

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLGİSAYARLI GÖRÜ İLE DİJİTAL ERGONOMİK RİSK
DEĞERLENDİRME SİSTEMİ: REBA, RULA VE OWAS
UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl Özkan GEÇİCİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2023

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLGİSAYARLI GÖRÜ İLE DİJİTAL ERGONOMİK RİSK
DEĞERLENDİRME SİSTEMİ: REBA, RULA VE OWAS
UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl Özkan GEÇİCİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Alper KİRAZ

TEMMUZ 2023

Anıl Özkan GEÇİCİ tarafından hazırlanan “Bilgisayarlı Görü ile Dijital Ergonomik Risk Değerlendirme Sistemi: REBA, RULA ve OWAS uygulaması” adlı tez çalışması 06.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Dr.Öğr.Üyesi Abdullah Hulusi KÖKÇAM**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Alper KİRAZ (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr.Öğr.Üyesi Caner ERDEN**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “BİLGİSAYARLI GÖRÜ İLE DİJİTAL ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME SİSTEMİ: REBA, RULA VE OWAS UYGULAMASI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(06/07/2023).

Anıl Özkan GEÇİCİ

Anne ve babama

TEŞEKKÜR

Hayatımın her döneminde, maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen, her zaman yanımda olan annem Zehra GEÇİCİ ve babam Ruhi GEÇİCİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kıymetli deneyimleri ve tecrübeleriyle yüksek lisans eğitimim süresince, her konuda sabırla bilgi ve desteğini aktarmaktan geri durmayan ve tezimin hazırlanmasında cesaretlendiren, araştırmanın ön planından tezin yazılmasına dek tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, ve büyük bir sabır ve titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Alper KİRAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Anıl Özkan GEÇİCİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. KİSR ile İlgili Bazı İstatistik Bilgiler.....	5
2.2. ERD Alanında Çalışmalar	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. REBA Yöntem Akışı.....	11
3.2. RULA Yöntem Akışı	18
3.3. OWAS Yöntem Akışı.....	24
3.4. Bilgisayarlı Görü Modelinin Sisteme Entegre Edilmesi	27
3.5. Vücut Eklem Açılarının Ölçülmesi	31
3.6. Sakarya Faaliyet Gösteren Bir Firmada Örnek Uygulama.....	34
4. MODELİN DOĞRULANMASI	39
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ.....	55

KISALTMALAR

ACT-R	: Adaptive Control of Thought—Rational
CNN	: Convolutional Neural Network
COCO	: Common Objects in Context
EMG	: Elektromyografi
ERD	: Ergonomik Risk Değerlendirme
IOT	: İnternet Of Things
KİSR	: Kas ve İskelet Rahatsızlıkları
MAD	: Mean Absolute Deviation
MPII	: Max Planck Institut Informatik
MSE	: Mean Squared Error
NMS	: Non Max Supression
OKS	: Object Keypoint Similarity
OWAS	: Ovako Working Posture Analyzing System
QEC	: Quick Exposure Check
RCNN	: Region-based Convolutional Neural Network
REBA	: Rapid Entire Body Assessment ok
RMSE	: Root Mean Squared Error
RULA	: Rapid Upper Limb Assessment ok

SİMGELER

d	: Öklid uzaklığı
σ	: Sigma değeri
L	: Uzaklık
x	: Yatay eksen
y	: Düşey eksen

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Yapay zekâ destekli ERD analizi sağlayan çalışmalar.	8
Tablo 3.1. REBA Boyun Puanı Tablosu [32].	12
Tablo 3.2. REBA Gövde Puanı Tablosu [32].	12
Tablo 3.3. REBA Bacak Puan Tablosu [32].	13
Tablo 3.4. REBA Tablo A Skor Tablosu [32].	13
Tablo 3.5. REBA Üst Kol Puan Tablosu [32].	14
Tablo 3.6. REBA Alt Kol Puan Tablosu.	15
Tablo 3.7. REBA Bilek Puan Tablosu [32].	16
Tablo 3.8. REBA Kol Tutuşu Puan Tablosu [32].	16
Tablo 3.9. REBA B Skoru Skor Tablosu [32].	16
Tablo 3.10. REBA C Skoru Skor Tablosu [32].	17
Tablo 3.11. REBA Aktivite Skoru [32].	17
Tablo 3.12. REBA Final Skoru [32].	18
Tablo 3.13. RULA Üst Kol Puan Tablosu [35].	19
Tablo 3.14. RULA Alt Kol Puan Tablosu [35].	20
Tablo 3.15. RULA Bilek Puan Tablosu [35].	20
Tablo 3.16. RULA Bilek Bükülmesi Puanı Tablosu [35].	21
Tablo 3.17. RULA A Puanı Skor Tablosu [35].	21
Tablo 3.18. RULA Boyun Bükülmesi Puanı Tablosu [35].	22
Tablo 3.19. RULA Bel Puanı Tablosu [35].	23
Tablo 3.20. RULA B Skor Tablosu [35].	23
Tablo 3.21. RULA C Skor Tablosu [35].	23
Tablo 3.22. RULA Final Skoru Tablosu [35].	24
Tablo 3.22. OWAS Skor Tablosu [37].	26
Tablo 3.23. OWAS Eylem Planı Tablosu [37].	26
Tablo 3.24. COCO veri setinde yer alan vücut noktaları açıklamaları [43].	29
Tablo 3.25. Yük kaldırma işlemi REBA Skor Sonucu.	36
Tablo 3.26. Yük kaldırma işlemi RULA Skor Sonucu	37
Tablo 3.27. Yük kaldırma işlemi OWAS Skor Sonucu.	38
Tablo 4.1. İşçi fotoğrafında baş ve omuz bölgesine ait analiz koordinatları.	41
Tablo 4.2. İşçi fotoğrafında gövde ve bacaklara ait algılama koordinatları.	41
Tablo 4.3. Algoritma Skorunun Gözlemci ve Algoritma Bazında Karşılaştırılması	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Güney Kore'de endüstriyel kaza istatistikleri eğilimi: İşle ilgili hastalıklar ve Kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları [12]	6
Şekil 3.1. REBA Boyun Puanı [32]	11
Şekil 3.2. REBA Gövde Puanı [32]	12
Şekil 3.3. REBA Bacak Puanı [32]	13
Şekil 3.4. REBA Üst Kol Puanı [32]	14
Şekil 3.5. REBA Alt Kol Puanı [32]	15
Şekil 3.6. REBA Bilek Puanı [32]	15
Şekil 3.7. REBA Skor Hesaplama Akışı [33]	18
Şekil 3.8. RULA Üst Kol Puanı [35]	19
Şekil 3.9. RULA Alt Kol Puanı [35]	20
Şekil 3.10. RULA Bilek Puanı [35]	20
Şekil 3.11. RULA Boyun Bükülmesi Puanı [35]	22
Şekil 3.12. RULA Gövde Puanı [35]	22
Şekil 3.13. RULA Süreç Akış Şeması [33]	24
Şekil 3.14. Platform süreç akışı	27
Şekil 3.15. Platform yazılım akışı	28
Şekil 3.16. Analiz algoritması ile elde edilmiş poz algılama örneği	31
Şekil 3.17. Kosinüs teoremi ile omuz açısı	32
Şekil 3.18. Omuz kalkmış mı sorusunda kullanılan oran noktaları	33
Şekil 3.19. Sistemde elde edilen koordinatlardan bulunan açılar dağılımı	34
Şekil 3.20. Yük kaldırma işlemi esnasında işçinin ön ve yan görüntüsü	35
Şekil 3.21. Boyun açısında koordinatların fotoğraf üzerinde yerleştirilmesi (Baz alınacak yatay eksen-kırmızı kesikli, boyun eğimi-mavi doğru)	35
Şekil 4.1. MPIO görsel veri seti örneği [46]	39
Şekil 4.2. OKS testi için kullanılan işçi fotoğrafı [46]	40
Şekil 4.3. ErgoFellow yazılımı manuel açı hesaplama aracı	43
Şekil 4.4. Eklem açıları RMSE değeri (Derece cinsi)	44

