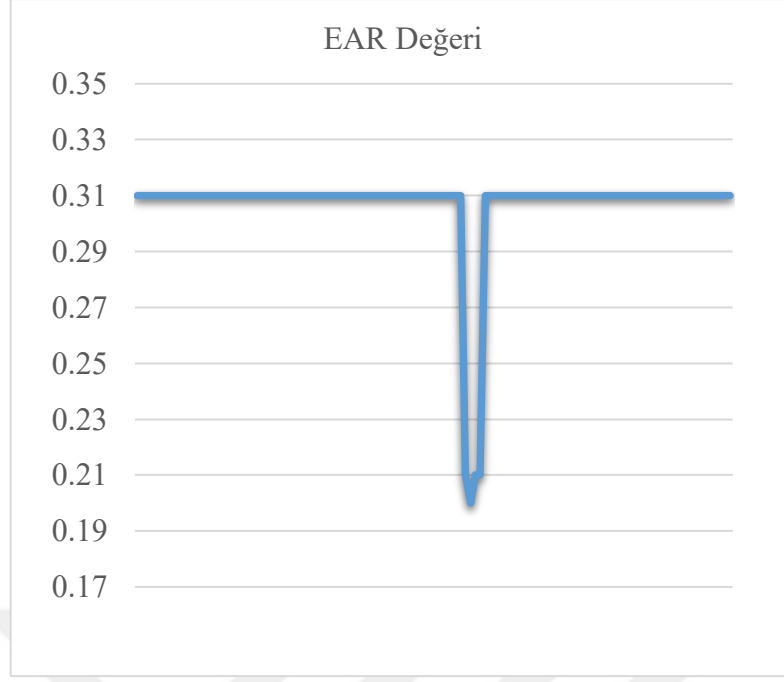
Tablo 3.1. Yüz Açılarının Kameradan Tespit Edilme Oranı



Algoritmanın bir sonraki aşamasında gözlerin kapalı olup olmadığı durum incelenecektir.

3.2 Göz En-Boy Oranı Analizi(EAR)

Göz En-Boy Oranı(EAR) değeri, göz açıklığının dikey ve yatay mesafelerinin oranı olarak tanımlanır. Normal bir göz açıklığında bu oran 0,31–0,35 aralığındadır. Çalışmada yapılan ölçümlerde gözler tamamen kapandığında bu değerin 0,18'e kadar düştüğü tespit edilmiştir. Sistem, EAR değeri 0,25'in altına düştüğünde olası yorgunluk durumu olduğunu varsaymıştır. Anlık olarak çekilen verilerle oluşturulan EAR grafiğine ait görüntü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Anlık Göz En-Boy Oranı Değeri(EAR)

Fotoğraf 3.2 ve Fotoğraf 3.3'te, Göz En-Boy Oranının(EAR) zaman içindeki değişim eğrileri ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Bu görüntüler, sürücünün göz hareketleri ve göz açıklığındaki değişimlerin zamana bağlı olarak nasıl dalgalandığını açık biçimde göstermektedir. Analiz sonucunda, Göz En-Boy Oranı (EAR) değerinin 0,25 eşik değerinin altına düştüğü anlarda sistem, “Yorgunluk Tespit Edildi” uyarısını otomatik olarak üretmiştir. Bu durum, sürücünün göz kapaklarının belirgin bir şekilde kapandığı ya da göz kırpma süresinin uzadığı anlarda, sistemin yüksek doğruluk oranıyla yorgunluk belirtilerini algılayabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, düşük hesaplama maliyeti sayesinde Raspberry Pi üzerinde gerçek zamanlı çalışmaya uygundur.



Fotoğraf 3.2. Yorgunluğun Tespit Edilmesini İçeren Görüntü 1



Fotoğraf 3.3. Yorgunluğun Tespit Edilmesini İçeren Görüntü 2

3.3 Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS) Değerinin Değerlendirilmesi

Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesinin (PERCLOS) literatürde %30 eşik değeri genellikle sürücü yorgunluğu için kritik sınır olarak kabul

edilmektedir(Öztürk vd, 2022). Bu eşik, gözlerin kesintisiz olarak uzun süre kapalı kalmasını değil; kısa süreli ancak sık tekrar eden mikro uyku ve uzamış göz kırpmalarının toplam etkisini temsil etmektedir.

