



Görüntü İşleme Tabanlı MediaPipe Algoritması ile Tehlikeli İş Makinalarında El Kazalarını Önleme

Preventing Hand Accidents in Hazardous Work Machines with Image Processing Based MediaPipe Algorithm

Sinan Yüksel , Rıfat Hacıoğlu*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada yapay zeka ile görüntü işleme tekniklerini kullanarak, daire testere ve benzeri tehlikeli makinalarda çalışanların iş kazası sonucu el yaralanmalarını, uzuv kayıplarını önlemek ve doğru çalışma davranışlarını öğretmeyi amaçlayan bir tasarım geliştirilmektedir. Tasarımda eğitilmiş CNN (evrimsel sinir ağı) ve benzeri derin öğrenme teknikleri ile geliştirilen MediaPipe Hands makine öğrenimi modeli kullanılarak bilgisayarlı görme (Computer vision) işlemi yapılmaktadır. Yapay zeka tasarımı Python yazılım ortamında makine öğrenimi kütüphanesi TensorFlow ve görüntü işleme kütüphanesi OpenCV kullanılarak yapılmaktadır. Kameradan alınan canlı görüntü ile insan elinin, tehlikeli bölgede kesici ile arasındaki yaklaşma mesafesi ve agresif hızlı hareketleri takip edilip, ölçümlenir. Buna göre tehlikeli iş makinalarında tehlike ve uyarı bölgeleri belirlenmektedir. Eğer el tehlikeli bölgede kesiciye aşırı yakınsa veya hızlı hareketler sergilerse iş makinası durdurulur. Uyarı bölgesinde ise kullanıcıya gerekli uyarılar yapılarak el kazalarının önüne geçilmesi hedeflenmektedir. MediaPipe Hands modelinin farklı parlaklık ve gürültü ortam durumları incelenerek tespit performansında kıyaslanmaktadır. Burada önerilen parlaklık dengeleme ve gürültü önleyici medyan filtre etkileri incelenmektedir. Olumsuz ortam koşullarından kaynaklanan bu performans kaybı filtre kullanımıyla iyileştirme yapılmaktadır. Parlaklık seviyelerindeki değişim ve gürültü etkisinde önerilen filtreler önemli oranda iyileştirme sağlamaktadır. Ek olarak kullanılan model karmaşıklığı değerlendirilerek önerilen sistemin gerçek zaman çalışabilme kabiliyeti incelenmektedir. Yapay zeka tabanlı bu güvenlik sistemi kamera, bilgisayar ve yazılım alanındaki gelişmelere bağlı olarak iş kazalarını en alt seviyeye indireceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Görüntü işleme, MediaPipe, tehlikeli iş, makine el koruma sistemi, iş sağlığı ve güvenliği (İSG).

Abstract

In this study, a design is being developed using image processing techniques with artificial intelligence to prevent hand injuries and limb losses due to work accidents in workers working on circular saws and similar dangerous machines, and to teach them correct working behaviors. Computer vision is performed using the MediaPipe Hands machine learning model developed with CNN (convolutional neural network) and similar deep learning techniques trained in the design. The artificial intelligence design is made in the Python software environment using the machine learning library TensorFlow and the image processing library OpenCV. With the live image taken from the camera, the approach distance and aggressive fast movements of the human hand in the dangerous area are monitored and measured. Accordingly, the danger and warning zones are determined in dangerous work machines. If the hand is too close to the cutter in the dangerous area or exhibits fast movements, the work machine is stopped. In the warning zone, the necessary warnings are made to the user and the aim is to prevent hand accidents. The MediaPipe Hands model is compared in terms of detection performance by examining different brightness and noise environment conditions. This performance loss caused by adverse environmental conditions is improved by using filters. Here, the effects of the proposed brightness compensation and noise cancelling median filter are examined. The recommended filters provide significant improvements in the effects of changes in brightness levels and noise. In addition, the model complexity used is evaluated and the real-time operation capability of the suggested system is examined. It is evaluated that this artificial intelligence-based security system will reduce work accidents to the lowest level depending on the developments in the field of cameras, computers and software.

Keywords: Hazardous work, machine hand protection system, image processing, MediaPipe, occupational health and safety (OHS).

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hacirif@beun.edu.tr

Sinan Yüksel orcid.org/0000-0002-6127-9071

Rıfat Hacıoğlu orcid.org/0000-0002-2480-0729



1. Giriş

Endüstriyel uygulamalarda iş sağlığı ve güvenliği önemli bir yer tutmakta olup farklı uygulamalara yönelik kanun ve çalışmalar yapılmaktadır (İSG 2012, ÇSGB 2017). Endüstriyel ve bireysel atölyelerde makina ile çalışmalarda özellikle ahşap, mobilya ürünleri ve metal malzemelerin işlenmesinde çok fazla iş kazası yaşanması ve işlerin insan eli ile yapılması sebebiyle iş kazalarında çoğunlukla eller yaralanmaktadır (Aksoy ve Keskin 2019, Demirci 2018, Engür 2017). Bu kazalar geri dönüşü olmayan uzuv kayıplarıyla sonuçlanabilmektedir ki öncelikle çalışanların iş güvenliğinin sağlanması ve kullanıcıların bilinçlendirilmesi önemlidir (Gedik ve İlhan 2014, İlhan vd. 2013, Ulusoy vd. 2018). Eller iyileşmesi en zor olan organlardan biridir, el ve parmaklar iş makinası tarafından kesilmesi durumunda, sinir ve tendon hasarlarına uğradığından iyileşmesi zordur, iyileşme süreci uzundur ve eskisi kadar sağlıklı hale dönmesi mümkün değildir (Chung ve Shauver 2013, Current vd. 2020). Bu çalışmada görüntü işleme tabanlı, daire testere ve benzeri tehlikeli makinalarda çalışanların iş kazası sonucu el yaralanmalarını önlemeyi ve hatalı davranışları uyarmayı amaçlayan bir tasarım üzerinde durulmaktadır.

Dr. Steve Gass tarafından 1999 yılında geliştirilmeye başlanan 'Sawstop' firma ismiyle bilinen ahşap ve mobilya işlerinde el parmaklarını kesmeyen testere, insan bedeninin iletkenlik ve kapasitans özelliğinden faydalanarak çalışmaktadır (Sawstop 2021). Tasarım gereği elektriksel bir ölçüm yapıldığından kesilen malzemenin yaş, nemli ve iletken olmaması gereklidir. Buna alternatif olarak 2021 yılında yapay zeka ve görüntü işleme teknikleriyle Altendof firması tarafından geliştirilen 'Hand Guard' sistemi bulunmaktadır (Hand Guard 2022). Geliştirilen koruma sistemlerinin birbirine göre üstünlükleri olsa da bu sistemlerin tasarımı hakkında detaylı bilgi bulunmamaktadır. Genel yaklaşım olarak nesne tespiti ve takibi (Tan vd. 2021) ile birlikte eğitilmiş yapay zeka model kullanımıyla karar verme mekanizmalarının (Sarkar vd. 2018) kullanıldığı değerlendirilmektedir.

Eğitilmiş CNN (evrimsel sinir ağı) öğrenme yaklaşımı ile geliştirilen MediaPipe makina öğrenimi modeli (Mediapipe 2023) vücut şekli (Garg vd. 2023, Kim vd. 2023, Latreche vd. 2023), yüz ve el tespiti (Sánchez-Brizuela vd. 2023, Amprimo vd. 2024) ile bilgisayarlı görme (Computervision) işlemi yapılmaktadır. El üzerindeki 21 anahtar noktayı belirlemeyi hedefleyen MediaPipe Hands modeli işaret dili uygulamalarında (Çelik ve Odabaş 2020, Bora vd.. 2023) yaygın kullanılırken el hareketlerine göre karar verme mekanizmaları uygulamalarında da kullanılmaktadır (Haji Mohd vd. 2023,

Amprimo vd. 2024). Bu çalışmada önce MediaPipe Hands modelinin el tespit performansını ortaya koyarak farklı parlaklık ve tuz-biber gürültülü ortamlardaki performansın deneyleri gerçekleştirilmektedir. Çalışmada meydana gelen performans kayıplarını azaltmak için görüntü işleme teknikleriyle medyan ve parlaklık dengeleme filtreleri (Erkan ve Görkem 2017, Erkan vd. 2020, Küpeli ve Bulut 2020, Haji Mohd vd. 2023) geliştirilmekte olup farklı durumlarda el tespit performansına olan etkilerini incelenmektedir. Gerçek zaman görüntü ile insan elinin, tehlikeli bölgede kesici ile arasındaki yaklaşma mesafesi ve agresif hızlı hareketleri takip edilip, ölçümlendirilmektedir. El tehlikeli bölgede kesiciye aşırı yakınsa veya hızlı hareketler sergilerse iş makinası durdurulmaktadır. Yapay zeka tabanlı bu güvenlik sistemi kamera, bilgisayar ve yazılım alanındaki gelişmelere bağlı olarak iş kazalarını en alt seviyeye indireceği değerlendirilmektedir.

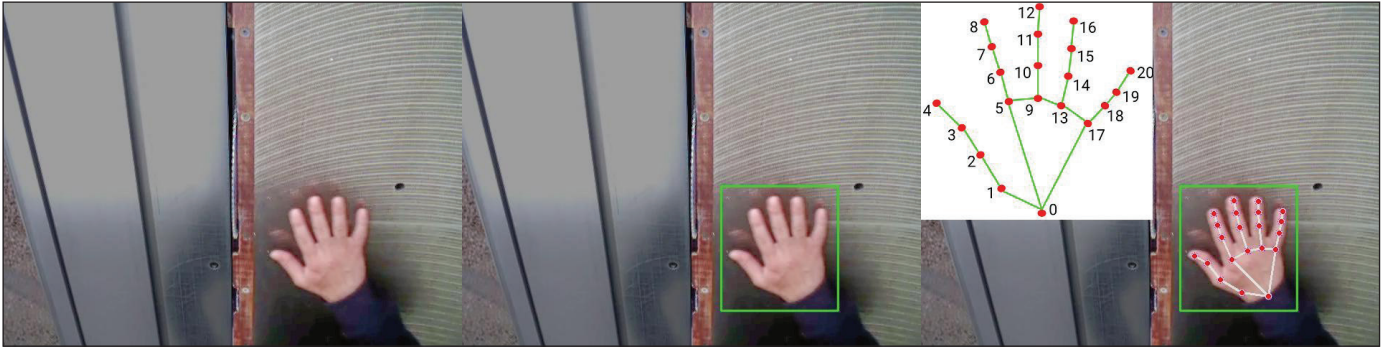
Önerilen görüntü iyileştirme çalışmaları ile birlikte MediaPipe Hands modeli tabanlı tasarım algoritması Bölüm 2 de verilmektedir. Ek olarak tehlike ve uyarı bölgeleri tanımlarıyla birlikte mesafe ve hız hesaplamaları tanımlanmaktadır. Parlaklık ve gürültü etkisinin incelendiği deneysel çalışma Bölüm 3'de verilmekte olup elde edilen kıyaslamalı sonuçlar vurgulanmaktadır. Son bölümde bu çalışmada elde edilen tespitler ve öneriler sunulmaktadır.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. MediaPipe Hands Modelinin Çalışması ve Geliştirilen Tasarımın Algoritması

MediaPipe Hands görüntüdeki elin bulunduğu bölgeyi avuç içi ve dış yapısından tanır, bir sınır kutusu (bounding box) oluşturarak elin tam alanını belirler ve bu küçük alanda veri işlemesi yapan bir derin öğrenme modelidir. Model geliştirilirken 30.000 üzerinde el verisinden faydalanılmıştır ki model eğitilirken kullanılan büyük veriler, optimizasyondan geçirilir ve küçük veriler ile düşük sistemlerde çalışabilecek hale getirilir. MediaPipe Hands, 21 anahtar noktadan (landmark) oluşan bir set kullanır. Bu anahtar noktalar (Şekil 1), elin çeşitli parçalarının (parmaklar, avuç içi, vb.) konumlarını tanımlar (MediaPipe 2023).