BİLGİSAYARLI GÖRÜ İLE DİJİTAL ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME SİSTEMİ: REBA, RULA VE OWAS UYGULAMASI

ÖZET

Çalışma ortamında kas-iskelet sistemi bozuklukları işle ilgili en yaygın hastalıklar arasındadır. Genel olarak, Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıkları (KİSR) tek bir neden ve sonuca bağlı olmamaktadır. Tersine, fiziksel, biyomekanik, psiko-sosyal ve bireysel risk faktörleri ile ortak bir şekilde meydana gelmektedir. KİSR genellikle hızlıca etki göstermemektedir. Ancak uzun vadede KİSR bağlantılı hastalıklar birkaç belirgin şikâyet ile ortaya çıkmaktadır. Sırt ve boyun ağrıları en sık görülen belirtiler arasındadır. Kas yaralanmaları, yorucu veya tekrarlayan faaliyetlerden kaynaklanabilmektedir. Fiziksel olarak zorlu çalışma koşullarının yanı sıra psikososyal stres de vücuttaki gerilimin nedeni olabilmektedir.

İnsanların yaşadıkları tüm sağlık problemlerine ek olarak, iş kazaları ve işle ilgili hastalıklar, şirketler ve bir bütün olarak ekonomi için hem doğrudan hem de dolaylı maliyetlere neden olmaktadır. Uygunsuz duruş, tekrarlayan hareketler ve tek yönde ağırlık baskısı gibi etkenlerle oluşan rahatsızlıklar, çalışanlar için sağlıklı yaşam yıllarının kaybı gibi ise uzun vadeli ve dolaylı maliyetleri oluşturmaktadır. Uzun vadede KİSR, çalışanlarda kalıcı rahatsızlıklar, felç veya kısmi ve tam işgörmezlik riskini beraberinde getirmektedir.

Çalışmanın amacı, iş yerlerinde ergonomik risk değerlendirmelerini (ERD) web tabanlı, fotoğraf ve videolar üzerinden çalışan ERD analizi yaparak KİSR rahatsızlıklarına erken aşamada önlem alınmasını ve doğru analiz yapılmasını sağlamaktır. Çalışmada, bir web platformu üzerinde bilgisayarlı görüş destekli ergonomik risk değerlendirme yazılımı yapılandırılmış ve kullanıcı arayüzü ile çalışma sahasında kullanılması sağlanmıştır. Web platformu, kullanıcı tarafından yüklenen fotoğraflar ile Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (Rapid Entire Body Assessment-REBA), Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (Rapid Upper Limb Assessment-RULA) ve Ovako Çalışma Duruş Analiz Sistemi (Ovako Work Posture Analysis System-OWAS) metotları için aynı anda sonuç hesaplayıp çıktı üretebilmektedir. Çalışmada makine öğrenmesi ve bilgisayarlı görüş tabanlı kullanılmıştır. Poz tahmini aşaması için MediaPipe kütüphanesinde poz tahmini teknolojisi ile vücut açılarının analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapay zekâ modeli olarak

Önerilen platformun validasyonu amacıyla, poz tahmini algoritmalarında kullanılan Anahtar Nokta Benzerliği (Object Keypoint Similarity-OKS) testi uygulanmıştır. Test, 32 vücut anahtar noktasının her birine uygulanmış ve genel ortalamada %92 doğruluk oranı elde edilmiştir. Diğer test sürecinde ise ERD metotlarında kullanılmak üzere ölçülen vücut eklem açılarının doğruluğu hesaplanmıştır. Program tarafından ölçülen 32 vücut eklemi açısının her biri gerçek olarak baz alınan açılarla karşılaştırılmış ve ortalamada 7,7°'lik Kök Ortalama Karese Hata (Root Mean Squared Error-RMSE)

değeri elde edilmiştir. Elde edilen RMSE değeri ve OKS sonucu güncel literatür ile kıyaslandığında değerlerin tutarlı olduğu belirlenmiştir.

Çalışmada ergonomik risk değerlendirmeye uygulamalarının testi yapılmıştır. RMSE değeri 0,52 ve sonucu %95 olarak ölçülmüştür. Tutarlılık seviyesinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada, nesne algılama ve sınıflandırma problemlerinin çözümünde etkili bir yöntem olarak göze çarpan Bölgesel Evrişimli Sinir Ağı (Region-based Convolutional Neural Network-RCNN) algoritması benimsenmiştir. RCNN, görüntü içerisindeki önceden belirlenmiş bölgelerin (region proposals) özel bir evrişim sinir ağı mimarisi aracılığıyla dikkate alındığı ve bu bölgelerin sonrasında ayrı ayrı işlendiği inovatif bir yaklaşımdır. Algoritmanın başarımı, nesnelerin tespiti ve doğru sınıflandırılmasında gösterdiği yüksek hassasiyet ve doğrulukla kanıtlanmıştır. RCNN yöntemi kapsamlı bir şekilde değerlendirilerek, çeşitli görsel veri setleri üzerindeki performansı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, RCNN'in nesne algılama alanında önemli bir çözüm olarak değerlendirilmesini destekleyici niteliktedir.

DIGITAL ERGONOMIC RISK ASSESSMENT SYSTEM WITH COMPUTERIZED VISION: REBA, RULA AND OWAS APPLICATION

SUMMARY

Musculoskeletal disorders (MSD) are among the most common work-related illnesses. Most work-related MSDs develop over a long period of time. In general, MSD does not develop due to a single cause and result. Instead, it occurs in association with various risk factors. These are physical, biomechanical, psycho-social and individual factors. Physical and biomechanical risk factors can be listed as bending and turning the trunk, especially during the carrying of loads, repetitive or difficult movements, awkward and static postures, and sitting or standing in the same position for a long time. MSD usually does not occur quickly or show no effect. However, in the long term, MSD-related diseases emerge with few obvious complaints. Back and neck pain are among the most common symptoms. Muscle injuries can result from strenuous or repetitive activities. Joint diseases can occur as a result of wear and tear. In addition to physically demanding working conditions, psychosocial stress can also be the cause of tension in the body. Often the psychological link to the complaints is not clear. Health-impairing factors have an indirect effect on the musculoskeletal system through stress. Work-related stress often occurs in combination.

In addition to all the health problems people experience, occupational accidents and work-related diseases cause both direct and indirect costs for companies, those affected, and the economy as a whole. Direct costs account for 10% of the total cost burden of work-related diseases. It accrues to those who pay for the health system in the form of treatments and compensation payments immediately after diagnosis. Determining the total costs of work-related accidents and illnesses takes a holistic approach and includes both long-term and indirect costs, such as loss of healthy life years for employees. Employees are exposed to long-term damage to their health as a result of work accidents or diseases that reduce their lifetime quality of life.

Taking timely and necessary measures for MSD provides a significant benefit in the fight against permanent ailments. One of these measures is to determine the ergonomic risks in the working environment and to take precautions accordingly. By identifying and assessing ergonomic hazards, employers can take steps to reduce the risk of MSD and improve overall employee well-being. There are many ergonomic risk assessment (ERA) methods available, from simple checklists to more complex assessments with detailed measurements and detailed reporting analysis. Regardless of the method used, the aim is to identify potential hazards in all of them and take action to reduce them. However, the common problems of these methods are that when applied manually, they take a long time, they are challenging, and they can create inconsistency because they contain relative situations that can vary from expert to expert.

In this study, the Ergonomic risk assessment process was structured on the web platform and used by an expert in the work area with the user interface. The web

platform can calculate results and produce output, Rapid Entire Body Assessment (REBA), Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Ovako Work Posture Analysis System (OWAS) REBA, RULA and OWAS methods with the photos uploaded by the user at the same time. REBA evaluates the ergonomic risk on the whole body extremity, RULA on the upper body subject, OWAS evaluates the general working moment. Machine learning and computer vision bases were used in the study. On the server side, analysis of body angles was performed with pose estimation technology in the MediaPipe library.