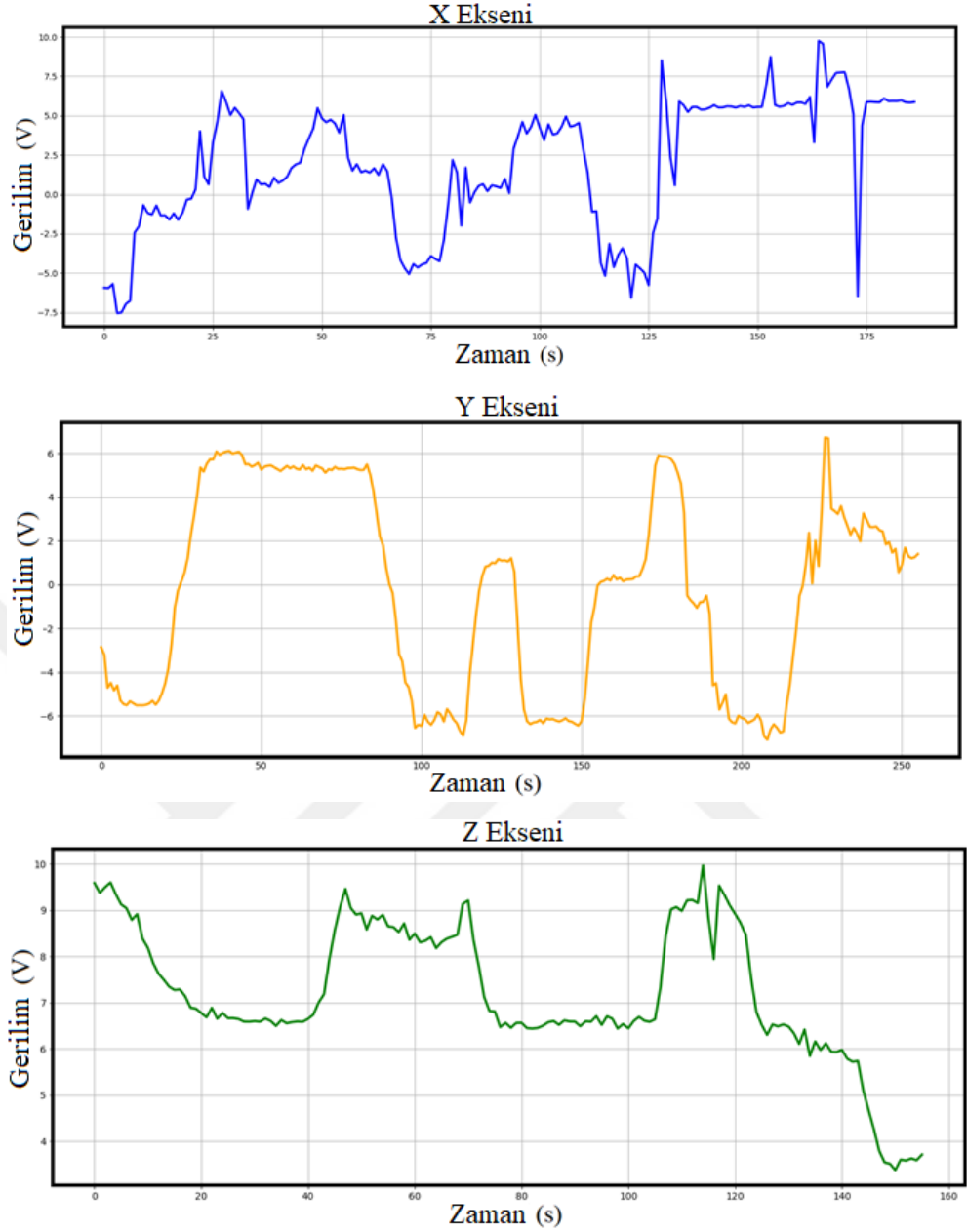
Tablo 3.2’de Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS)’a ait anlık veriler gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS)’a Ait Anlık Veriler

Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS)	Gözün Kapalı Kaldığı Süre(Saniye)	Toplam Süre(Saniye)	Durum
0-10	0,2-0,4	12	Normal
10-20	0,5-0,8	25	Normal
20-30	0,8-1	40	Hafif Yorgunluk
>30	1-2	65	Yorgunluk Tespiti