El tespiti mimarisi ellerin nerede bulunduğunu kabaca tespit eden bir avuç içi tespiti ve ardından elin ve parmakların farklı kısımlarını daha kesin bir şekilde yerleştiren bir el işareti tespiti olarak iki aşamadan oluşur. Tek atışlı bir dedektöre dayanan ilk aşama avuç içi tespiti modelini oluşturur (Haji Mohd vd. 2023). Bu model, tam görüntünün piksel değerlerini girdi olarak alır ve avuç içlerinin görüntüde



Şekil 1. Mediapipe Hands modeli avuç tespiti, çapa kutu oluşumu ile görüntü boyutu azaltılması ve 21 anahtar nokta tespiti gelişim aşamaları.

nerede olabileceğini açıklayan sınırlayıcı kutuları ve bu kutuların her biri için güven puanlarını çıkarır. Burada kullanılan, örneğin çapa kutularını (sınıflandırılmadan önce ağda oluşturulan öneriler) kutu görüntülerle sınırlamak gibi bazı rastgele çözümler bulunmaktadır. İkinci kısım olan el işareti modeli, avuç içi tespitinin sınırlayıcı kutusundaki kırılmış görüntüyü girdi olarak alan ve elin 21 anahtar noktasının 3B koordinatlarını döndüren bir regresyon modelidir (Kumar vd. 2023). Şekil 1’de modelin avuç içi tespiti ve çapa kutu oluşumuyla birinci aşama ve anahtar noktaların tespitiyle ikinci aşama verilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan model kameradan aldığı canlı görüntüyü yapay sinir ağları (YSA) tabanlı makine öğrenmesi yeteneği kazandırmak için ham anahtar noktaların özelliklerini çıkartır (Tan vd. 2021, Kumar vd. 2023, Sánchez-Brizuela vd. 2023). Çıkartılan bu veriler, elin pozisyonunu ve hareketini anlamlı hale getirmek için modelin tasarımına bağlı olarak, çeşitli görüntü işleme teknikleriyle işlenir. Örneğin, anahtar noktalar arasındaki ilişkiler kullanılarak elin 3D pozisyonu tahmin edilebilir. Bu durumda elin konumu, hızına ve hareket yönüne göre karar verme mekanizmaları çalıştırılabilir. Mediapipe Hands modeli statik görüntüler üzerinde çalışabildiği gibi dinamik, gerçek zaman görüntüler üzerinde çalışabilmektedir. Her iki durum da modele girdi seçeneği olarak verilirken görüntüdeki el sayısı, el tespit/takip minimum güven katsayısı, model karmaşıklığı da girilebilmektedir. Ek olarak model 21 anahtar noktanın konum bilgisi ile birlikte el tespit sonucunun güven puanını da çıktı olarak üretmektedir.

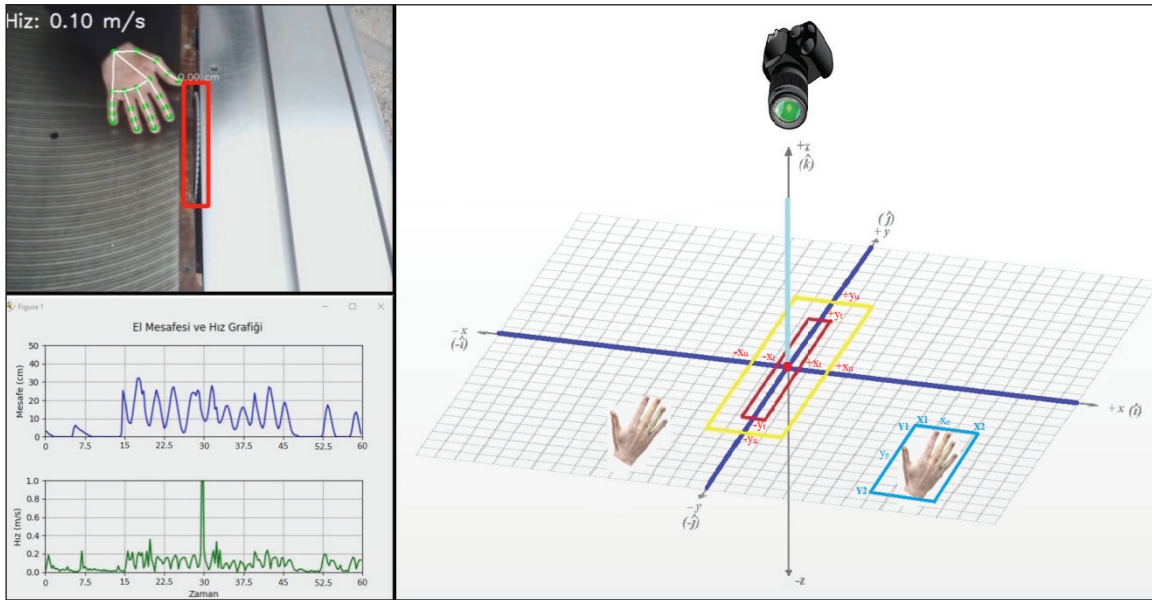
Mediapipe Hands modelinin ilk tespit ve izleme sonuçlarının optimize edilmesi için görsel iyileştirme kritik bir adımdır. Bu süreç, ham verilerin düzeltilmesi, pürüzsüzleştirilmesi ve anlamlandırılması gibi adımları içerir ve nihai tespit edilen elin görüntüsünden doğru ve kullanışlı veriler

sağlanır. Mediapipe Hands tespit ve izleme işlemleri; görüntü işleme, derin öğrenme ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Yapay zeka ve görüntü işleme tekniklerini kullanarak geliştirilmektedir ki güvenlik sistemi için kullanılan Mediapipe Hands modelin işaret dili kullanım allarında biridir (Çelik ve Odabaş 2020). Mediapipe Hands modeline derin öğrenme ve makine öğrenimi veri tabanı, modelin oluşturulma aşamasında öğretilmektedir. Bu modeller, geniş veri setleri üzerinde eğitilir ve belirli bir görevi gerçekleştirmek için optimize edilir. Mediapipe Hands, el izleme görevi için derin öğrenme ve bilgisayarlı görme (computer vision) tekniklerini bir araya getirir. Bu nedenle, Mediapipe Hands hem bilgisayarlı görme hem de derin öğrenme tekniklerini kullanan, görüntü işleme makine öğrenimi yapay zeka uygulamasıdır. Bilgisayarlı görme, bilgisayar sistemlerinin dijital görüntüler üzerinden bilgi kazanma, analiz etme ve yorumlar geliştirmesi için kullanılan bir alandır (Sarkar at al. 2018).

Şekil 2’de kameradan alınan canlı görüntünün tasarlanan algoritma ile elin tanınması, elin arasındaki mesafe ve hız değişiminin görülmektedir. Kartezyen koordinat sisteminde tehlikeli iş makinasının kesici sıfır noktası kabul edilmektedir. Ek olarak kesici boyutları $(\pm x_k, \pm y_k)$ ile tanımlanmakta olup yükseklik değeri z_k ile ifade edilmektedir. Buna göre tehlike ve uyarı bölgesi sırasıyla $(\pm x_t, \pm y_t)$, $(\pm x_u, \pm y_u)$ ile tanımlanmaktadır. Elin konumu (x_{ei}, y_{ei}) , $i=0, \dots, 20$ için tehlikeli iş makinası kesiciye olan uzaklığı

$$d_i \begin{cases} |x_{ei} - x_k|, & |y_{ei}| \leq y_k \\ \sqrt{(x_{ei} - x_k)^2 + (y_{ei} - y_k)^2}, & |y_{ei}| > y_k \end{cases} \quad i = 0, \dots, 20 \quad (2.1)$$

ile elde edilen 21 anahtar nokta mesafesinin en düşük değeri olarak hesaplanmaktadır. Denklem (2.1)’den en kısa mesafede d_e için elin konumu (x_e, y_e) olarak bulunur ki tehlike ve uyarı bölgesi içinde yer alması durumları incelenmektedir.



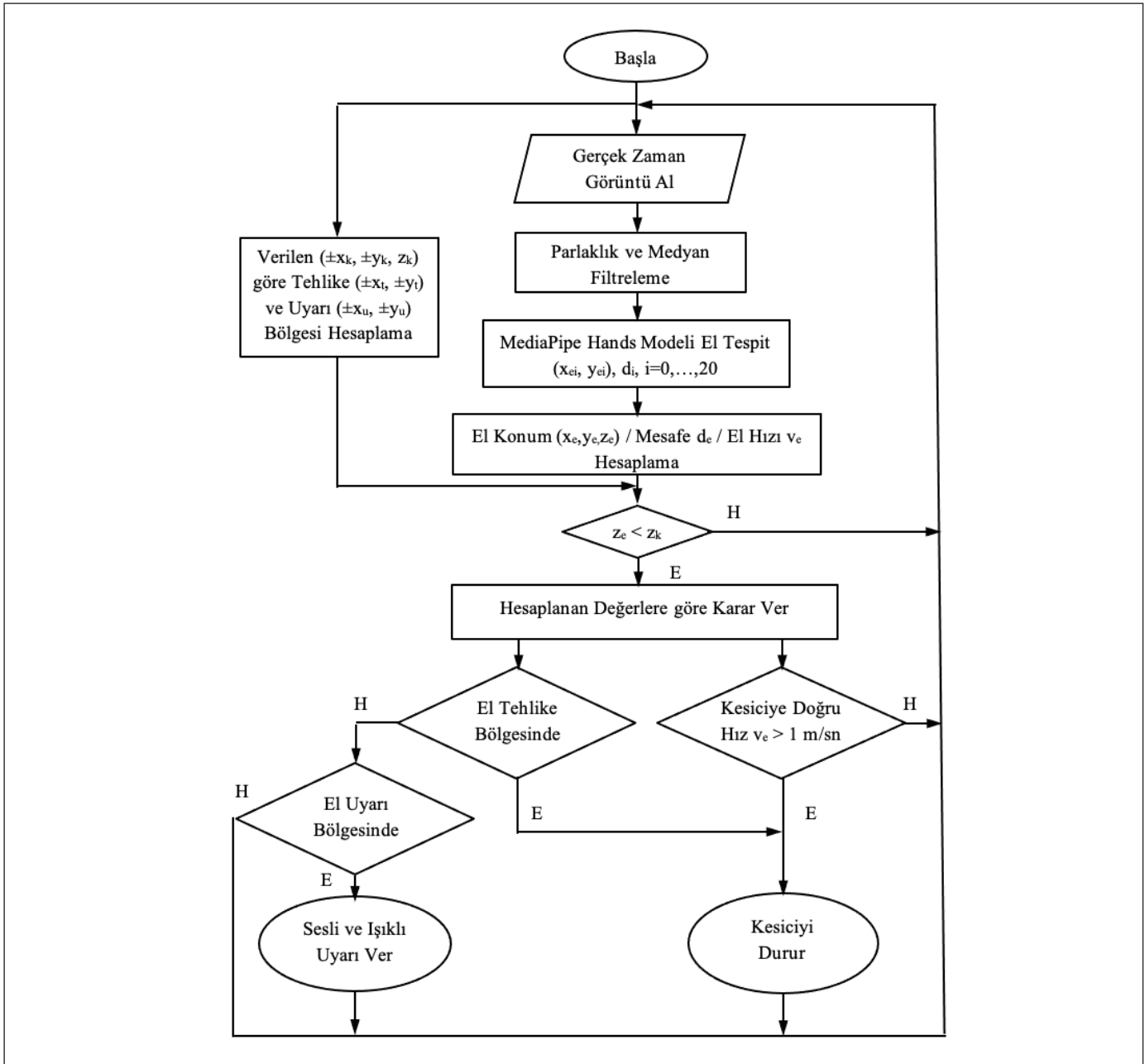
Şekil 2. Önerilen sistem MediaPipe Hands modeli ile el tespiti.