In the study, Pose Estimation, which is one of the artificial neural network techniques, was chosen. Body posture estimation is the process of determining the position and orientation of objects or individuals in an image or video. It is a critical aspect of computer vision and is used in a wide variety of applications, including augmented reality, robotics, human-computer interaction and sports analysis. Model-based body posture estimation is a technique for determining the position and orientation of objects or people in an image or video by comparing the observed 2D image with a predefined 3D model of the object or person. This approach is based on computer vision and geometry and is widely used in a variety of applications such as augmented reality, robotics and human-computer interaction. The first step is to identify key points in the 2D image, such as joints in the human body or the corners of an object. These key points serve as landmarks to align the 2D image and 3D model. The next step is to align the 3D model with the 2D image. This is usually done with a model in which the 3D coordinates of the key points and their corresponding 2D image coordinates are used to calculate the pose of the object or person in the image.

The body coordinates obtained in the system algorithm are passed through a series of calculations. These obtained data are transferred to the common detection result pool as in Figure 1. After the pool, ERA methods proceed by taking the necessary angles or questions from here. In this way, after a single calculation operation, a common flow is performed for all three methods. Time and resource savings are achieved. ERA methods generally require a 3D view of the person. For this reason, the system considers the results obtained from the side and front visual inputs separately. In Figure 1, the cosine and right triangle theorems have been applied to the results obtained with the side view of the staff. Body angles were obtained entirely from the side view. The choice of which method will be found with which angle measurement has been made by testing with real life measurements. For example, the cosine theorem is used for leg angle.

MediaPipe offers a number of pre-trained models for specific tasks, including face recognition, hand tracking, and pose estimation. This can offer time and labor savings compared to zero training models. The model is compatible with a variety of platforms including mobile devices, web browsers and desktop computers. This simplifies the deployment of models in different environments and devices and allows simultaneous access from many platforms. It allows users to create pipelines that combine different pre-processing, inference, and post-processing components, making it easy to experiment with different architectures and configurations. MediaPipe is optimized for on-device rendering; This means that models can be run directly on a user's device without the need for cloud-based processing. In other words, user can use Mediapipe without internet connection and powerful hardware.

As the artificial intelligence model, Tensorflow's pose estimation model was used and it was ensured that they could work asynchronously on the server side. Max-Planck-Institut für Informatik (MPII) Multi-person human posture dataset was used for the test of the study. The speed, accuracy and stability tests of the system were carried out with 1586 photographs of the workers at the work sites. The accuracy of the analysis was tested with a statistical tool called Object Key Point Similarity. The human coordinates given in the MPII data set in the 1586 photographs given as input to the platform were accepted as true and compared with the analysis results obtained from the web platform used in the study. Object Key Point Similarity test was used for comparison. For the validation of the proposed platform, the Object Keypoint Similarity (OKS) test, which is used in pose estimation algorithms, was applied. The test was applied to each of the 32 body key points, with an overall average accuracy of 92%. In the other test process, the accuracy of the measured body joint angles was calculated to be used in ERA methods. Each of the 13 body joint angles was compared with the actual baseline angles and an average Root Mean Square Error (RMSE) of 7.7° was obtained. When the RMSE value and OKS result obtained were compared with the current literature, it was determined that the values were consistent.

In the study, ergonomic risk assessment applications were tested. The RMSE value was 0.52 and the result was 95%. It was determined that the level of consistency was high.

In this study, the Region-based Convolutional Neural Network (RCNN) algorithm, which has proven to be an effective approach for solving object detection and classification problems, was employed. RCNN adopts an innovative methodology where pre-determined regions of interest (region proposals) within an image are selectively considered and subsequently processed separately through a specialized convolutional neural network architecture. The algorithm's performance has been validated by demonstrating high precision and accuracy in object detection and proper classification. This paper comprehensively evaluates the RCNN method, thoroughly examining its performance on various visual datasets. The obtained results underscore RCNN's significance as a prominent solution in the field of object detection.

1. GİRİŞ

Otomasyon ve Endüstri 4.0 çözümlerinin getirdiği muazzam fırsatlara ve ilerlemelere rağmen, endüstriyel ortamlarda hala önemli miktarda el emeği gerçekleştirilir. Bunun nedeni, bu ortamlardaki birçok görev ve etkinliğin, teknoloji yoluyla taklit edilmesi imkânsız değilse bile inanılmaz derecede zor olan benzersiz insan bilişsel ve fiziksel becerileri gerektirmesidir [1]. Bu, özellikle yüksek düzeyde insan becerisi, yaratıcılık ve problem çözme becerileri gerektiren daha karmaşık ve nicelikli görevler için geçerlidir. Manuel işlemlerde, çalışma ortamlarının ve koşullarının yetersiz ergonomisi de bir diğer önemli faktördür. Kas-iskelet bozuklukları, tekrarlayan zorlanmalar ve çalışanlar için diğer fiziksel yorgunluk türleri dahil olmak üzere işle ilgili önemli sayıda sağlık sorununa yol açabilir. Söz konusu sağlık sorunları, kötü duruş, tekrarlayan hareketler, yetersiz ekipman ve araç tasarımı ve ergonomiye gereken önemin verilmemesi gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilmektedir. İyi bir çalışma duruşu, baş ve gövde, kol ve bacakların yapılacak olan işe göre uygun şekilde hizalanması olarak tanımlanmaktadır [2].

Soe ve ark. [3] tarafından yayınlanan bir çalışmada, Hindistan'daki imalat sanayilerinde çalışanlar arasında kas-iskelet bozukluklarının yaygınlığını araştırılmıştır. Kötü çalışma duruşları, tekrarlayan hareketler ve uzun süre ayakta durmanın temel risk faktörleri olarak tanımlanmasıyla birlikte, yetersiz ergonominin bu bozuklukların yüksek oranlarına önemli derecede etkisi olduğunu belirtilmiştir. Üretim sanayilerinde yapılan incelemede, işle ilgili kas-iskelet sistemi bozukluklarının görülme sıklığını azaltmada çeşitli ergonomik müdahalelerin etkinliği incelenmiştir. Kim ve ark. [4] tarafından yayınlanan bir çalışmada işyerinin yeniden tasarlanması, ekipman tasarımı ve ergonomik eğitim gibi ergonomik müdahalelerin bu bozuklukların riskini azaltmada etkili olabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, bu müdahalelerin etkisini tam olarak anlamak ve işle ilgili kas-iskelet bozukluklarını önlemek için daha etkili stratejiler geliştirmek üzere daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu ifade edilmiştir.

Söz konusu iskelet ve kas sistemi rahatsızlıklarının erken evrelerde önlenmesi uluslararası çalışma sahalarınınca kabul edilmiş REBA, RULA OWAS gibi ergonomik duruş ve kuralları içeren ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ile mümkündür. Bu yöntemlerde personelin ilgili çalışma duruşunun fotoğrafı üzerinde açölçer ve cetveller yardımıyla açılar hesaplanır, kâğıt formlara doldurulur ve risk puanına göre duruşlara edilmesi gereken müdahaleler gözlenir. Her işçi için bu sürecin elle yürütülmesi hem zaman kaybı hem de işlem hatası ihtimali açısından işverenlere uygulamada zorluk çıkarabilmektedir.