3.4 MPU6050 Sensör Verilerinin Analizi

Şekil 3.2’de gösterilen grafikte, MPU6050 sensörünün üç eksenine ait veriler sunulmuştur. Başın yana eğilme hareketi, MPU6050 sensörünün X eksenindeki değişimlerle tespit edilirken; başın öne veya arkaya eğilmesi, Y eksenindeki hareketlerle belirlenmektedir. Ayrıca, başın hem yana hem de öne veya arkaya doğru eğilme durumları Z eksenindeki değişimlerle birlikte gözlemlenmiştir. Elde edilen verilerde değerlerin -8 ile +10 aralığında değiştiği görülmüştür. Geliştirilen sistemde, sürücünün normal sürüş esnasındaki doğal baş hareketlerinden kaynaklı yanlış uyarıları önlemek amacıyla belirli eşik aralıkları tanımlanmıştır. Buna göre, X eksen için (-5, +5), Y eksen için (-4, +4) ve Z eksen için (+8, +10) aralığında herhangi bir uyarı üretilmemektedir. Ancak bu sınırların dışına çıkan ani baş hareketleri veya dengesiz duruşlar, sürücünün dikkat kaybı veya uyuklama belirtisi olarak yorumlanmaktadır. Sürücü uyarı sistemi bu aşamada devreye girer ve sürücüye titreşim verir.



Şekil 3.2. MPU 6050 Sensöründen Gelen Anlık Ölçüm Verileri

3.5 Görsel ve Sensör Verilerinin Entegrasyonu

Görüntü işleme verileri (EAR ve PERCLOS) ile MPU6050 sensör verileri birlikte değerlendirilerek hibrit bir yorgunluk tespit modeli oluşturulmuştur. Bu modelde sistem, yalnızca görsel veya yalnızca sensör verisiyle değil, her ikisinin eşzamanlı analizine dayalı karar üretmektedir. Örneğin, sürücü gözlerini kısa süre kapattığında ancak baş hareketi normal aralıkta olduğunda sistem uyarı üretmemektedir. Ancak göz kapanması uzun sürerse ($EAR < 0,25$ ve $PERCLOS > \%30$) ve aynı anda baş öne eğilirse sistem yorgunluğu kesin olarak tanımlar. Bu entegrasyon, yanlış pozitif uyarıları önemli ölçüde azaltmıştır.

Test sonuçlarına göre:

1. Sadece görüntü verileri kullanıldığında sistem doğruluğu: %86,5
2. Görüntü verisi ve sensör verisi birlikte kullanıldığında: %93,2

Bu artış sistemin çoklu veri füzyonunun etkinliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3.3. Görüntü ve Sensör Verisi Kombinasyonlarına Göre Doğruluk Oranları

Kullanılan Veri Tipi	Test Sayısı	Ortalama Doğruluk (%)	En Yüksek Doğruluk (%)	Yanlış Alarm (%)
Görüntü İşleme Verileri	20	86,5	92,1	13,5
MPU 6050 Sensör	20	80,8	87,3	19,2
Hibrit Sistem(Görüntü+Sensör)	20	93,2	96,5	6,8

Sonuçlara göre hibrit sistemin en yüksek doğruluk oranı %96,5'e ulaşmıştır. Bu değer, yalnızca görüntü veya yalnızca sensör verisiyle çalışan sistemlere kıyasla anlamlı bir sonuç üretmiştir. Sistemin performansı hibrit sistemle birlikte artmıştır. Ortalama doğruluk %93,2, en yüksek doğruluk ise uygun test koşullarında %96,5 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, geliştirilen sistemin gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek güvenilirlik sağladığını göstermektedir.

Tablo 3.4. Farklı Kullanım ve Çevresel Koşullara Göre Doğruluk Tespit Oranları

Koşul	Durum	En Düşük Doğruluk- En Yüksek Doğruluk(%)
Gözlük Kullanımı	Gözlük Yok	95-97
	Şeffaf Camlı Gözlük	87-91
	Renkli Gözlük	82-86
	Güneş Gözlüğü	55-60
Işık Koşulları	Normal Işık	95-97
	Fazla Işık	70-73
	Düşük Işık	72-76
	Karanlık	55-60
Şapka Kullanımı	Şapka Yok	95-97
	Şapka Var	71-78

Deneysel gözlemler sonucu rapor edilen sistem performansının çevresel koşullara ve kullanıcıya bağlı faktörlere göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Gözlük kullanılmayan ve iyi aydınlatılmış ortamlarda yüz ve göz tespit doğruluk oranı %95'in üzerine çıkarken, yansımali gözlük, düşük ışık koşulları ve yüzün kısmen kapanmasına neden olan aksesuarlar doğruluk oranını %70 seviyelerine kadar düşürebilmektedir.

3.6 Uyarı Mekanizması Performansı

Fotoğraf 3.4'te emniyet kemerine bağlanmış uyarı mekanizması görülmektedir. Uyarı mekanizması, sürücünün emniyet kemerine entegre edilmiş bir titreşim motoru aracılığıyla çalışmaktadır. Arduino Nano, Raspberry Pi'den RF alıcı modülü üzerinden gelen sinyali aldıktan sonra 200 ms içinde motoru devreye sokmuştur. Titreşim 5 saniye süreyle devam etmiş, bu sürede sürücünün gözlerini açması veya başını kaldırması halinde sistem otomatik olarak normale dönmüştür.