Burada x_k değeri oldukça küçük olduğu için sıfır olarak değerlendirilecektir. Ek olarak elin hızının hesaplanmasında 21 anahtar noktanın konum değişiminde en büyük olan değer alınmakta olup v_e olarak değerlendirilmektedir. Burada z_e elin yüksekliğinin z_k kesici yükseklik değerinden düşük olması durumunda hesaplama yapılmaktadır. Büyük olması durumunda ise el tehlikeli bölgenin üzerinden, güvenli sayılabilecek bir mesafeden geçmektedir ki el denetimi devre dışı kalmaktadır.

Tasarımda, kameradan alınan görüntünün adım adım nasıl işlendiği Şekil 3'deki akış şeması ile verilmektedir. Burada görüntü alınmasıyla öncelikle performans iyileştirmek amacıyla parlaklık düzenleme ve medyan filtreleri gerekli durumlarda uygulanır. Bir sonraki görüntü alınmasına kadar işlemcinin gerçek zaman çalışabilmesi için tüm süreci tamamlaması gerekmektedir. Tehlike ve uyarı bölgeleri tespiti için hesaplanması ile birlikte MediaPipe Hands modeli kullanılarak el tespiti gerçekleştirilir. Elin görüntü üzerindeki konumuna göre gerekli durumlarda uyarı şiddeti artırılarak yapılar veya kesici durdurulur. Çalışmada 1. derece tehlikeli kırmızı bölge kesiciyi kapsayan bölge olup sarı bölge ise uyarı bölgesi 2. derece tehlikeli bölgedir. Bu bölge yaklaşım mesafesinden hesaplanır ki örnek olarak 0.01 m eşik değeri aşılmışsa sesli ve ışıklı uyarı verilir. Eğer kullanıcının eli 1. derece tehlikeli bölgeye geçerse, sistem tamamen durdurulur. Benzer şekilde eller noktasal olarak 1 m/sn'den daha hızlı tehlikeli bölgeye doğru hareket ederse sistem durdurulur. Elin tehlikeli bölgeye girme durumu hesaplanarak,

erken uyarı makinanın öncelikle durdurulması, sesli ve ışıklı vb. uyarı verilmesi amaçlanır. Uyarı bölgesi ise 2 derece tehlikeli bölgeyi temsil eder ve tehlikeli bölgeden önce sesli ve ışıklı vb. uyarı verilerek makina operatörünün tehlikeli bölgeye yaklaşmadan önce uyarır.

Önerilen sistemin gerçek zamanlı çalışabilmesi işlem hızı ile birlikte görüntü alma hızına bağlıdır. Burada her bir görüntü için ortalama tespit ve toplam işlem süresi mevcut donanım için Python yazılımının toplam veri işleme ve çıktı verme süresi yeterli olmalıdır. Sistemden üretilen tetikleme çıktıları, daire testere vb. tehlikeli makinaların acil durdurma sistemini etkilemektedir. Dr. Steve Gass tarafından geliştirilen sistemin durma süresi 0.005 sn olduğu belirtilmektedir, ancak bu süre temas ile başlamakta ve alüminyum fren kartuşu ile kısalmaktadır. Fren kartuşu sistemi tekrar kullanılamaz hale getirebilmektedir, dolayısıyla daire testere ve kartuş yenilenmelidir. Fren kartuşu olmazsa bu süre 0.015 sn civarındadır ki bu süre testere gizlenme sisteminin eli koruması için geçen süredir (SawStop 2021, Hand Guard 2022). Elin hızı ile birlikte durdurma sisteminin hızını birlikte değerlendirilerek uyarı ve tehlike bölgesi hesaplanmaktadır. Tespit sistemi kameradan aldığı canlı görüntüyü işleyerek, çıkış birimlerine tetikleme sinyali göndermektedir. Burada durdurma sistemi süresi t_d ve veri işleme süresi t_v olarak tanımlanacak olursa tehlike bölgesi sınırları için el hızı v_e için $v_e \cdot (t_d + t_v)$ tehlike bölgesi için sınırları belirlememizi sağlayacaktır. El hızı 1 m/sn için durdurma sistemi 0.005-0.015 sn olması durumunda veri işlem süresi 0.015-0.030 sn



Şekil 3. Yapay zeka ile el kazalarını önlemek için tasarlanan sistemin algoritma akış şeması.

seviyesinde olması 0.03-0.05 m tehlike bölgesi sınırını oluşturmaktadır. Uyarı bölgesi sınırı ise tehlike bölgesi sınırının iki katı alınmaktadır.

2.2. Ortam Görüntüsünün İyileştirilme Çalışması

Bu çalışmada Şekil 3'de "Parlaklık ve Medyan Filtreleme" bloğu MediaPipe Hands modeli kullanımı öncesi parlaklık dengeleme ve gürültü etkisi araştırılmaktadır. Model içinde var olan görüntü düzeltme teknikleri ile ham verilerin düzeltilmesi, pürüzsüzleştirilmesi ve asıl görüntü üzerinde tespit

edilen noktaların anlamlandırılması adımlarını içerir. Nihai tespit edilen elin görüntüsünden doğru tespit edilmesi için model kendi içinde bir görüntü işleme tekniği uygular. Öğretilen model içerisinde tespit edilmesi beklenen el sayısı ve güven aralığı bilgileri de girdi olarak verilmektedir. Bu girdiler işlem yükünü etkilerken bu çalışmada MediaPipe Hands modelinin tespit sonuçları ile birlikte parlaklık ve medyan filtrelerinin kullanımıyla dört farklı durum incelenmektedir.

i- Filtresiz: MediaPipe Hands modelinin herhangi bir

101	102	103	104	105
101	102	103	104	105
101	102	255	104	105
101	102	103	104	105
101	102	103	104	105

Şekil 4. Gürültü etkisi azaltma medyan filtre matrisi.

filtrelemenin olmadığı durum tespit sonuçları değerlendirilmektedir.

ii- Parlaklık Filtresi: MediaPipe Hands modeli el tespitini iyileştirmek için tasarıma eklenen parlaklık dengeleme filtresi ile tespit sonuçları incelenmektedir.

iii-Medyan Filtresi: MediaPipe Hands modeli el tespitini iyileştirmek için tasarıma eklenen gürültü temizleme filtresidir ki bu filtre yumuşatma yaparak tuz ve biber gürültülerini filtreler. Gerçek hayatta bu gürültülere toz, talaş ve çapaklar örnek gösterilebilir. Kameradan alınan görüntünün her pikseli RGB 3 farklı 256 değerden oluşan 8 bitlik renk düzeninde, tuz gürültüsü görüntüde bulunan beyaz noktalar. Beyaz 8 bitlik renk skalasında 255 değeri ile tüm renklerdeki gürültüleri temsil ederken siyah 0 değeri ile yokluğu ya da kör noktaları temsil eder. Beyaz ve siyah noktalar görüntüdeki insan elini tespit etmeyi zorlaştırdığından, medyan filtresi ile ortadan kaldırılmalıdır. Şekil 4'de örnek olarak verilen 5x5 lik bir görüntünün sayısal değerleri incelendiğinde; medyan filtresinde 24 değer küçükten büyüğe doğru sıralandığında en ortada yer alan değeri 103 yapmaktadır ki ortadaki 255 değeri görüntüye eklenen beyaz tuz gürültüsüdür. Medyan filtre özelliği ile değeri aritmetik orta değer 103'e sabitler. Doğrusal olmayan medyan filtresi bu mantıkla aykırı olan tüm değerleri kaldırır ki bunun sonucunda gürültü temizlenirken görüntüde filtrenin boyutuna bağlı yumuşama gerçekleştirilir. Filtrenin boyutu temelde gürültünün yoğunluğuna bağlıdır ve yoğunluk arttıkça filtrenin (n x n) boyutu da artırılmalıdır.

iv- Parlaklık ve Medyan Filtresi: MediaPipe Hands modeline ek olarak, hem parlaklık dengeleme, hem de görün-

tüdeki gürültüleri ortadan kaldıran medyan filtre birlikte çalışmaktadır. MediaPipe Hands modeli ile yapılan tasarımın iyileştirilmesi için görüntü anlık olarak medyan filtreden geçirilerek gürültüler temizlenmektedir (Erkan ve Gökrem 2017, Erkan vd. 2020, Küpeli ve Bulut 2020). Daha sonra parlaklık dengelenmesi sağlanmaktadır ki son olarak MediaPipe Hands modeli kullanımı ile el tespiti yapılır.