Bu kapsamda özellikle yapay zekâ teknolojileri sayesinde ergonomik risk değerlendirme yöntemlerini daha hızlı uygulayarak sonuç alınması konusunda yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Genel olarak bu teknolojilerle geliştirilmiş yazılımlar, sadece açları hesaplayan ancak, el büküldü mü, omuz kaldırıldı mı, kol destek alıyor mu gibi soruları kullanıcılara manuel yönelten uygulamalardır. Ayrıca bu yazılımlar yüklendiği cihazlarda yüksek özellikli donanım gerektirmektedir ve analiz süreleri uzundur. Bu çalışmada bulut tabanlı, her cihazdan erişilebilen, REBA, RULA ve OWAS metotları için aynı anda ve çok kısa sürede analiz raporu sunabilen web tabanlı bir platform geliştirilmiştir. Geliştirilen platformda işçiye ait fotoğrafın algılama sınıfı ile analiz edilmesi sayesinde benzer amaçlı yazılımlarda kullanıcıların manuel olarak cevaplandırması gereken (el, kol, omuz, boyun, bel, bacak) durumların da çıkarımı yapabilmektedir. Geliştirilen çalışma bu yönleriyle özgünlüğünü ortaya koymuştur.

Yapılan çalışmanın amacı, iş gücünün yoğun olarak kullanıldığı tüm sektörlerde faaliyet gösteren firmaların çalışanlarına ait potansiyel ergonomik risklerini belirlemek ve oluşabilecek muhtemel meslek hastalıklarının önceden ve hızlı bir şekilde önüne geçmektir. Kullanıcıların bu uygulama ile ergonomik açıdan risk barındıran işleri tespit etmeleri sayesinde iyileştirme potansiyeli olan alanlar hakkında fikir sahibi olması sağlanacaktır. Geliştirilen uygulamanın işletmenin daha çok hangi departmanlarında ergonomik risk barındıran işler yapıldığı ve ne tür işlerde süreç iyileştirme (Kaizen), metot etüdü çalışmalarının yapılması gerektiği konusunda da işletme verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından yöneticilerin karar sürecine olumlu katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Çalışmanın testi için MPII Çok kişili insan duruş veri seti kullanılmıştır. Veri setinde buluna iş sahalarında yer alan işçilere ait 1586 fotoğraf ile sistemin hız, doğruluk ve stabilite testleri yapılmıştır. Analizin gerçeğe uygunluğunun testi OKS isimli bir istatistiksel araç ile sağlanmıştır. Bu araç ile nesne algılama uygulamalarında algılanan nesnenin koordinatlarının gerçeğe ne ölçüde yakın olduğunun karşılaştırması sağlanmaktadır. Test hesaplaması sonucunda %92.2 algılama yüzdesi elde edilmiş ve benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre algılama doğruluğunun yüksek olduğu gözlenmiştir. İkinci test aşamasında ise ERD metotlarında kullanılmak üzere ölçülen vücut eklem açılarının doğruluğu hesaplanmıştır. 13 vücut eklemi açısının her biri gerçek olarak baz alınan açılarla karşılaştırılmış ve ortalamada 7,7°'lik RMSE (kök ortalama karesel hata) değeri elde edilmiştir. Elde edilen RMSE değeri ve OKS sonucu güncel literatür ile kıyaslandığında ERD sisteminin tutarlı olduğu görülmektedir. Çalışmanın ikinci bölümünde literatür araştırması, üçüncü bölümünde REBA, RULA, OWAS metotlarının ve makine öğrenimi algoritmasının detaylı anlatımı, son bölümde ise istatistiksel test ve sonuç aşamaları yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. KİSR ile İlgili Bazı İstatistiksel Bilgiler

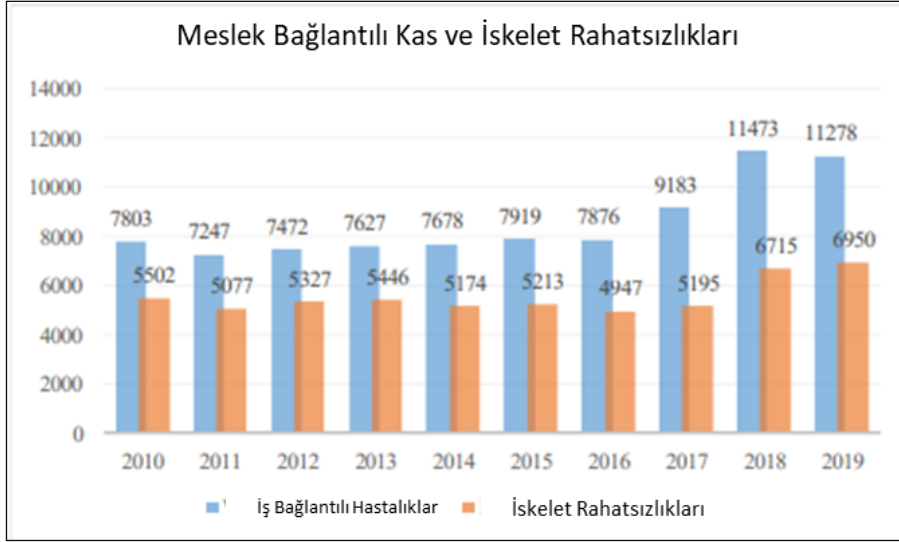
Birçok meslek grubuna ait özellikle emek yoğun çalışan işçiler uzun süreli omurga , boyun , el , kol , bacak vb. kas iskelet sistemi rahatsızlıkları gibi riskler altındadır. Bu durum ilk başta ihmal edilebilir gibi görünse de sürekli buna maruz kalınması durumunda çalışanlar, işverenler ve ekonomi açısından ağır sonuçlar doğurabilmektedir. Yapılan araştırmalarda, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, uygunsuz duruş bağlantılı KİSR'nın, en yaygın iş sağlığı sorunlarından biri olduğu tespit edilmiştir [5].

İnşaat işçileri, işlerinin fiziksel olarak zorlu doğası nedeniyle kas ve iskelet bozuklukları riski altındadır. Çalışma İstatistikleri Bürosu'na göre, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki inşaat işçileri arasında işle ilgili tüm yaralanmaların ve hastalıkların %34'ünü kas-iskelet sistemi bozuklukları oluşturmaktadır [6]. Yine İş bağlantılı KİSR, Amerika Birleşik Devletleri'nde işten günlerce uzaklaşmayı gerektiren hastalıkların %33'ünü oluşturur [7]. Sağlık çalışanları da işlerinin aktiviteler içermesi nedeniyle aynı risk altındadır. Amerika Hemşireler Birliği'nin yaptığı bir ankete göre, hemşirelerin ve yardımcılarının %56'e kadarı bel, boyun ve omuzlarında kas-iskelet ağrısı yaşadığı bilinmektedir [8].

Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları dünya çapında engelli olma durumuna sebep olan ikinci rahatsızlıktır ve küresel nüfus yaşlandıkça artacağı tahmin edilmektedir. 2017-2018 döneminde, üst ekstremiter veya boyun bozuklukları kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının yaklaşık %42'sini oluşturmuş ve bunların içinde dirsek hastalıkları en yaygın olanıdır [9].

2020-2021 yıllarında Büyük Britanya'da yaklaşık 470.000 işçi KİSR nedenli hastalıklardan etkilenmiş, tüm işçilerin yaklaşık %28'i boyun ve bel bölgelerinde rahatsızlık yaşamışlardır [10]. 2021 yılında Hindistan'da dış sağlığı uzmanları arasında yapılan bir çalışmada 203 katılımcının %58,6'sının uygun olmayan duruş ve ergonomik olmayan çalışma koşulları sebebiyle acı çektiği belirlenmiştir [11].

Kore İş Sağlığı ve Güvenliği Kurumu'na göre, Güney Kore'de Eylül 2019 itibariyle işle ilgili tüm hastalıkların (11278 kişi) %61,7'si kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarından oluşmaktadır (6950 kişi) ve eğilim son 4 yılda artmaktadır [12]. Şekil 2.1'de bu istatistiğin geriye dönük verisi görülebilmektedir.



Şekil 2.1. Güney Kore'de endüstriyel kaza istatistikleri eğilimi: İşle ilgili hastalıklar ve Kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları [12]

Avrupa Birliği'nde Kas ve iskelet rahatsızlıkları, işle ilgili hastalıkların %50'sinden fazlasını içermekte ve iş sağlığı ve güvenliği sorunlarından kaynaklanan tüm ekonomik kayıpların %40'ından fazlasından sorumlu olmaktadır [13].