Fotoğraf 3.4. Sürücü Uyarı Sistemi

4. TARTIŞMA

4.1 Literatürle Karşılaştırmalı Değerlendirme

Elde edilen bulgular literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, geliştirilen sistemin hem doğruluk hem de uygulanabilirlik açısından önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. Avantajlar sırasıyla:

1. Çoklu veri füzyonu:

- Görüntü tabanlı sistemler göz kırpmalarını yanlış alarm olarak algılayabilmektedir. MPU 6050 Sensör verisi görsel veriler ile birlikte kullanıldığında yanlış alarmları azaltır ve tespit güvenirliliğini artırır.
- (Hossain ve George, 2018; Soukupova ve Cech, 2016; Kumar vd., 2021) gibi literatürde bulunan çalışmalar sadece görüntü verilerine dayanan veriler kullandılar.

2. Gerçek zamanlı sistem olması sebebiyle düşük gecikme:

- Evrişimli Sinir Ağı(ESA) tabanlı yaklaşımlar yüksek doğruluk verse bile(Savaş ve Becerikli, 2020) sistemin gerçek zamanlı çalışabilmesi için görüntü işleme ve baş hareket verilerini akıcı bir şekilde işleyen düşük gecikmeli bir sistem gereklidir.

3. Düşük maliyet:

- Derin öğrenme tabanlı sistemler yüksek doğruluk verse bile(Savaş ve Becerikli, 2020) pahalı donanım ve ekran ünitesi gerektirir.

4. Titreşim uyarısı

5. Yanlış alarm oranının düşürülmesi

gibi avantajlara sahiptir.

Sistemin dezavantajları ise sırasıyla:

1. Düşük ışık koşulları

2. Açık problemleri

4.2 Çalışmanın Sınırlılıkları

Bu tez kapsamında geliştirilen sürücü yorgunluk tespit sistemi, gerçek zamanlı çalışabilen, düşük maliyetli ve yüksek doğruluk sunan bir yapı ortaya

koymakla birlikte, bazı çevresel, donanımsal ve kullanıcıya bağlı sınırlılıklar içermektedir.

Sistem görüntü verilerini kamera tabanlı bir sistemden aldığı için kaliteli kamera kullanmak gerekir. Göz bölgesinin net olarak algılanamadığı senaryoda(güneş gözlüğü kullanımı, şapka kullanımı, düşük ışık koşulları) sistem performansı düşmektedir. Özellikle güneş gözlüğü kullanımında görüntü işleme verilerinin hesaplanması sınırlanmaktadır.

Baş eğim hareketlerinin sensör verileriyle izlenmesi, sistemi daha güvenilir hâle getirir de, sensörlerin sürücü üzerindeki konumu ve titreşimden etkilenmesi ölçüm hassasiyetini sınırlayabilmektedir. Araç titreşimleri ve yol koşulları, özellikle uzun sürüşlerde sensör verilerinde gürültü oluşmasına neden olabilmektedir.

Son olarak, çalışmada kullanılan eşik değerleri ($EAR < 0,25$ ve $PERCLOS \geq \%30$), literatür temelli olmakla birlikte, farklı sürücüler için optimal eşiklerin değişebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durum, sistemin kişiye özel adaptif eşik mekanizmalarıyla desteklenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.3 Tartışma ve Genel Değerlendirme

Literatüre özgün bir yaklaşım katan bu çalışma hem teorik hem de uygulama açısından uygulanabilir. Görüntü işleme algoritmaları düşük maliyetli donanımda kararlı bir şekilde çalışmaktadır. Görüntü işleme verileri(EAR ve $PERCLOS$) sürücünün yorgunluğunu başarılı bir şekilde tespit etmiştir. MPU6050 Sensörü yüz izleme sisteminin hata payını azaltmıştır. Dokunsal uyarı sürücünün farkındalığını yeniden kazandırmada etkili olmuştur. Ancak dezavantajlar da tespit edilmiştir. Düşük ışık koşullarında kamera performansındaki düşüş, sürücünün yüzünün tamamen kameradan çıkması doğruluk oranını azaltmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Genel Değerlendirme