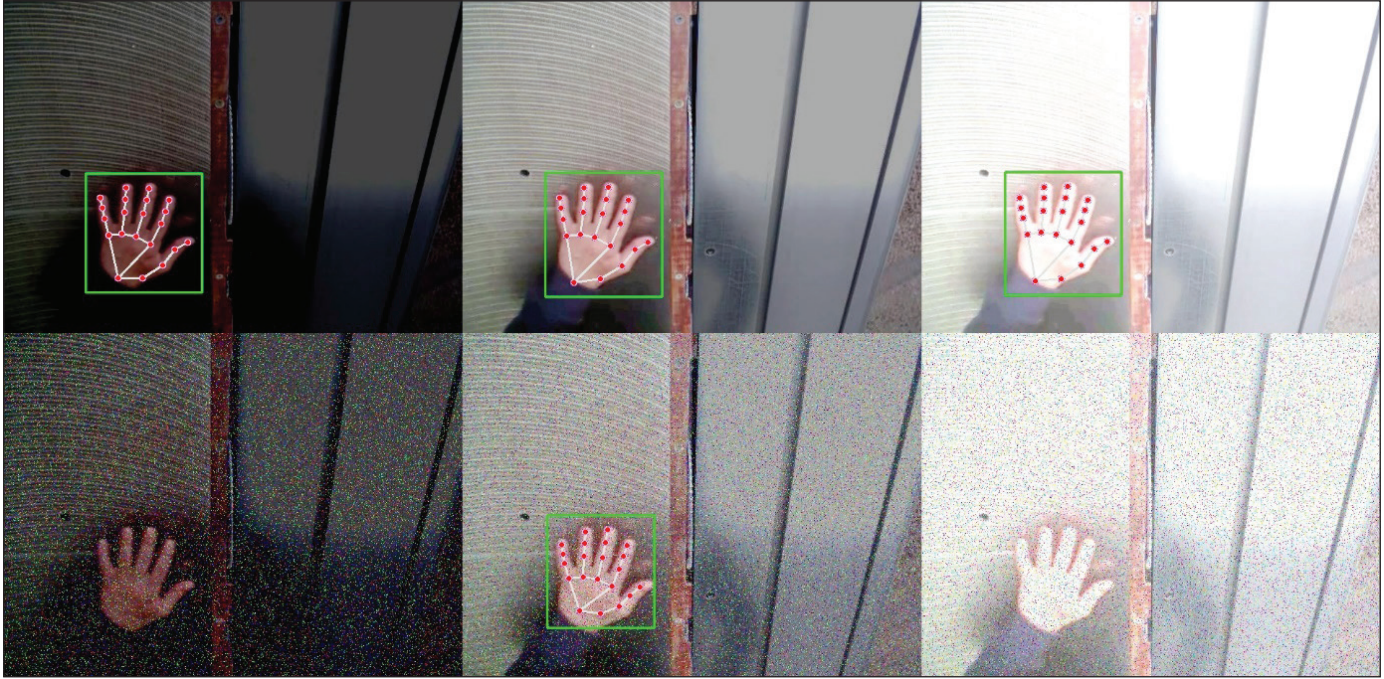
Şekil 5 ile gürültülü etkisi ile birlikte parlaklık etkisinin önerilen sistemde kıyaslaması örnek olarak sunulmaktadır. Gürültü ve parlaklığın bir arada bulunduğu durumlarda el tespitinin zorlaştığı görülmektedir. Not etmek gerekir ki elin hareket hızı da el tespitini zorlaştırmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada önerilen sistem MediaPipe Hands modeli kullanımıyla varsayılan ayarlarındaki filtreleme özellikleri ile değişken ortam parlaklığı koşullarında, gürültü etkisiyle makina-atölye ortamında deneysel sonuçlar incelenmektedir. Bu deneysel çalışmada tespit performansını iyileştirmek için tasarlanan parlaklık ve medyan filtrelerinin tespit performansına etkileri de ölçümlenmektedir.

Deneyin standart ve tekrarlanabilir olması için 60 saniyelik bir çalışma görüntü kaydı (30 FPS görüntü alma hızı) oluşturulmuş olup ortam koşulları farklı parlaklık seviyelerinde ölçümler tekrarlanabilir şekilde yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan kamera 640x480 piksel görüntü almakta olup çalışma alanı ise 1 x 0.75 m olarak belirlenmiştir ki her pikselin karşılığı 0.16 cm kadardır. El hızı en fazla 1 m/sn için durdurma sistemi ile veri işlem süresi 0.03 sn seviyesinde olması 0.04 m tehlike bölgesi sınırı seçilmiş olup uyarı bölgesi sınırı ise tehlike bölgesi sınırının iki katı alınmaktadır. Elin kesiciye doğru hız sınırını aşması durumunda da durdurma ve uyarı işlemi yapılmaktadır. Varsayılan parlaklık değerinin renk sıcaklığı RGB 8 bit renk düzeninde [0, 255] aralığında 256 değer orta noktası 128 olduğu kabul edilmiştir. Parlaklık seviyesi orta noktası 128 (varsayılan) kabul edilerek 50, 100 fazla (fazla ve çok fazla) ve 50, 100 az (düşük ve çok düşük) seviyelerde kayıtlar bulunmaktadır. Ek olarak çalışma görüntü kaydına %5 tuz, %5 biber olmak üzere %10 gürültü eklenerek sonuçlar kıyaslanmaktadır. Performans kıyaslaması tamamında en az bir el görüntüsü bulunan çalışma kaydında el tespitinin yüzdesel değişimi ile yapılmaktadır.

Mediapipe Hands modeli kullanımında gerçek zaman görüntüler üzerinde çalışma seçimi yapılırken görüntüdeki el sayısı 1, el tespit/takip minimum güven katsayısı 0.5, model karmaşıklığı da 1 olarak seçilmiştir. En fazla el sayısı-



Şekil 5. MediaPipe Hands modeli ile 21 anahtar nokta tespitinde parlaklık ve gürültü etkisi.

Çizelge 1. Gürültüsüz ortamda, farklı parlaklık koşullarında önerilen sistem el tespit performansı ve işlem süreleri.

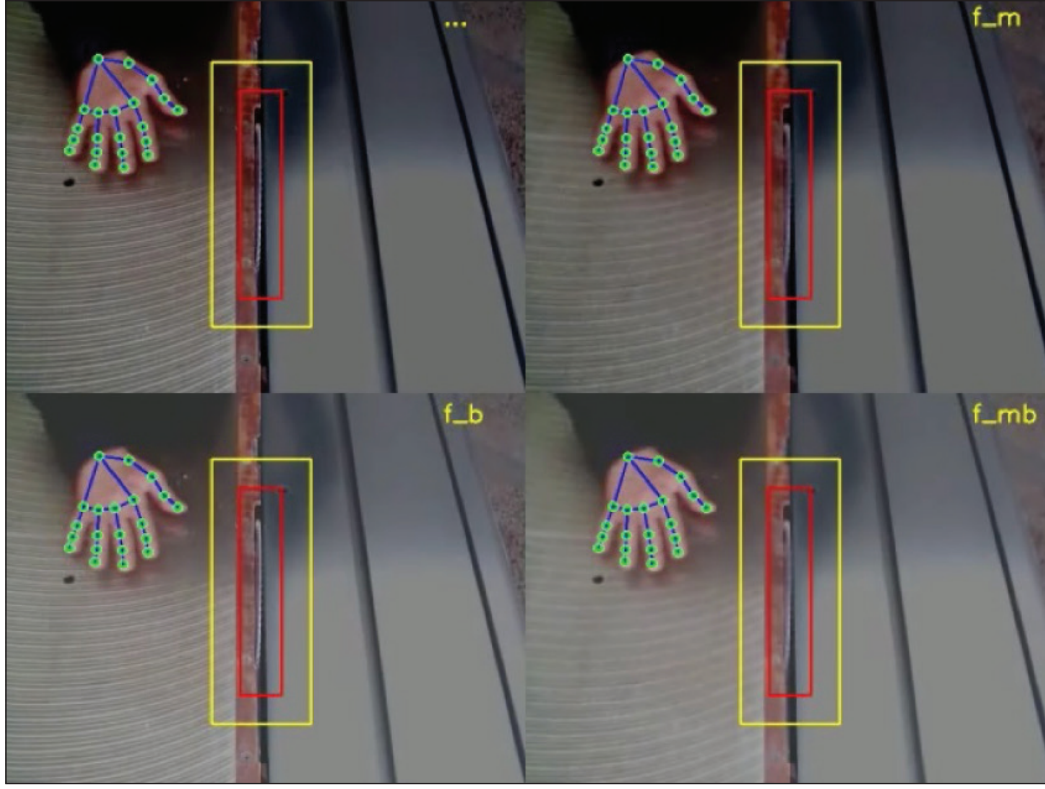
Parlaklık Oranı	Filtresiz	Parlaklık Filtresi	Medyan Filtresi	Parlaklık ve Medyan Filtreleri	İşlem Süresi (sn)
Çok Düşük (28)	%99.94	%100.00	%100.00	%100.00	(25.63 - 30.96)
Düşük (78)	%100.00	%100.00	%100.00	%100.00	(25.51 - 30.78)
Varsayılan (128)	%100.00	%100.00	%100.00	%100.00	(25.03 - 30.45)
Fazla (178)	%99.89	%100.00	%100.00	%100.00	(25.60 - 31.01)
Çok Fazla (228)	%99.83	%99.94	%100.00	%100.00	(25.38 - 30.91)

nın 1 seçimi gerçek zaman çalışabilme durumu ile işlemci yükünün azaltılması hedeflenmektedir. Ek olarak model 21 anahtar noktanın konum bilgisi ile birlikte el tespit sonucunun güven puanını da çıktı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan model %95 güven düzeyinde elde edilen güven puanı sonuçları da kıyaslanmaktadır.

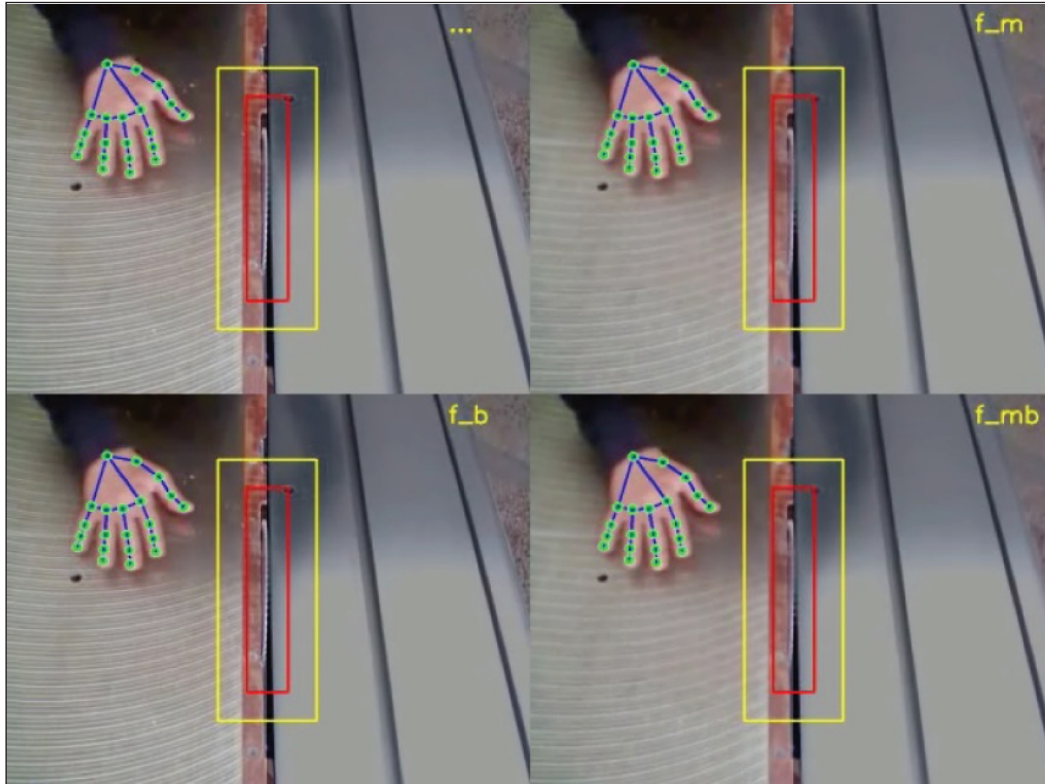
Çizelge 1’de gürültüsüz ortamda ve farklı aydınlık koşullarında el tespit oranları verilmektedir. Ek olarak gerçek zaman çalışmalarını etkileyecek işlem süreleri de verilmektedir. Burada tek bir el tespiti için çalışma yapılmakta olup iki el çalışması için yapay zeka modeli işlem süresi yaklaşık iki kat artmaktadır. Gürültüsüz durum incelendiğinde, MediaPipe Hands modeli tespit performansına kıyasla, ek parlaklık dengeleme ve medyan filtreleri fazla bir etki gösteremediği değerlendirilmektedir. Parlaklık seviyesinin çok

düşük ve çok fazla olması az da olsa performansı düşürmektedir. Ek olarak not etmek gerekir ki işlem süresi kullanılan parlaklık dengeleme filtresi ile bir saniye, medyan filtresi ile beş saniye kadar artmaktadır. Bununla birlikte işlem süresi görüntü alma hızının yarısı kadar olup gerçek zaman çalışma yapılabilmektedir.