Tahmini olarak 285.240 özel sektör çalışanı, 2019'da ölümcül olmayan bir işyeri yaralanması veya hastalığının ardından bir acil serviste tedavi edilmiş ve işten günlerce uzak kalmayla sonuçlanan tüm özel sektör olaylarının yüzde 32,1'ini oluşturmuştur. Aynı seviyede düşme (56.530 vaka), bir nesnenin çarpması (54.090 vaka) veya ergonomik yaralanma olarak da bilinen kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları (47.280 vaka) nedeniyle yaralanan veya hastalanan işçiler, acil servis ziyaretlerinin toplam yüzde 55,4'ünü oluşturmuştur [14].

2016'daki ankette, ankete katılan bilgisayar çalışanlarının %38'inde ve %41'inde sırasıyla üst sırt ve boyun yorgunluğu bulgusu tespit edilmiştir [15]. Demir işçileri arasında, (%19) tendinit, (%18) omurilik rüptürü, (%15) omuz bursiti ve (%12) karpal tünel sendromu dahil olmak üzere birçok yaygın kas ve iskelet rahatsızlığının mevcut

olduğu görülmüştür [16]. Mesleki Yaralanmalar ve Hastalıklar Araştırması isimli çalışmaya göre, inşaat işçilerinin %41,7'sinde sırt yaralanması, %12,4'ünde diz yaralanması ve %45,6'sında artrit olduğu tespit edilmiştir [17].

Türkiye'de Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim ve Araştırma Merkezinin yayınladığı rapora göre KİSR, meslek hastalıkları içerisinde meydana gelme sıklığı ile 3.sırada yer almaktadır [18]. Türkiye İstatistik Kurumu'nun verilerine göre, 2018 içerisinde KİSR bağlantılı ölümler, tüm ölüm sebepleri içerisinde 14.sırada yer almıştır [19]. Sosyal Güvenlik Kurumu verilerine göre 2020 yılında, 908 kişinin meslek hastalığının olduğu tespit edilmiştir [20].

Bu yüksek oranlar kişilerin maruz kaldığı ergonomik risklerin doğurabileceği sonuçlar ve yapılan işlerin verimsizliği konusunda önemli fikirler vermektedir.

2.2. ERD Alanında Çalışmalar

Literatür incelendiğinde ERD yöntemlerinin hem manuel ölçümlerle çeşitli iş ve işletmelerde uygulandığı , hem de yapay zeka teknikleri ile entegrasyonu yapılarak geliştirilmiş uygulamaların yer aldığı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar şu şekilde sınıflandırılabilir:

- i. Öz değerlendirme: Çalışanların kendilerini özel olarak değerlendirmeleri için tasarlanmış formlar.
- ii. İnsan gözlemi: Nitelikli bir personelin gözlemlerle öznel veri toplayarak sahadaki işçilerin vücut-eklem açılarının tahminini yaptığı ve/veya çevrim dışı video analizleri
- iii. Doğrudan ölçümler: Ergonomik analiz için otomatik olarak veri toplamak üzere bir çalışanın vücuduna antropometrik alet ve cihazların takıldığı doğrudan ölçümler
- iv. Bilgisayar tabanlı değerlendirme: Sistemik ve nesnel model tabanlı ergonomik ölçümler sağlamak amacıyla insan vücudu modellerinin bilgisayarla görme uygulamalarıyla otomatik olarak tahmin edildiği ölçüm ve analizler.

Yapay zeka ve bilişim teknolojilerinin de son yıllarda hızla ilerlemesi ile bilgisayar tabanlı değerlendirmeler yaygınlaşmıştır. Bu kapsamda literatürde son 3 yılda yapılan bilgisayar tabanlı ERD çalışmaları Tablo 2.1’de sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Yapay zekâ destekli ERD analizi sağlayan çalışmalar.

Yazar	Yıl	ERD Yöntemi	Donanım	Çalışma Alanı	Kullanılan Teknoloji	Pratikte uygulandı mı?
El-mir ve Ivarsson	2020	Vektör Açık Hesabı	Kamera	Ofis	Unity3d, NuiTrack	Hayır
Santos ve ark.	2019	AdRULA	Jiroskop, Manyetometre ve İvmeölçer	Yük indirme sahası	QCF, Vicon	Evet
Massiris Fernández ve ark.	2020	RULA	RGB Kamera	-	Bilgisayarlı Görü, CNN	Hayır
Wu ve ark.	2020	REBA	Akıllı telefon, Kamera	Fabrika sahası	Mask RCNN	Evet
Oyekan ve ark.	2021	Yapay zeka ile uyarlanabilir işlevlerin bilişsel kontrolü (ACT-R)	Kaslar üzerinde giyilebilir sensör	Uçak kanadı montaj hattı	Kas EMG sinyali toplama ve desen tanıma	Evet
Seo ve Lee	2021	POTxA, OWAS	Microsoft Kinect, kamera	İnşaat	Video Hareket Yakalama, Öznitelik Algılama, Postür Kümeleme	Evet
Yunus ve ark.	2021	RULA, REBA, QEC	Microsoft Kinect	-	Video Hareket Yakalama, OpenPose	Hayır
Sancho ve ark.	2021	REBA	Microsoft Kinect	Hastane	MATLAB Image Acquisition Toolbox	Evet
Vukicevic ve ark.	2021	SMPL	-	Lojistik	3D Hareket Algılama, VIBE Algoritması	Evet
Lin ve ark.	2022	REBA, RULA, OWAS	Kamera	-	Nesne Algılama, OpenPose	Hayır
Seo	2022	Biyomekanik simülasyon	Kamera	İnşaat	3D Hareket Algılama, Görüntü Algılama	Evet

El-mir ve Ivarsson ofis ortamında çalışanın oturma pozisyonunu doğrulamak amacıyla kamera ile görüntüler toplanmış, OpenPose ile görüntü algılanıp, unity3d ile açılar hesaplanıp risk durumuna göre değerlendirilmiştir [21].

Santos ve diğerlerinin yaptıkları araştırmada, anatomik eklemlerin açılmal yönelimini tahmin etmek için sensörlere ve kameraya dayanan bir üst vücut hareket izleme algoritması uygulanmış ve sonuçları istatistiksel metotlar ile test etmiştir [22]. MassirisFernández ve ark. [23] çalışmada, RULA ve bilgisayarlı görü algılaması, Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional neural network-CNN) ile ergonomik risk analizi yapmış, açık veri setli görseller ile sonuçları test etmiştir. Wu ve ark. [24] temelde

mobil uygulama ile toplanan görüntünün, sunucuya gönderilip RCNN ile tahmin sonuçlarını elde ederek, REBA ile değerlendirilip sonucun kullanıcıya dönmesini sağlamıştır . Çalışma, kullanılan yöntem, çalışma alanı, metotları bakımından bu teze en yakın araştırmadır. Oyekan ve ark. [25] çalışmada, Düşüncenin Rasyonel Kontrolü (The Adaptive Control of Thought-ACT-R) metodundan yola çıkarak çalışanlara sensör takıp kaslardaki Elektromyografi (EMG) sinyallerini toplanmış, ağırlık ve Postür algılamaları yaparak ise anlık ergonomik analiz yapılması sağlanmıştır . Seo ve Lee inşaat sahalarında bulunan işçilerin çalışma anındaki duruşları Kinect aracılığı ve video işleme tekniği ile izlenmiş, diğer aşamada video karelerine Postür Kümeleme uygulanmış, sonuçta manuel hesaplama göre %89 tahmin doğruluğu elde edilmiştir [26].