Bu tez çalışmasında, sürücü yorgunluğunun gerçek zamanlı olarak tespit edilebilmesi amacıyla görüntü işleme ve hareket sensörü verilerinin bütünleştirildiği hibrit bir sistem tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sistem, sürücünün göz hareketlerinden elde edilen Göz En-Boy Oranı(EAR) ve Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS) metriklerini, MPU6050 sensöründen alınan ivme ve açısal hız verileriyle birlikte değerlendirerek sürücünün dikkat durumunu analiz etmektedir. Sistem, Raspberry Pi 4B mikro bilgisayarı üzerinde OpenCV kütüphanesi kullanılarak çalıştırılmış; elde edilen veriler Arduino Nano aracılığıyla kablosuz Radyo Frekans (RF) iletişimi üzerinden titreşim motoruna aktarılmıştır. Böylece sürücünün yorgunluk belirtileri anlık olarak tespit edilmiş ve dokunsal uyarı ile geri bildirim sağlanmıştır. Bu çalışma, literatürde sıklıkla karşılaşılan yalnızca tek veri kaynağına (örneğin yalnızca görüntü veya yalnızca sensör) dayalı sistemlerden farklı olarak, veri füzyonu temelli bir yaklaşım benimsemiş ve bu yönüyle özgün bir çözüm ortaya koymuştur.

5.2 Bulguların Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

1. Göz hareketi tabanlı analiz:

Göz En-Boy Oranı(EAR) değeri 0,25'in altına düştüğünde sistem yorgunluk durumunu doğru biçimde algılamıştır. Kısa süreli göz kırpmaları, Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi (PERCLOS) metriğiyle doğrulandığı için yanlış alarm oranı azalmıştır. Ortalama tespit doğruluğu %86,5 seviyesinde ölçülmüştür.

2. Sensör verisi tabanlı analiz:

MPU6050 sensöründen elde edilen baş eğim hareketleri, göz kapanma anlarıyla yüksek korelasyon göstermiştir. Sensör modülü tek başına çalıştırıldığında ortalama doğruluk oranı yaklaşık %80,8'dir.

3. Hibrit sistem performansı:

Görsel ve sensör verilerinin eşzamanlı değerlendirilmesiyle sistemin ortalama doğruluk oranı %93,2, en yüksek doğruluk oranı %96,5 olarak hesaplanmıştır.

4. Gerçek zamanlılık:

Sistemin ortalama kare işleme süresi 38 milisaniye, sensör okuma gecikmesi 15 milisaniye, radyo frekans iletişim gecikmesi ise 0,2 saniye olarak ölçülmüştür. Toplam sistem gecikmesi 0,25 saniyenin altında kalmış ve bu değer sürücü uyarı sistemlerinde kabul edilebilir aralıkta bulunmuştur. Böylece sürücü yorgunluk durumuna 1 saniyeden daha kısa sürede tepki verilmesi mümkün olmuştur.

5. Düşük maliyet:

Sistem pahalı donanım ve ekran ünitesi gerektirmez.

5.3 Bilimsel Katkılar

Bu çalışma, literatüre aşağıdaki özgün katkıları sağlamıştır:

1. Veri Füzyonu Yaklaşımı:

Görüntü işleme verileri(EAR, PERCLOS) ile hareket sensörü verilerinin (MPU6050) bütünleştirildiği hibrit bir model geliştirilmiştir. Bu sayede yanlış alarm oranı azaltılmış, sistemin kararlılığı artırılmıştır.

2. Gerçek Zamanlı Uyarı Mekanizması:

Sistem, gecikme süresi 250 milisaniyenin altında kalacak biçimde optimize edilmiştir. Sürücünün yorgunluk belirtileri tespit edildiğinde, titreşim tabanlı fiziksel uyarı mekanizması devreye girerek doğrudan davranışsal tepki oluşturmıştır.

3. Düşük Maliyetli Donanım ile Yüksek Performans:

Derin öğrenme tabanlı sistemler kadar yüksek işlem gücü gerektirmeden, benzer doğruluk düzeyine ulaşılmıştır. Raspberry Pi 4B üzerinde Python tabanlı sistem, sürekli çalışmada kararlılık göstermiştir.

4. Uygulanabilirlik:

Sistem hem laboratuvar ortamında hem de kısa süreli sürüş simülasyonlarında denenmiştir.

Bu bulgular, geliştirilen prototipin akademik araştırmalarda kullanılabileceği gibi, endüstriyel uygulamalara da ölçeklenebileceğini göstermektedir.