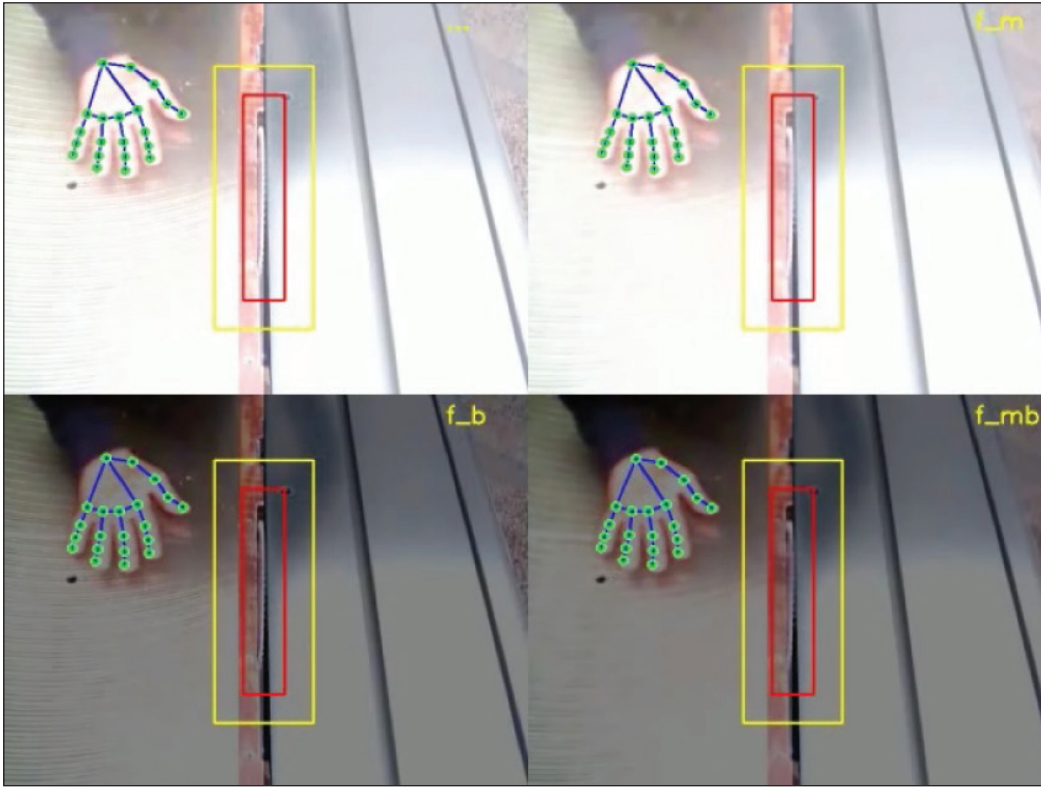
Parlaklık dengeleme ve medyan filtrelerin gürültüsüz durumda çok az, varsayılan ve çok fazla parlaklık seviyelerinde el tespit sonuçları Şekil 6-8’de sırasıyla verilmektedir. Burada önerilen sistem tüm koşullarda el tespiti yapmakta olup görüntülerde iyileştirmeler değerlendirilmektedir. Tespit edilen 21 anahtar noktanın iş makinası kesiciye yakınlığına göre tehlike ve uyarı işlemleri gerçekleştirilmektedir.



Şekil 6. Varsayılan parlaklıktan 100 birim daha düşük karanlığa yakın ortam parlaklığı el tespit sonuçları (filtresiz, f_b parlaklık, f_m medyan, f_{mb} medyan-parlaklık filtreleri).



Şekil 7. Varsayılan parlaklıkta el tespit sonuçları (filtresiz, f_b parlaklık, f_m medyan, f_{mb} medyan-parlaklık filtreleri).



Şekil 8. Varsayılan parlaklıktan 100 birim daha fazla ortam parlaklığı el tespit sonuçları (filtresiz, f_b parlaklık, f_m medyan, f_{mb} medyan-parlaklık filtreleri).

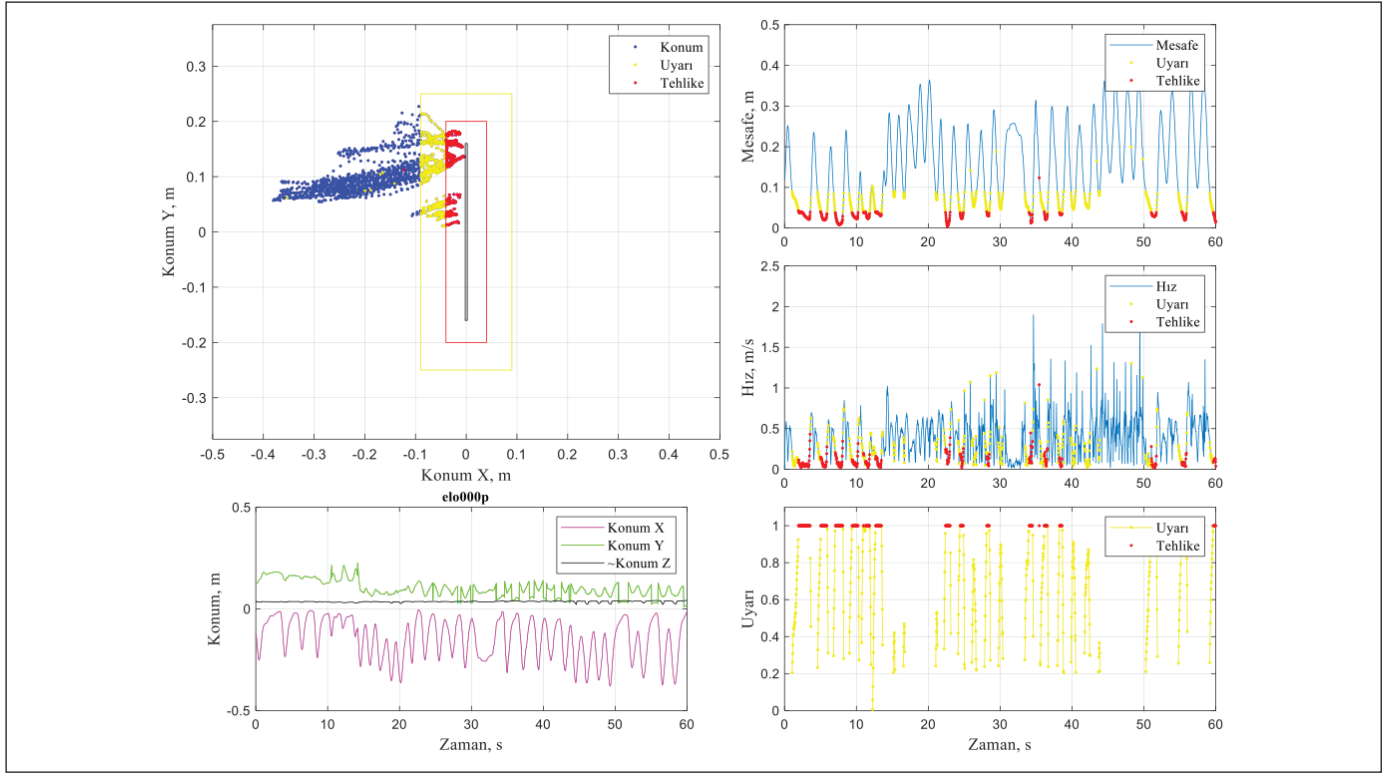
Çizelge 2. Gürültülü ortamda, farklı parlaklık koşullarında önerilen sistem el tespit performansı ve işlem süreleri

Parlaklık Oranı	Filtresiz	Parlaklık Filtresi	Medyan Filtresi	Parlaklık ve Medyan Filtreleri	İşlem Süresi (sn)
Çok Düşük (28)	%97.84	%97.93	%99.92	%99.97	(27.59 - 31.82)
Düşük (78)	%98.71	%98.71	%99.99	%100.00	(27.49 - 31.39)
Varsayılan (128)	%99.66	%99.93	%100.00	%100.00	(27.61 - 30.94)
Fazla (178)	%93.73	%98.53	%99.98	%100.00	(27.91 - 31.11)
Çok Fazla (228)	%47.83	%75.57	%90.86	%96.33	(27.99 - 31.37)

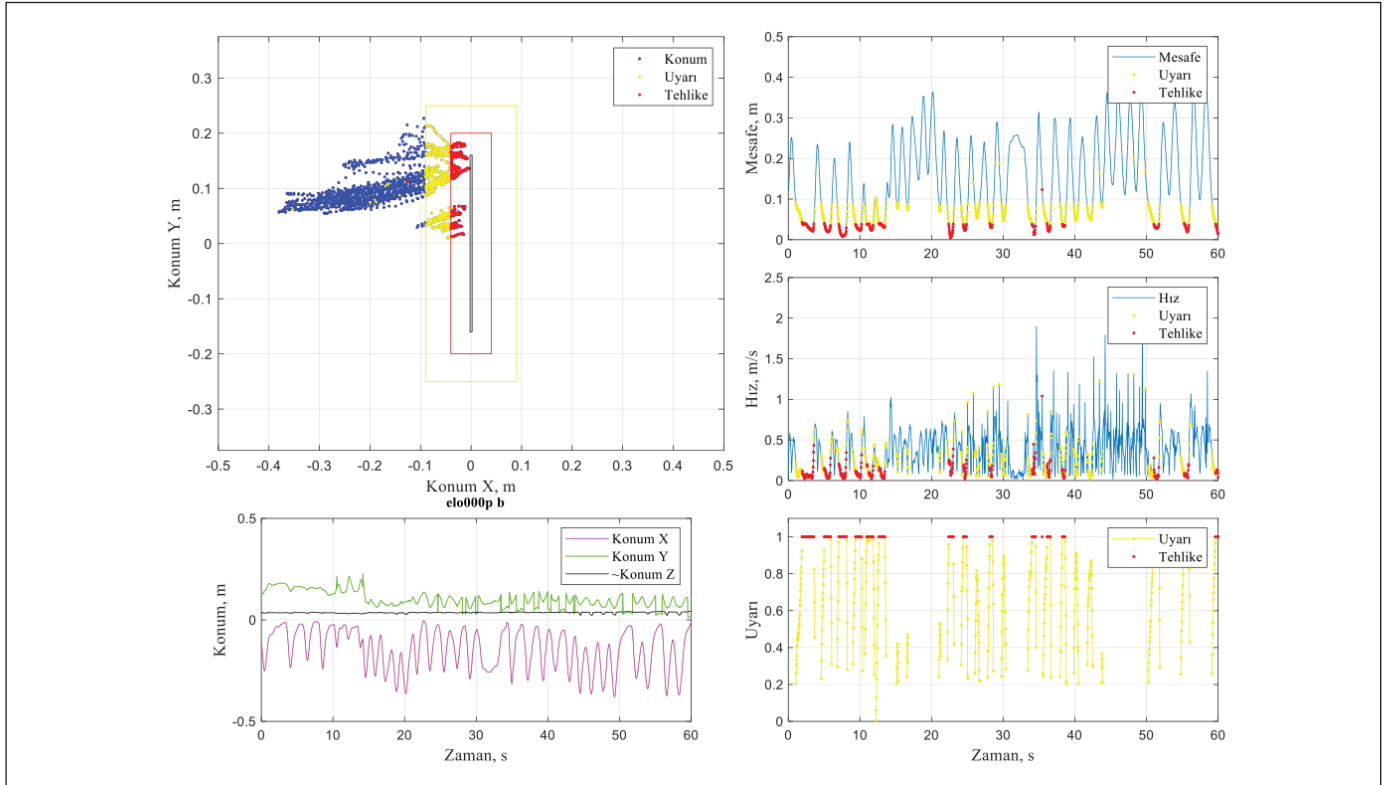
Burada tehlike ve uyarı bölgesinde olma durumu kıyaslamaların detaylı analizi sırasıyla filtresiz, parlaklık dengeleme, medyan ve medyan-parlaklık filtreleriyle Şekil 9-12'de verilmektedir. Deney süresince tespit edilen elin mesafe ve hız değişimi verilmekte olup tehlike ve uyarı bölgesi durumları değerlendirilmektedir. Ek olarak X-Y düzleminde konum değişimi ile tehlike ve uyarı bölgesinde olma durumları da gözlemlenmektedir. Burada elin hızının tehlike bölgesine doğru sınır 1 m/sn üzerinde olması durumunda da sistem iş makinasının durdurulmasını sağlamaktadır. Ek olarak uyarı ve durdurma işlemlerinin zamana göre değişimi de değerlendirilmektedir.