Yunus ve ark. [27] araştırmalarında hız, ivme ve kuvvet gibi kinetik ve kinematik değişkenlerle hareket yakalama teknolojilerinin kullanılmasının, ergonomik risk değerlendirmesinde tutarsızlığı önlemeye ve daha güvenilir sonuçlar geliştirmeye yardımcı olup olmadığını araştırmıştır . Sancho ve ark. [28] sağlık sektöründe hemşirelerin çalışma anlarında ergonomik problemlerini incelemek için Kinect ile veriler toplanmış, Matlab Görüntü İşleme Araç Kutusu ile görüntüleri işleyerek ve REBA ile değerlendirilmiştir .

Vukicevic ve ark. [29] Nesnelerin İnterneti (Internet Of Things-IOT) güç sensörleri ile çalışanın uyguladığı basıncı alıp, kamera ile de vücut torsiyonunu ölçerek bunların 3 boyutlu değerlendirmesini yapmıştır. Lin ve ark. [30] yaptıkları çalışmada 15 operasyon videosunu test etmiş ve bu videoları bakım, montaj, temizlik, ofis çalışması ve sürüş dahil olmak üzere altı türde sınıflandırmıştır. Araştırma her alanda hangi ergonomik metodun en kullanışlı olduğunu tespit etmiştir .

Çalışmalar içerisinde kullanıcıya duruma dair manuel soru yöneltmeyen ve ergonomik analiz işlevini tam otomatik olarak yerine getirme yeteneğinin eksikliği fark edilmiştir. Bu çalışmada ise her cihazdan aynı anda erişilebilen, REBA, RULA ve OWAS metotları için çok kısa sürede, grafik arayüzüne sahip analiz raporu sunabilen bir platform geliştirilmiştir. Geliştirilen platformda, işçiye ait fotoğrafın kıyaslama algoritması ile analiz edilmesi sayesinde benzer amaçlı yazılımlarda kullanıcıların manuel olarak cevaplandırması gereken (el, kol, omuz, boyun, bel, bacak) durumların

da çıkarımı yapabilmektedir. Geliştirilen çalışmanın bu yönleriyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

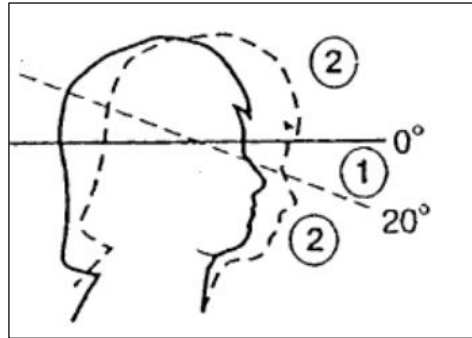
3. MATERYAL VE YÖNTEM

REBA, RULA ve OWAS yöntemleri, belirli bir görevle ilişkili KİSR risklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan ergonomik değerlendirme araçlarıdır. Uygun yöntemin seçilmesi, yapılan işe ve değerlendirmenin amaçlarına bağlıdır.

3.1. REBA Yöntem Akışı

REBA, duruş ve hareketlere dayalı olarak KİSR riskini değerlendirmek için kullanılan hızlı ve basit bir yöntemdir. Tüm vücudun genel bir değerlendirmesini sağlar ve risk seviyesini belirtmek için 1 ila 15 arasında bir puan kullanarak 12 vücut bölgesiyle ilişkili riskin değerlendirilmesini içerir. Skor dağılımı 5 aktivite seviyesinde toplanır. Skor hangi dağılım içerisinde yer alırsa alınan puan buna göre belirlenir. REBA, olası sorunlu alanları hızlı bir şekilde belirlemek için kullanışlıdır [31].

İlk olarak, harekete maruz kalan kişinin bacakları, göğsü ve boynu incelenir. Bunların içerisinde de boyun pozisyonu ile başlanır. Boynun yerden dik olan doğruya açısı ele alındığında, Şekil 3.1 ve Tablo 3.1'de gösterildiği gibi, 0°'den 20°'ye kadar olan duruşlar 1 puan alırken, 20°'den fazla olan boyun hareketleri 2 puan almaktadır.



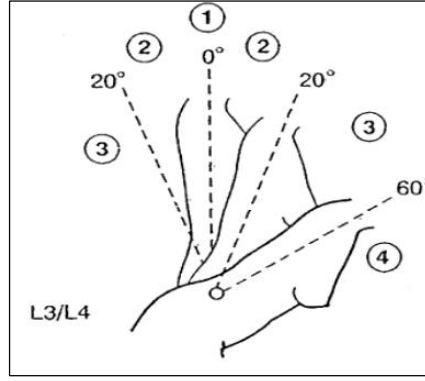
Şekil 3.1. REBA Boyun Puanı [32]

Bu noktalara Tablo 3.1'deki değişim puanında da görüldüğü gibi, boyun kendi eksenini etrafında dönüyorsa bir puan daha eklenir.

Tablo 3.1. REBA Boyun Puanı Tablosu [32].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
0°-20° bükülme	1	Boyunda dönme varsa
>20° bükülme	2	Boyunda yana eğilme varsa +1
Esneme	2	

Gövdenin puanlanmasında, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi yer gelen doğru ile gövdenin aynı doğrultuda olması durumunda 1 puan verilir. Bu doğruya 20° açı yaparak eğildiğinde 2 puan verilir. 20° ile 60° açı yaparak eğilmesi durumunda 3 puan, 60°'den fazla açı yaparak eğilmesi durumunda ise 4 puan verilir [32].



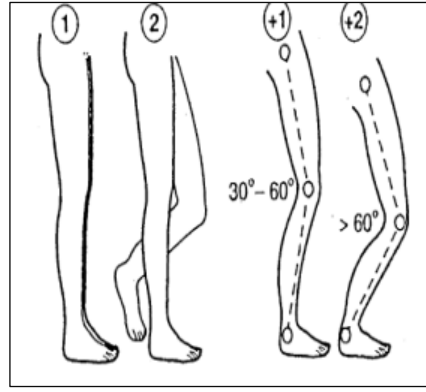
Şekil 3.2. REBA Gövde Puanı [32]

Tablo 3.2'deki gibi eğilme veya dönme olması durumunda, değerlendirmeye +1 puan daha eklenir.

Tablo 3.2. REBA Gövde Puanı Tablosu [32].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
Dik Duruş	1	Gövdede burkulma varsa +1
0°-20° bükülme	2	
0°-20° esneme		
20°-60° bükülme	3	Gövdede eğilme varsa +1
>20° esneme		
>60° bükülme	4	

Şekil 3.3'de gösterildiği gibi bacaklar normal duruşunu sürdürüyorsa, yani her iki ayak yerde ise, 1 puan verilir. Yere tek ayak basıldığında 2 risk puanı atanır.



Şekil 3.3. REBA Bacak Puanı [32]

Tablo 3.3'deki gibi 30°'lik bir hareket dönüşü için bir puan eklenir. 60°'den fazla bir bükülme hareketi için 2 puan eklenir.

Tablo 3.3. REBA Bacak Puan Tablosu [32].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
İki bacak üzerinde dengeli yük	1	Dizler 30°-60° arasında bükülüyorsa +1
Tek bacak üzerinde dengesiz yük	2	Dizler 60° daha fazla bükülüyorsa +2

Bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen puanlar Tablo 3.4 ile eşleştirilerek REBA Duruş Puanı oluşturulur.

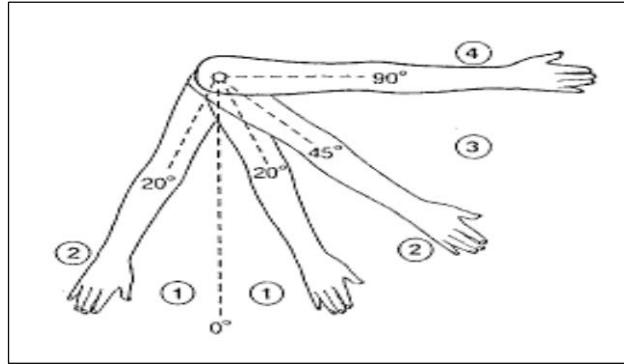
Tablo 3.4. REBA Tablo A Skor Tablosu [32].