5.4 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Geliştirilen sistemin performansını artırmak ve kapsamını genişletmek amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. Sürüş esnasında her görüntünün hızlı bir şekilde işlenmesi bir zorunluluktur. Herhangi bir hata sürücünün ve çevresindekilerin hayatını tehlikeye atabilir. Bu yüzden kaliteli video veya fotoğraf çekebilen bir kamera, güncellenmiş bir Raspberry Pi cihazı ile sistemin çalışması daha güvenli hale gelebilir.
2. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak farklı sürücüler için uygulanan modeller kullanarak uyuşukluğun tespitinin doğruluğu artırılabilir.
3. Uyuşukluk durumu belirli zaman diliminde artmakta olup sistemin performansına etki edip etmediği araştırılabilir. Gece sürüşlerinde veya düşük ışıklı ortamlarda yüksek doğruluk sağlamak için kızılötesi kamera entegrasyonu önerilmektedir. Özellikle güneş gözlüğü kullanımı durumunda sistem doğruluğunu arttırmak için kızılötesi kamera kullanımı planlanmaktadır.
4. Gerçek zamanlı veriler mobil uygulama üzerinden sürücüye veya filo yöneticisine iletebilir. Böylece uzun dönemli sürücü davranış analizi yapılabilir.
5. Toplanan veriler bulut ortamına aktarılıp makine öğrenmesiyle uzun dönemli yorgunluk trendleri çıkarılabilir.
6. Sistemin sürücü odaklı çalışabilmesi için sürücünün araca bindiği esnada gözünü algılayıp Göz En-Boy Oranı(EAR) hesaplanacak ve kaydedilecek. Dolayısıyla kullanıcıya özel görüntü işleme verileri elde edilecektir.
7. Gerekli etik kurul izinleri alınarak farklı sürücülerde ve farklı trafik koşullarında sistemin doğruluğu tekrar geliştirilecektir.

5.5 Sonuç

Bu tez kapsamında geliştirilen sistem, sürücü yorgunluğunun erken tespitine yönelik entegre, düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta bir çözüm ortaya koymuştur. Sistem, Göz En-Boy Oranı(EAR), Gözün Kapalı Kalma Süresinin Yüzdesi(PERCLOS) değeri ve baş eğim hareketlerini birlikte analiz ederek

sürücünün dikkat ve uyanıklık düzeyini çok yönlü biçimde değerlendirebilmektedir. Görüntü işleme ve sensör verilerinin bütünleştirildiği bu hibrit yaklaşım, tekil veri kaynaklarına dayalı yöntemlere göre belirgin bir performans artışı sağlamıştır. Yapılan deneysel değerlendirmeler sonucunda, sistemin ortalama doğruluk oranı %93,2, en yüksek doğruluk oranı ise %96,5 olarak elde edilmiştir. Yanlış alarm oranının yalnızca %6,8 seviyesinde kalması, sistemin gerçek sürüş koşullarında pratik olarak kullanılabilir bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, toplam sistem gecikmesinin 250 milisaniyenin altında olması, sürücüye zamanında uyarı verilmesini mümkün kılarak güvenlik açısından kritik bir avantaj sunmuştur. Geliştirilen donanımın taşınabilir, düşük güç tüketimli ve ekonomik yapısı, sistemi hem akademik araştırmalarda hem de ticari sürücü destek platformlarında uygulanabilir kılmaktadır. Bu özellikler, önerilen çözümün ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir teknoloji olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, bilgisayarlı görü tabanlı sürücü güvenliği sistemlerinde çoklu veri füzyonunun etkinliğini açık biçimde ortaya koymakta; bu yönüyle çalışma, literatüre özgün bir mühendislik katkısı ve uygulanabilir bir güvenlik modeli kazandırmaktadır.