Çizelge 2'de gürültülü ortam ve farklı parlaklık seviyelerinde yapılan deneysel çalışmada ise tespit performansında dü-

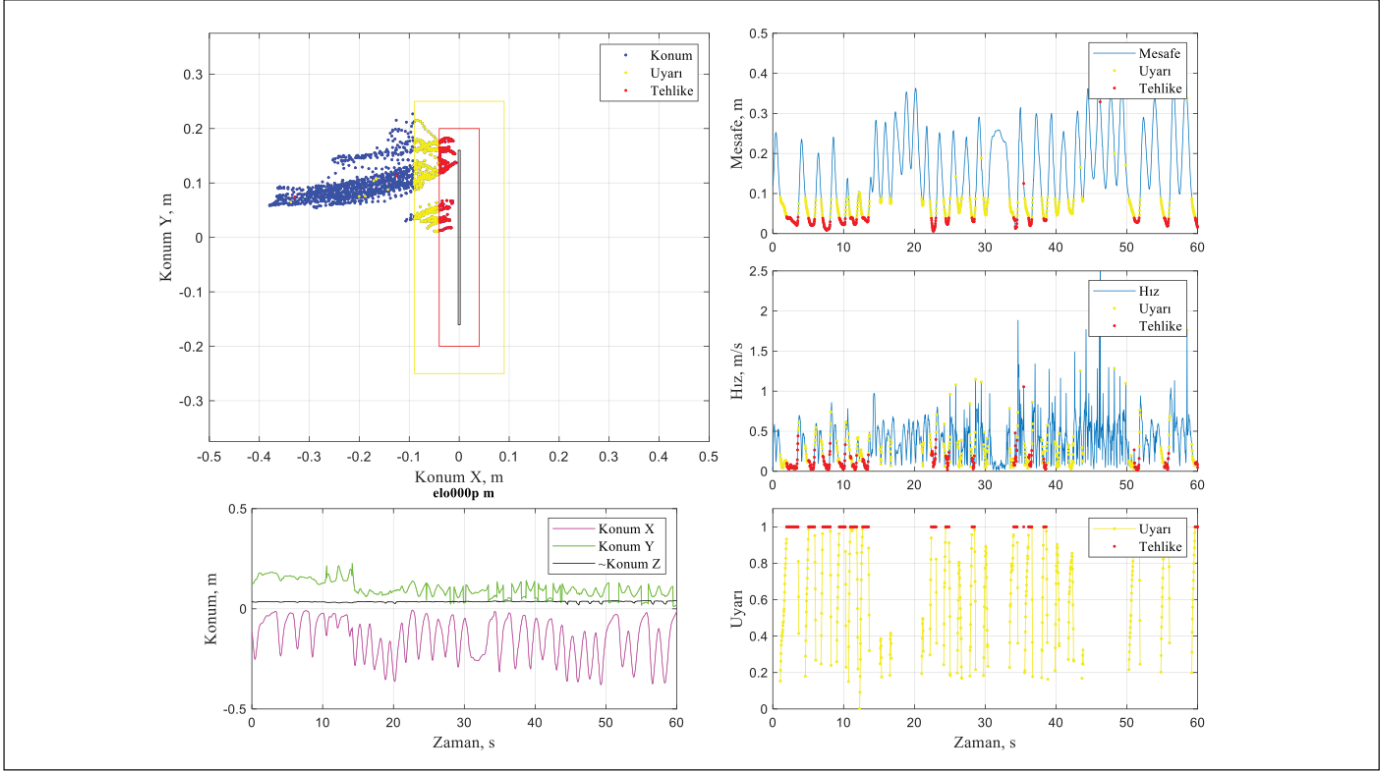
şüşlerin olduğu, bu düşüşleri medyan ve parlaklık filtresi ile belirli oranda iyileştirildiği el tespit oranlarındaki değişim ile görülmektedir. Deneyin kıyaslanabilir ve tekrarlanabilir olması için beş farklı rasgele gürültü her bir parlaklık seviyesine eklenerek filtre etkisi incelenmiş ve ortalama değerler Çizelge 2'de sunulmuştur. Burada %10 gürültünün MediaPipe Hands modeli performansını nasıl düşürdüğü gözlemlenmektedir. Sadece parlaklık dengeleme filtresi gürültüden dolayı çok başarılı olamadığı, filtresiz duruma göre sadece medyan filtresi tespit sonuçlarını iyileştirdiği görülmektedir. Parlaklık dengeleme filtresinin ise bazı durumlarda tespit sayısında çok düşük oranda artışı sağladığı gözlemlenmektedir. İşlem sürelerinin de gürültünün etkisi ile birkaç saniye artış gösterdiği değerlendirilmektedir.



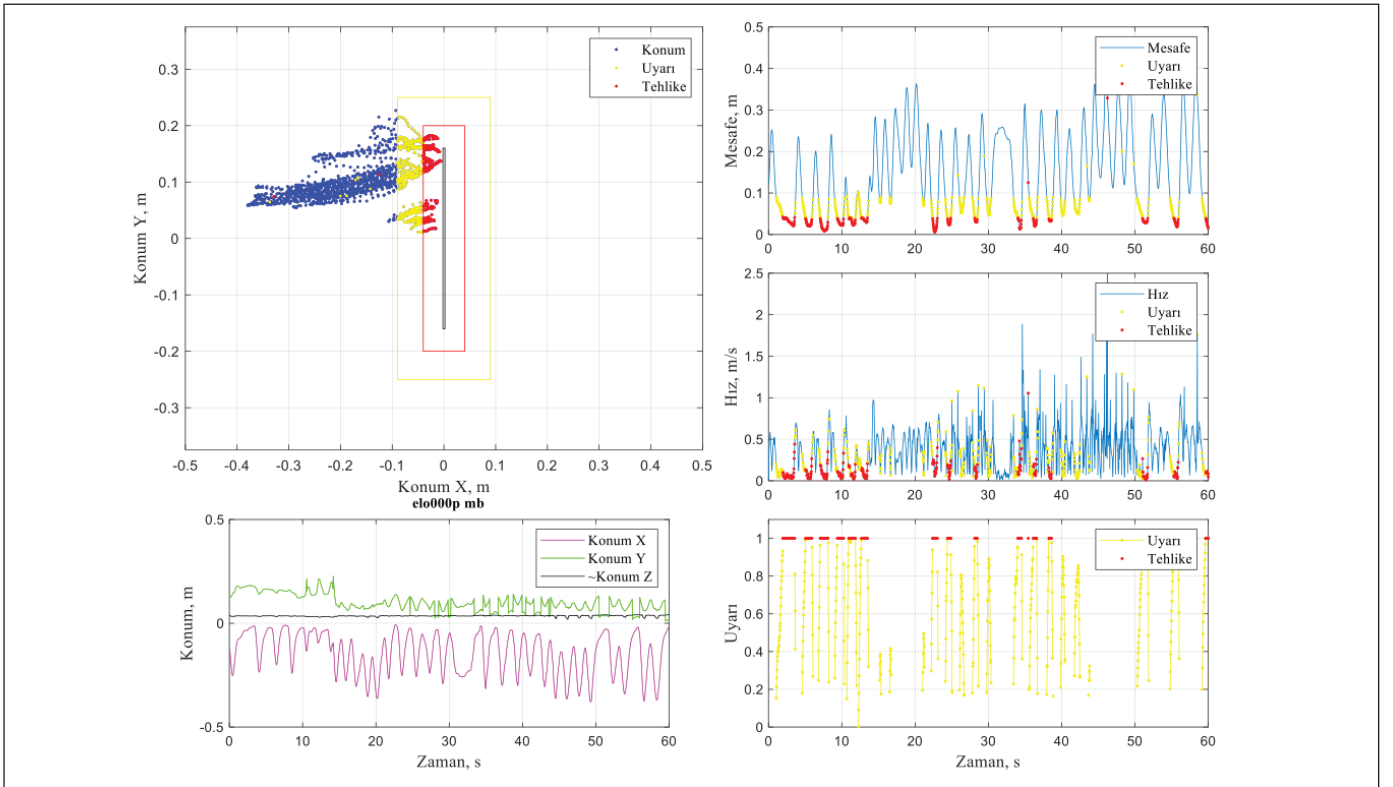
Şekil 9. Varsayılan parlaklıkta filtresiz el tespit sonuçları; konum, mesafe, hız, uyarı ve konum değişimi.



Şekil 10. Varsayılan parlaklıkta parlaklık filtresi el tespit sonuçları; konum, mesafe, hız, uyarı ve konum değişimi.



Şekil 11. Varsayılan parlaklıkta medyan filtresi el tespit sonuçları; konum, mesafe, hız, uyarı ve konum değişimi.



Şekil 12. Varsayılan parlaklıkta medyan-parlaklık filtresi el tespit sonuçları; konum, mesafe, hız, uyarı ve konum değişimi.