Tablo A	Boyun												
	1				2				3				
Gövde	Bacaklar	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	1	1	2	3	4	1	2	3	5	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Sonuç olarak alınan puana bir "Kuvvet/Yük" puanı eklenir ve bu şekilde A puanı elde edilir. Kuvvet/Yük Puanı, çalışanın kaldırdığı yükün ağırlığına göre hesaplanır. Kaldırılan ağırlık 5 kilogramdan küçükse puan verilmez, 5 kilogramdan 10 kilograma

kadar ise 1 puan verilir ve 10 kilogramdan daha büyük bir ağırlık taşındığında 2 puan verilir. Taşınan yükte titreşim veya ani yüke maruz kalma durumu gerçekleşirse bir puan daha verilir.

İkinci aşamada, el bileği ve kol incelenerek B puanı hesaplanmaktadır. Üst kol puanı, B Puanını hesaplamak için öncelikli olarak ele alınır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, kolun gövde ile 0° - 20° açı oluşturması durumunda 1 puan verilir. 20° - 45° açı oluşturması halinde 2 puan, 40° - 45° açı oluştuğunda 3 puan, 90° 'den fazla açı oluşması halinde ise dört puan verilir.



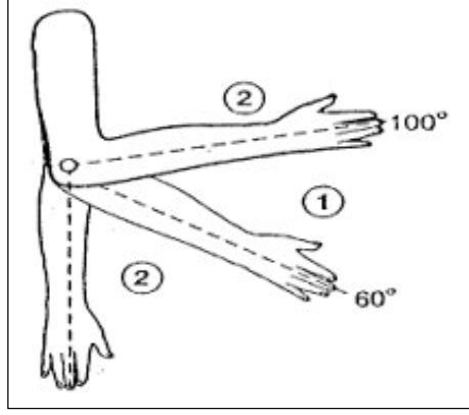
Şekil 3.4. REBA Üst Kol Puanı [32]

Tablo 3.5'te gösterildiği gibi, kolun vücudun arkasına doğru hareket etmesinden doğan bir açı yapıyorsa iki puan eklenir. Ek olarak, hareket sırasında kollar yana doğru açılmışsa veya omuzlar yukarı kaldırılmışsa ise bir puan daha verilmelidir. Bununla birlikte, kollar başka destek alıyorsa bir risk puanı geri kaldırılır.

Tablo 3.5. REBA Üst Kol Puan Tablosu [32].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
0° - 20° bükülme	1	Omuzlar kalkmış +1
0° - 20° esneme		
20° - 45° bükülme	2	Üst kol engellenmiş +1
$>20^{\circ}$ esneme		
45° - 90° bükülme	3	Kollar destekleniyorsa -1
$>90^{\circ}$ bükülme	4	

Alt kol puanlaması yapılırken, üst kol ile alt kol arasındaki açığa bakılır. Bu açı Şekil 3.5'teki gibi 60 ile 100° arasında ise bir puan verilir. 60 dereceden küçük veya 100 dereceden büyük açılarla çalışıldığında ise iki puan verilir (Tablo 3.6).



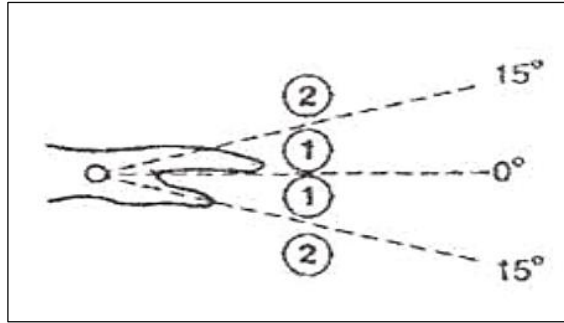
Şekil 3.5. REBA Alt Kol Puanı [32]

Alt kol için Tablo 3.6’da da görülebileceği gibi, ek bir değişim puanı hesaplanmaz.

Tablo 3.6. REBA Alt Kol Puan Tablosu.

Hareket	Puan
60°-100° bükülme	1
<60° bükülme	2
>100° bükülme	

El bileği, Şekil 3.6’da gösterildiği gibi, 15 dereceye kadar yukarı veya aşağı yönlü açı yaparsa 1 puan verilir. 15°’den fazla açı yaparsa 2 puan verilir.



Şekil 3.6. REBA Bilek Puanı [32]

Tablo 3.7’te gösterildiği gibi bilek yana doğru eğilirse 1 puan daha eklenir.

Tablo 3.7. REBA Bilek Puan Tablosu [32].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
0°-15° Bükülme Esne >15° Bükülme >15° esneme	1	Bilekler sağa sola bükülüyorsa +1
	2	Bilekler döndürülüyorsa +1

Tutuş puanı Tablo 3.8'de olduğu gibi verilir. Tutulan cisim kolayca tutulabilirse puan verilmez, tutmak mümkün olsa da vücutla desteklenme gerekiyorsa +2 puan, tutmak mümkün değilse +3 risk puanı verilir.

Tablo 3.8. REBA Kol Tutuşu Puan Tablosu [32].

Durum	Puan
Tutuş kuvveti	0
El tutuşu ideal, ancak vücudun başka bir kısmı ile destekleniyor.	1
El tutuşu zayıf	2
Tutamak yok, elle tutmak veya vücutla tutmak mümkün değil	3

REBA Duruş Puanı Tablosu, üst, alt ve el bileği için duruş puanları hesaplamak için kullanılır. B puanı, Tablo 3.9'de olduğu gibi hesaplanan duruş puanına tutuş puanını ekleyerek elde edilir

Tablo 3.9. REBA B Skoru Skor Tablosu [32].

Tablo B	Alt Kol						
	1			2			
Üst Kol Skoru	Bilek	1	2	3	1	2	3
	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	5
	4	4	5	5	5	6	7
	5	6	7	8	7	8	8
	6	7	8	8	8	9	9

REBA C Tablosunda hesaplanan A değeri ve B değeri kullanılarak Tablo 3.10'daki C değeri bulunur.

Tablo 3.10. REBA C Skoru Skor Tablosu [32].

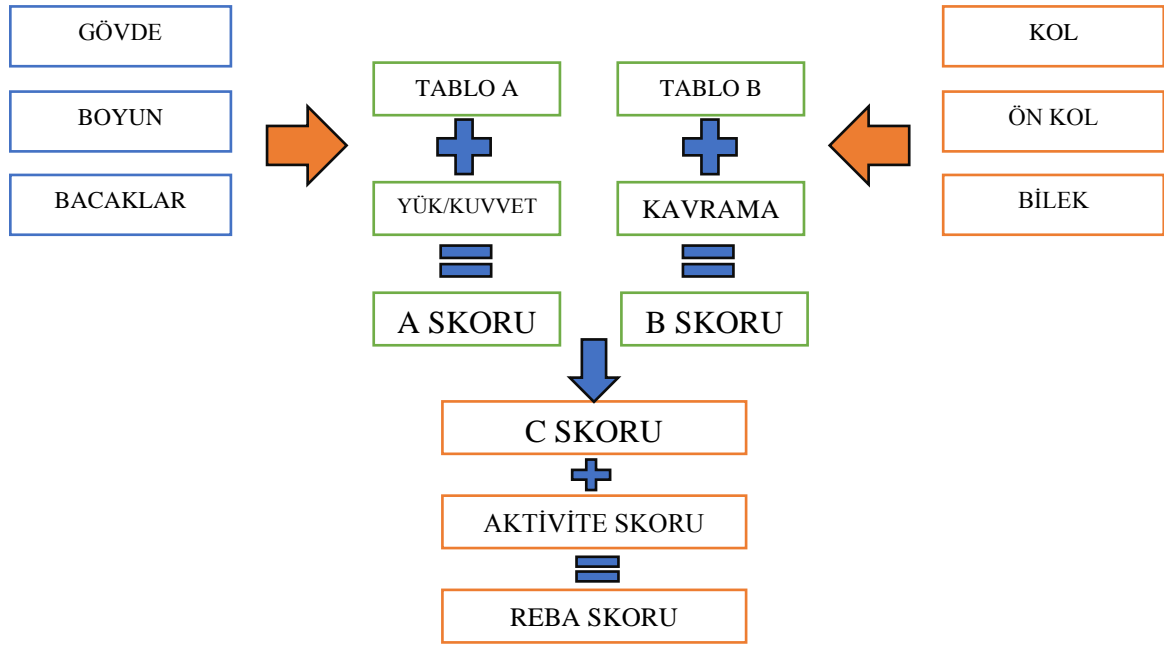
Puan A	Tablo C											
	Puan B											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Final aşamasında REBA puanı, C değerine Tablo 3.11'de yer alan aktivite yoğunluğunun eklenmesiyle bulunur. Bir uzvun 1 dakikadan fazla hareketsiz kalması, yapılan iş dakikada dört kez tekrar ediyorsa veya duruşta hızlı bir değişim varsa, her biri için aktivite yoğunluk puanına ek bir risk puanı eklenir.