KAYNAKLAR

- Sahayadhas A, Sundaraj K. ve Murugappan M.(2012) Detecting driver drowsiness based on sensors: A review, *Sensors* (Switzerland), vol.12, no.12, syf:16937–16953, <http://doi.org/10.3390/s121216937>
- Al-Bayati A.H., Shakoree A. ve Ramadan Z.A.(2021), "Factors affecting traffic accidents density on selected multilane rural highways", *Civil Eng. J.*, vol. 7, no. 7, syf. 1183-1202.
- Shaik M. E.(2023). A systematic review on detection and prediction of driver drowsiness. *Transp. Res. Interdiscipl. Perspect.*, vol. 21.
- Gottlieb D. J., Ellenbogen J. M., Bianchi M., T. Czeisler C. ve A. Sleep(2018). Deficiency and motor vehicle crash risk in the general population: A prospective cohort study, *BMC Med.*, vol. 16, no. 1, syf. 1-10.
- Bergasa L. M., Nuevo J., Sotelo M. A., Barea R. ve Lopez M. E(2006). Real-time system for monitoring driver vigilance, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 7, no. 1, syf. 63-77.
- Danışman T, Ian Marius Bilasco, Chabane Djeraba ve Nacim Ihaddadene.(2010) Drowsy driver detection system using eye blink patterns. *Machine and Web Intelligence (ICMWI), International Conference on. IEEE*, 230- 33, <http://doi.org/10.1109/ICMWI.2010.5648121>
- Sikander G. (2019). Driver Fatigue Detection Systems: A Review. *Institute Electrical and Electronic Engineering IEEE*, vol.20, no.6, syf.2339-2352.
- Demir, A., Bekiryazıcı, Ş., Çoşkun, O., Eken, R. (2022). Sürücü yorgunluk evrelerinin EEG işaretleri ile tespiti ve analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(5), 643-651.
- Picot, A., Charbonnier, S. ve Caplier, A. (2012). On-Line Detection of Drowsiness Using Brain and Visual Information. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 42, 764-775.
- Hu, S., Bowlds, R. L., Gu, Y. ve Yu, X. (2009). Pulse wave sensor for non-intrusive driver's drowsiness detection. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference*, 2009, 2312–2315. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5335036>
- Furman, G. D., Baharav, A., Cahan, C., & Akselrod, S. (2008, September). Early detection of falling asleep at the wheel: A heart rate variability approach. In *2008 Computers in Cardiology* (syf. 1109-1112). IEEE.
- Barua, S. (2019). Multivariate data analytics to identify driver's sleepiness, cognitive load, and stress (Doctoral dissertation, Mälardalen University).
- Akin, M. (2008). Estimating vigilance level by using EEG and EMG signals. *Neural Computing and Applications*. <https://doi.org/10.1007/S00521-007-0117-7>
- Gao, Z. K., Li, Y. L., Yang, Y. X. ve Ma, C. (2019). A recurrence network-based convolutional neural network for fatigue driving detection from EEG. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 29(11), 113126. <https://doi.org/10.1063/1.5120538>
- Zhu, X., Zheng, W. L., Lu, B. L., Chen, X., Chen, S. ve Wang, C. (2014, July). EOG-based drowsiness detection using convolutional neural networks. In *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (syf. 128-134). IEEE.
- Becerra-Sánchez, E. P., Reyes-Muñoz, A. ve Guerrero-Ibáñez, J. A. (2019). Wearable sensors for evaluating driver drowsiness and high stress. *IEEE Latin America Transactions*, 17(03), 418-425.

- Gwak, J., Hirao, A. ve Shino, M. (2020). An investigation of early detection of driver drowsiness using ensemble machine learning based on hybrid sensing. *Applied Sciences*, 10(8), 2890.
- Daud, M. A. F., Ismail, A. P., Tahir, N. M., Daud, K., Kasim, N. M. ve Mohamad, F. A. (2022, October). Real Time Drowsy Driver Detection Using Image Processing on Python. In *2022 IEEE 12th International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)* (syf. 131-136). IEEE.
- Jung, S. J., Shin, H. S. ve Chung, W. Y. (2014). Driver fatigue and drowsiness monitoring system with embedded electrocardiogram sensor on steering wheel. *IET Intelligent Transport Systems*, 8(1), 43-50.
- Patel, M., Lal, S., Kavanagh, D. ve Rossiter, P (2011). "Investigating Driver Fatigue by Neural Network Analysis of Heart Rate Variability," *Accident Analysis & Prevention*, 41 (4), syf. 772 - 778.
- Awais, M., Badruddin, N. ve Drieberg, M. (2017). A hybrid approach to detect driver drowsiness utilizing physiological signals to improve system performance and wearability. *Sensors*, 17(9), 1991.
- Kaushik, P., Yadav, K., Gopika, B. S., Kumar, N. ve Kaushik, M. M. (2024, November). Deep Learning for Driver Vigilance and Road Safety. In *2024 4th International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE)* (syf. 285-290). IEEE.
- Kumar, V. P., Aravind, P., Pooja, S. N. D., Prathyush, S., AngelDeborah, S. ve Chandran, K. S. (2021, May). Driver assistance system using raspberry pi and haar cascade classifiers. In *2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)* (syf. 1729-1735). IEEE.
- Priadana, A. ve Habibi, M. (2019, March). Face detection using haar cascades to filter selfie face image on instagram. In *2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT)* (syf. 6-9). IEEE.
- Savaş, B. K. ve Becerikli, Y. (2020). Real time driver fatigue detection system based on multi-task ConNN. *Ieee Access*, 8, 12491-12498.
- Alshaqaqi, B., Baquhaizel, A. S., Ouis, M. E. A., Boumehed, M., Ouamri, A. ve Keche, M. (2013, May). Driver drowsiness detection system. In *2013 8th international workshop on systems, signal processing and their applications (WoSSPA)* (syf. 151-155). IEEE.
- Hossain, M. Y. ve George, F. P. (2018, October). IOT based real-time drowsy driving detection system for the prevention of road accidents. In *2018 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)* (Vol. 3, syf. 190-195). IEEE.
- Constantin, L., Fosalau, C., Zet, C. ve Petrisor, D. (2018, October). Driver Monitoring Using Face Detection and Facial Landmarks. In *2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)* (syf. 0385-0390). IEEE.
- Liu, D., Sun, P., Xiao, Y. ve Yin, Y. (2010, March). Drowsiness detection based on eyelid movement. In *2010 second international workshop on education technology and computer science* (Vol. 2, syf. 49-52). IEEE.
- Arimitsu, S., Sasaki, K., Hosaka, H., Itoh, M., Ishida, K. ve Ito, A. (2007). Seat belt vibration as a stimulating device for awakening drivers. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 12(5), 511-518.
- Sigari, M. H. (2009, February). Driver hypo-vigilance detection based on eyelid behavior. In *2009 seventh international conference on advances in pattern recognition* (syf. 426-429). IEEE.
- Tabrizi, P. R. ve Zoroofi, R. A. (2008, November). Open/closed eye analysis for drowsiness detection. In *2008 first workshops on image processing theory, tools and applications* (syf. 1-7). IEEE.