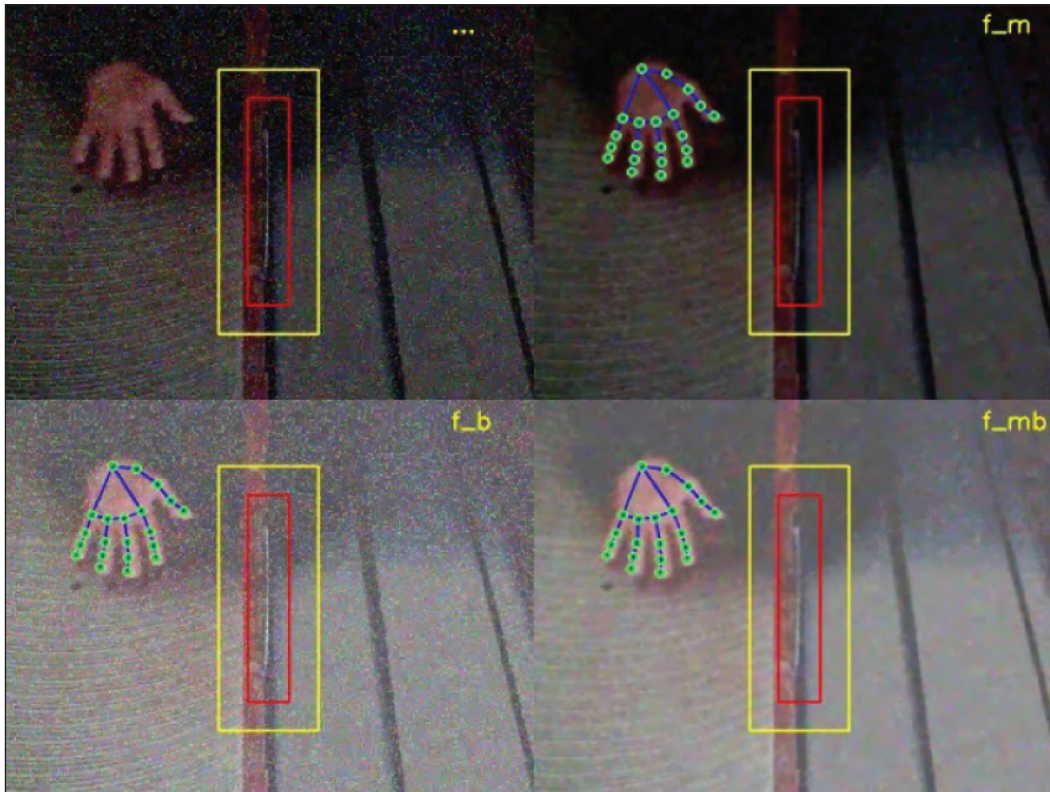
Not etmek gerekir ki model karmaşıklığına ek olarak parlaklık filtresi %4, medyan filtresi %11 ve her ikisi %18 işlem sürelerinde artış göstermekte olup mevcut durumu ile gerçek zaman çalışabilmektedir.

Gürültülü ortamda çalışan tespit sisteminin el görüntüleri Şekil 13-15'de verilmekte olup tuz ve biber gürültü etkisi görülmektedir. Burada sırasıyla çok az, varsayılan ve çok fazla parlaklık durumları verilmektedir. Her bir şekilde filtresiz, parlaklık, medyan ve medyan-parlaklık filtre kullanım performansı kıyaslanmakta olup önerilen filtreler ile tespit sisteminin tuz ve biber gürültü etkisi azalttığı görülmektedir. Tespit sisteminin performans iyileştirmesindeki etkileriyle el pozisyon değişimi ve hızı kestirimi ile uyarı ve durdurma sisteminin çalışması tuz ve biber gürültü etkisi altında bile çalışabilmektedir. Bu durumda tespit sisteminin yakalanan el pozisyon değişimi ve hızı bulunmakta olup uyarı ve durdurma sistemi etkin bir şekilde çalıştırılmaktadır.

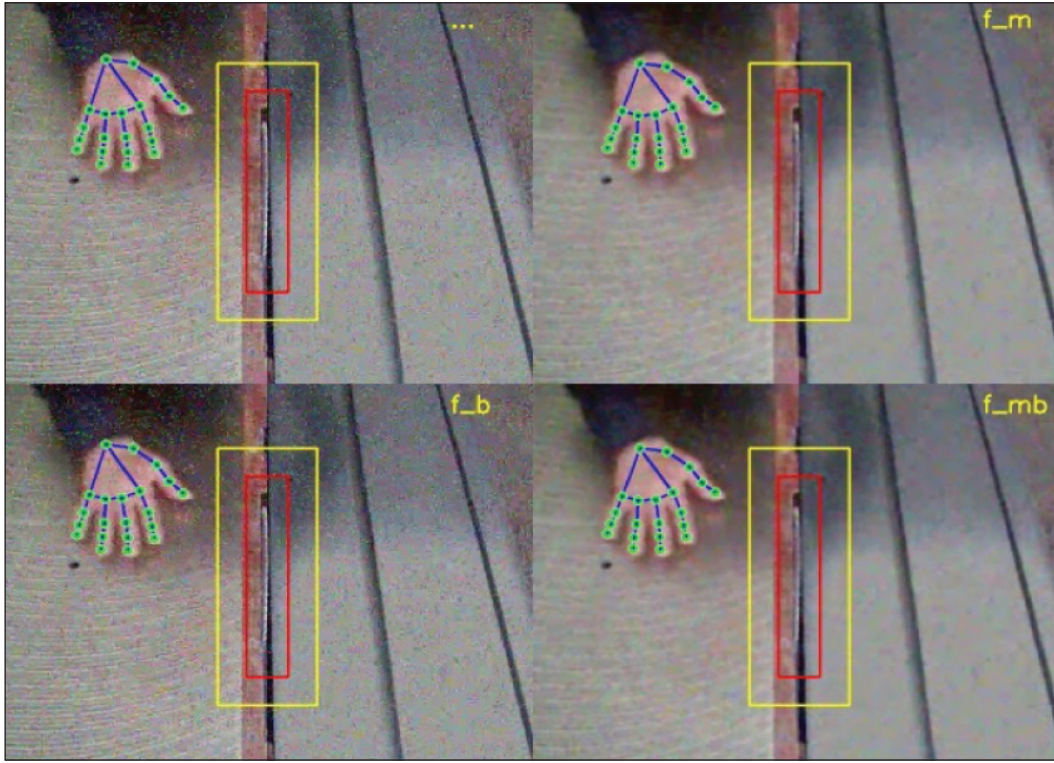
Kullanılan Mediapipe Hands modeli önerilen iyileştirme filtreleri ile birlikte bu çalışmada hedeflenmektedir. Her ne kadar farklı el tespit modelleme çalışmaları bunansa da burada beş farklı parlaklık seviyesinde gürültü etkisi ile birlikte filtreleme etkisi değerlendirilmektedir. Ek olarak mevcut donanım ile gerçek zaman çalışabilme durumu incelenmektedir. Buna göre model karmaşıklığına ek olarak önerilen

filtrelerinin Çizelge 1-2'de verildiği gibi işlem sürelerini %4 ile %18 oranında artırmış olsa dahi gerçek zaman çalışabileceği görülmektedir.

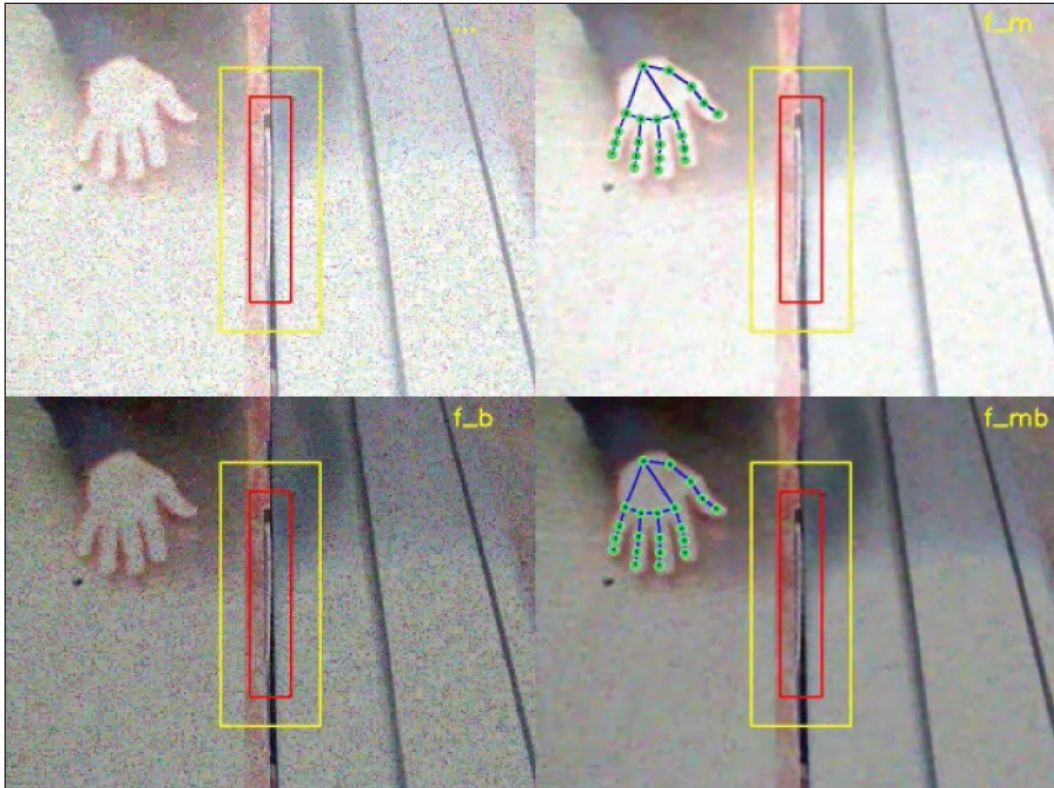
Bu çalışmada önerilen Mediapipe Hands model güven puanı gürültü olmadığı durumda Çizelge 3'de ve gürültü durumunda Çizelge 4'de kıyaslanmaktadır. Yüzdesel güven puanı güven aralıkları ile birlikte değerlendirilirken beş farklı parlaklık seviyesinde filtre kullanım etkisi kıyaslanmaktadır. Burada model giriş parametreleri arasında yer alan el tespit/takip katsayılarının %50 olarak seçilmesi ile birlikte gürültü olmadığı durumda en düşük 73.81 ± 0.63 güven seviyesinde el tespitinin ve takibinin yapıldığı görülmektedir. Normal parlaklık seviyelerinde ise %89 seviyelerine ulaşmaktadır. Gürültü etkisi ile birlikte 71.99 ± 0.58 değerine kadar düşmekle birlikte parlaklık seviyesin bağlı olarak %80 değerine ulaşmaktadır. Filtrelerin etkisi ile güven puanının artışı genel olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 13. Gürültülü ortam çok düşük parlaklık el tespit sonuçları (filtresiz, f_b parlaklık, f_m medyan, f_mb medyan-parlaklık filtreleri).



Şekil 14. Gürültülü ortam varsayılan parlaklık el tespit sonuçları (filtresiz, f_b parlaklık, f_m medyan, f_mb medyan-parlaklık filtreleri).



Şekil 15. Gürültülü ortam çok fazla parlaklık el tespit sonuçları (filtresiz, f_b parlaklık, f_m medyan, f_mb medyan-parlaklık filtreleri).

Çizelge 3. Gürültüsüz ortam Mediapipe Hands model güven puanı kıyaslaması.

Parlaklık Oranı	Filtresiz	Parlaklık Filtresi	Medyan Filtresi	Parlaklık ve Medyan Filtreleri
Çok Düşük (28)	%83.68±0.55	%83.11±0.56	%85.45±0.50	%85.46±0.51
Düşük (78)	%87.37±0.46	%85.42±0.49	%89.24±0.38	%89.25±0.38
Varsayılan (128)	%87.61±0.46	%87.61±0.46	%89.39±0.38	%89.39±0.38
Fazla (178)	%86.44±0.51	%87.02±0.45	%87.98±0.45	%88.15±0.40
Çok Fazla (228)	%73.81±0.63	%76.33±0.53	%74.31±0.62	%75.78±0.53

Çizelge 4. Gürültü etkisi ile Mediapipe Hands model güven puanı kıyaslaması.