- Omidyeganeh, M., Javadtalab, A. ve Shirmohammadi, S. (2011, September). Intelligent driver drowsiness detection through fusion of yawning and eye closure. In *2011 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems Proceedings* (syf. 1-6). IEEE.
- Jadhav, S., Jagdale, S., Jangale, N. ve Raut, S. Driver Drowsiness Detection System using Raspberry Pi.
- Hong, T., Qin, H. ve Sun, Q. (2007, May). An improved real time eye state identification system in driver drowsiness detection. In *2007 IEEE International Conference on Control and Automation* (syf. 1449-1453). IEEE.
- Mandal, B., Li, L., Wang, G. S. ve Lin, J. (2016). Towards detection of bus driver fatigue based on robust visual analysis of eye state. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(3), 545-557. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2582900>
- Kumar, K. C. ve Bhowmick, B. (2009, January). An application for driver drowsiness identification based on pupil detection using IR camera. In *Proceedings of the First International Conference on Intelligent Human Computer Interaction: (IHCI 2009) January 20–23, 2009 Organized by the Indian Institute of Information Technology, Allahabad, India* (syf. 73-82). New Delhi: Springer India.
- Deng, W. ve Wu, R. (2019). Real-time driver-drowsiness detection system using facial features. *Ieee Access*, 7, 118727-118738. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936663>
- Ananthi, S., Sathya, R., Vaidehi, K. ve Vijaya, G. (2023, May). Drivers Drowsiness Detection using Image Processing and I-Ear Techniques. In *2023 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)* (syf. 1326-1331). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142501>
- Yan, J. J., Kuo, H. H., Lin, Y. F. ve Liao, T. L. (2016, July). Real-time driver drowsiness detection system based on PERCLOS and grayscale image processing. In *2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)* (syf. 243-246). IEEE.
- Schmidt, A., ve Kasiński, A. (2008). The performance of the haar cascade classifiers applied to the face and eyes detection. In *Computer Recognition Systems 2* (syf. 816-823). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kazemi, V., & Sullivan, J. (2014). One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1867-1874).
- Viola, P., & Jones, M. (2001, December). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. CVPR 2001* (Vol. 1, pp. I-I). Ieee.
- Soukupova, T., & Cech, J. (2016, February). Eye blink detection using facial landmarks. In *21st computer vision winter workshop, Rimske Toplice, Slovenia* (Vol. 2, p. 4).
- Freund, Y., & Schapire, R. E. (1997). *A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting*. Journal of Computer and System Sciences, 55(1), 119–139. <https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1504>.
- Shetty, A. B., & Rebeiro, J. (2021). Facial recognition using Haar cascade and LBP classifiers. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 330-335.
- Wierwille, W. W., Wreggit, S. S., Kirn, C. L., Ellsworth, L. A., & Fairbanks, R. J. (1994). *Research on vehicle-based driver status/performance monitoring; development, validation, and refinement of algorithms for detection of driver drowsiness. final report* (No. HS-808 247).

Öztürk, M., Küçükmanisa, A., & Urhan, O. (2022). Drowsiness Detection System Based on Machine Learning Using Eye State. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(3), 258-263. <https://doi.org/10.17694/bajece.1028110>