Parlaklık Oranı	Filtresiz	Parlaklık Filtresi	Medyan Filtresi	Parlaklık ve Medyan Filtreleri
Çok Düşük (28)	%75.89±0.60	%71.99±0.58	%74.58±0.60	%73.58±0.60
Düşük (78)	%81.09±0.59	%76.94±0.62	%80.83±0.61	%80.16±0.61
Varsayılan (128)	%78.76±0.61	%78.76±0.61	%80.00±0.60	%80.00±0.60
Fazla (178)	%75.88±0.59	%76.73±0.59	%75.83±0.60	%78.73±0.61
Çok Fazla (228)	%73.89±0.60	%72.81±0.56	%72.89±0.56	%72.93±0.57

Çizelge 5. Tehlike ve uyarı bölgesi Mediapipe Hands model el tespit sayıları.

Parlaklık Oranı	Filtresiz	Parlaklık Filtresi	Medyan Filtresi	Parlaklık ve Medyan Filtreleri
Çok Düşük (28)	318+1, 374+3 315+3, 367+6	316+1, 372+4 320+1, 372+3	318+1, 371+5 319+1, 376+2	318+1, 374+3 318+2, 376+4
Düşük (78)	319+1, 379+3 317+1, 370+6	318+1, 376+4 321+1, 369+5	318+2, 373+5 316+2, 370+4	318+2, 376+3 316+2, 371+3
Varsayılan (128)	319+1, 378+5 317+2, 372+5	319+1, 378+5 318+1, 372+5	318+2, 378+5 318+2, 373+5	318+2, 378+5 318+1, 374+5
Fazla (178)	317+1, 380+2 317+2, 367+5	322+2, 374+4 316+3, 368+4	318+1, 375+3 317+2, 370+4	323+3, 372+5 318+1, 371+5
Çok Fazla (228)	317+2, 376+5 287+4, 172+4	319+2, 374+6 311+5, 342+4	315+1, 379+3 314+4, 361+5	317+2, 373+4 318+2, 368+5

Deneyisel çalışmada yer alan 60 sn uzunluğunda işlenen 1800 görüntüde tehlike ve uyarı bölgesi model el tespit sayıları hız aşımı durumu ile birlikte Çizelge 5’de verilmektedir. Parlaklık seviyelerinde değişim ile birlikte gürültü etkisi de kıyaslanmaktadır. Şekil 9-12’de bu sayıları konum bilgisi ile gözlemlemek mümkündür. Örneğin varsayılan parlaklık değerinde filtresiz durumda 319 tehlike bölgesinde 378 uyarı bölgesinde yer alırken gürültü etkisiyle 317 tehlike bölgesi 372 uyarı bölgesinde yer almaktadır. Ayrıca hız aşımı nedeni ile tehlikeli 1 görüntü bulunurken uyarı olması gereken 5 görüntü yer almaktadır ki gürültü etkisi ile bu durum 2

tehlike, 5 uyarı bölgesinde karşılaşılmaktadır. Parlaklık etkisi ile bu değerlerde sapma olduğunu da vurgulamak gerekir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada görüntü işleme tabanlı el güvenlik sistemi yapay zeka algoritmaları ile tasarlanmış olup görüntü kalitesini etkileyen faktörler ile deneyisel sonuçlar değerlendirilmiştir. Eğitilmiş Mediapipe Hands model kullanımı önerisiyle işçi sağlığı ve iş güvenliği alanında kazaları önlemek ve doğru çalışma davranışlarının sınırlarını belirlemeyi hedefleyen bu çalışma, parlaklık etkisinin ve gürültü azaltma önerileri

ile iyileştirme sonuçlarını ortaya koymaktadır. El pozisyon tespiti ile sesli uyarı sistemi ve iş makinasını durdurma denetim sistemi bu çalışmada önerilmekte olup, tehlikeli iş makineleri ile çalışanların uyarı sistemi sayesinde eğitildiği de düşünülmektedir. Önerilen tasarım mevcut durumu ile gerçek zaman çalışabilmektedir. Çalışmada kullanılan kamera özelliklerine bağlı olarak model olumlu ve olumsuz ortam koşullarında değerlendirilmiş olup geliştirilen filtreler ile el tespit performansının büyük oranda iyileştirebildiği gözlemlenmiştir. Gömülü sistemlere uyumuyla MediaPipe Hands modeli yapay zeka algoritmalarının ve kameraların görüntü kalitesine bağlı olarak çok daha hızlı el tespit ve takip yapması beklenmektedir. Tüm bu gelişmeler daha hızlı koruma sağlaması anlamına gelmektedir. Yapay zeka tabanlı el güvenlik sistemi kamera, bilgisayar ve yazılım alanındaki gelişmelere bağlı olarak sadece el değil kol gibi diğer uzuvların tespitiyle sürekli gelişmeye devam edebilecektir.

Teşekkür: Araştırmacı(lar) deneysel çalışmalara destek veren teknik personele ve makaleyi değerlendiren hakemlere teşekkür eder.

Yazar katkısı:

Sinan Yüksel; çalışma hakkında verileri toplamış, analiz etmiş ve makale taslağını hazırlamıştır. Rifat Hacıoğlu; çalışmayı planlamış, analiz sonuçlarını denetlemiş ve makale yazımını düzenlemiştir.

5. Kaynaklar

- Aksoy, E., Keskin, H. 2019.** Mobilya endüstrisinde iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili risk değerlendirmesi: Begonya mobilya imalat işletmesi örneği. Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi, 2(1): 46-60. Doi: 10.33725/mamad.516103
- Amprimo, G., Masi, G., Pettiti, G., Olmo, G., Priano, L., Ferraris, C. 2024.** Hand tracking for clinical applications: Validation of the Google MediaPipe Hand (GMH) and the depth-enhanced GMH-D frameworks. Biomedical Signal Processing and Control, 96(A):106508, Doi: 10.1016/j.bspc.2024.106508.
- Bora, J., Dehingia, S., Boruah, A., Chetia, AA., Gogoi, D. 2023.** Real-time assamese sign language recognition using mediapipe and deep learning. Procedia Computer Science, 218: 1384-1393. Doi: 10.1016/j.procs.2023.01.117
- Chung, KC., Shauver, MJ. 2013.** Table saw injuries: epidemiology and a proposal for preventive measures. Plastic and Reconstructive Surgery, 132(5): 777e-783e. Doi: 10.1097/PRS.0b013e3182a3bfb1
- Current, RS., Main, BW., Main, M. 2020.** Saw safety risk in the real world. Professional Safety, 65(11): 24-32.
- Çelik, Ö., Odabaş, A. 2020.** Sign2Text: Konvolüsyonel sinir ağları kullanarak türk işaret dili tanıma. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 19: 923-934. Doi: 10.31590/ejosat.747231
- ÇSGB. 2017.** Mobilya Sektörü İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, <https://www.csgb.gov.tr/medias/7042/mob%C4%B0lya-sektoer%C3%BC-%C4%B0sgys-rehber%C4%B0.pdf> Yayın tarihi 30 Haziran 2017. Erişim tarihi 2 Aralık 2024.
- Demirci, S. 2018.** Mobilya imalatında kullanılan malzeme ve makinelerin iş sağlığı ve güvenliği yönünden değerlendirilmesi. Hastane Öncesi Dergisi, 3(2): 103-119.
- Engür, MO. 2017.** Mobilya endüstrisinde iş sağlığı ve güvenliği mevzuatına uyumun kontrol listeleri ile sağlanması üzerine bir çalışma. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5: 283-292. Doi: 10.21923/jesd.45680
- Erkan, U., Gökrem, L. 2017.** Tuz-biber gürültüsünde tekrarsız medyan filtre. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6(2): 11-19.
- Erkan, U., Enginoğlu, S., Thanh, DN., Hieu, LM. 2020.** Adaptive frequency median filter for the salt and pepper denoising problem. IET Image Processing, 14(7): 1291-1302. Doi: 10.1049/iet-ipr.2019.0398
- Garg, S., Saxena, A., Gupta, R. 2023.** Yoga pose classification: a CNN and MediaPipe inspired deep learning approach for real-world application. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 14(12): 16551-16562. Doi: 10.1007/s12652-022-03910-0
- Gedik, T., İlhan, A. 2014.** Sakarya ili mobilya imalatçılarındaki iş sağlığı ve iş güvenliği üzerine bir inceleme. Turkish Journal of Forestry, 15(2): 123-129. Doi: 10.18182/tjf.74885
- Haji Mohd, MN., Mohd Asaari, MS., Lay Ping, O., Rosdi, BA. 2023.** Vision-based hand detection and tracking using fusion of kernelized correlation filter and single-shot detection. Applied Sciences, 13(13): 7433. Doi: 10.3390/app13137433
- Hand Guard. 2022.** Altendorf sliding table saws HAND GUARD the safety system <https://www.altendorfgroup.com/en/machines/altendorf-hand-guard/> Yayın tarihi 5 Haziran 2021. Erişim tarihi 2 Aralık 2024.
- İlhan, A., Koşar, G., Karapınar, A., Gedik, T. 2013.** Sakarya ili mobilya imalatında iş kazası ve meslek hastalıklarının ortaya çıkış nedenlerinin analizi. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 13(2): 202-210.
- İSG. 2012.** 6331 Sayılı İş Sağlığı Ve Güvenliği Kanunu <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/06/20120630-1.htm> Yayın tarihi 30 Haziran 2012. Erişim tarihi 2 Aralık 2024.
- Kim, JW., Choi, JY., Ha, EJ., Choi, H. 2023.** Human pose estimation using Mediapipe pose and optimization method based on a humanoid model. Applied Sciences, 13(4): 2700. Doi: 10.3390/app13042700

- Kumar, R., Bajpai, A., Sinha, A. 2023.** MediaPipe and CNNs for real-time ASL gesture recognition. arXiv Preprint, arXiv:2305.05296. Doi: 10.48550/arXiv.2305.05296
- Küpelı, C., Bulut, F. 2020.** Görüntüdeki tuz biber ve gauss gürültülerine karşı filtrelerin performans analizleri. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(2): 211-239. Doi: 10.46373/hafebid.768240
- Latreche, A., Kelaiaia, R., Chemori, A., Kerboua, A. 2023.** Reliability and validity analysis of MediaPipe-based measurement system for some human rehabilitation motions. Measurement, 214: 112826. Doi: 10.1016/j.measurement.2023.112826
- MediaPipe. 2023.** MediaPipe solutions guide. <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide> Yayın tarihi 1 Mart 2023. Erişim tarihi 2 Aralık 2024.
- Sánchez-Brizuela, G., Cissal, A., de la Fuente-López, E., Fraile, J-C., Pérez-Turiel, J. 2023.** Lightweight real-time hand segmentation leveraging MediaPipe landmark detection. Virtual Reality, 27: 3125-3132. Doi: 10.1007/s10055-023-00858-0
- Sarkar, D., Bali, R., Ghosh, T. 2018.** Hands-on transfer learning with Python: Implement advanced deep learning and neural network models using TensorFlow and Keras. Packt Publishing Limited, 430 pp. Doi: 10.0000/9781788839051-001
- SawStop. 2021.** Sawstop safety system ICS owner manual. https://www.sawstop.com/wp-content/uploads/2021/10/M_ICS_WEB.pdf Yayın tarihi 2 Temmuz 2020. Erişim tarihi 2 Aralık 2024.
- Tan, FG., Yüksel, AS., Aydemir, E., Ersoy, M. 2021.** Derin öğrenme teknikleri ile nesne tespiti ve takibi üzerine bir inceleme. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 25: 159-171. Doi: 10.31590/ejosat.878552
- Ulusoy, H., Atılğan, A., Peker, H. 2018.** Mobilya endüstrisinde kullanılan makinelerde çalışma güvenliği. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 11(1): 70-81.