Tablo 3.11. REBA Aktivite Skoru [32].

Durum	Puan
Bir dakikadan fazla en az bir vücut uzvunun aynı noktada kalması	1
Dakikada 4 kez tekrarlı iş	1
Duruşta ani değişiklikler	1

Tüm puanlar sırayla eklenerek en sonunda final skoru Şekil 3.8'deki gibi bulunur.



Şekil 3.7. REBA Skor Hesaplama Akışı [33]

Önlem seviyesi ise final skoru baz alınarak Tablo 3.12'deki gibi bulunur.

Tablo 3.12. REBA Final Skoru [32].

Aktivite Seviyesi	REBA Skoru	Risk Seviyesi	Aktivite
0	1	Önemsiz	Gerekli Değil
1	2-3	Düşük	Gerekebilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Çok Kısa Zaman İçinde Gerekli
4	11-15	Çok Yüksek	Hemen Gerekli

3.2. RULA Yöntem Akışı

RULA özellikle boyun, omuzlar, kollar ve eller dahil olmak üzere vücudun üst kısmına odaklanan daha kapsamlı bir araçtır. Bir görevde yer alan duruş ve hareketlerin daha ayrıntılı bir analizini sağlar ve risk düzeyini belirtmek için bir dizi puanlama kuralına dayalı bir puan oluşturur. RULA, çok fazla üst vücut hareketi gerektiren görevler veya

tekrarlayan görevler için kullanışlıdır. Ayrıca vücudun üst kısmında daha fazla dikkat gerektiren belirli problem alanlarını belirlemek için de yararlıdır [34].

RULA, öncelikle üst kolun değerlendirmesini yapmaktadır. Kolun gövde ile yatay eksenindeki açı, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi puanlanır. Kolun eğimi ile 0° ile 20° arasında ise bir puan atanır. 20° ile 45° arasında bir pozisyonda iki puan atanır. 45° ile 90° arasında üç puan atanır. 90°'den daha büyük bir açı yapıldığında dört puan alınır [35].



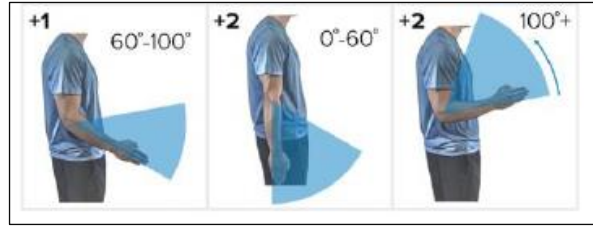
Şekil 3.8. RULA Üst Kol Puanı [35]

Tablo 3.13'de gösterildiği gibi kol geriye doğru 20°'den daha fazla açı yaparsa iki puan kazanır. Ek olarak, hareket sırasında kollar yana doğru açılıyorsa bir puan daha verilmelidir. Bununla birlikte, kollar başka bir yerden destek alıyorsa -1 puan azaltılır.

Tablo 3.13. RULA Üst Kol Puan Tablosu [35].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
0°-20° bükülme	1	Omuzlar kalkmış mı +1,
0°-20° Esneme		Üst kol hareketi zorda mu +1
20°-45° bükülme	2	+1 Kollar destekli ise
>20° esneme		
45°-90° bükülme	3	
>90° bükülme	4	

Alt kol değerlendirmesinde, Şekil 3.9'daki gibi alt kol ve gövde arasındaki aralık 60° ile 100° arasındaysa 1 puan atanır. 60°'den küçük veya 100°'den büyükse 2 puan verilir.



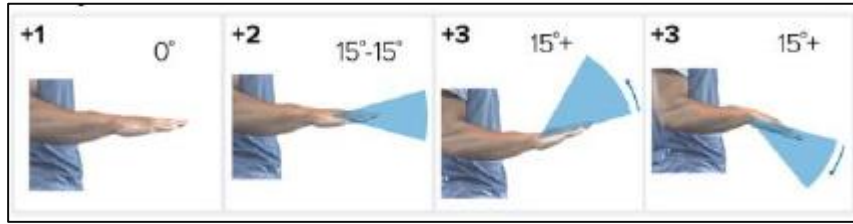
Şekil 3.9. RULA Alt Kol Puanı [35]

Hareket içerisinde kollar yana doğru açıldığında, puanlara bir puan eklenir (Tablo 3.14).

Tablo 3.14. RULA Alt Kol Puan Tablosu [35].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
60°-100°	1	Kollar yana doğru açılmakta +1 puan daha eklenir.
<60° veya >100°	2	

Bileğin puanlanmasında, el ile bileğin aynı çizgide ise veya Şekil 3.10'de gösterildiği gibi 15°'ye kadar açı oluşturması halinde bir puan verilir.



Şekil 3.10. RULA Bilek Puanı [35]

15°'den daha fazla açı yapması durumunda ise 2 puan verilir. Bileğin kola doğru sola veya sağa bükülmesi durumunda, hesaplanan skora bir puan eklenir (Tablo 3.15).

Tablo 3.15. RULA Bilek Puan Tablosu [35].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
0	1	Bilek bükülmüşse +1 puan daha ilave edilir.
<15°	2	
>15°	3	

Bilek puanına ek olarak, RULA’da bilek bükülmesi puanı hesaplanır. Burada bilek 15°’den fazla bükülmüşse 2, az bükülmüşse 1 puanını alır (Tablo 3.16).

Tablo 3.16. RULA Bilek Bükülmesi Puanı Tablosu [35].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
<15°	1	Bilek bükülmüşse +1 puan daha ilave edilir.
>15°	2	

Bilek, bilek bükülmesi ve alt ve üst kola ait skorları Tablo A üzerinde birleştirdiğimizde Tablo 3.17’deki A skoru elde edilir.

Tablo 3.17. RULA A Puanı Skor Tablosu [35].

TABLO A		Bilek								
		1		2		3		4		
		Bilek Bükülmesi								
Alt Kol		1	2	1	2	1	2	1	2	
Üst Kol	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
		2	2	2	2	2	3	3	3	3
		3	2	3	3	3	3	3	4	4
	2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
		2	3	3	3	3	3	4	4	4
		3	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
		2	3	4	4	4	4	4	5	5
		3	4	4	4	4	4	5	5	5
	4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
		2	4	4	4	4	4	5	5	5
		3	4	4	4	5	5	5	6	6
	5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
		2	5	6	6	6	6	7	7	7
		3	6	6	6	7	7	7	7	8
	6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
		2	8	8	8	8	8	9	9	9
		3	9	9	9	9	9	9	9	9

Kol/El Bileği Puanı, Tablo A’dan elde edilen duruş puanına ek olarak kas kullanımı ve "Kuvvet/Yük" skorunu içerir. Kuvvet/Yük skoru hesaplanırken yüklenen yükün ağırlığı dikkate alınır. Kaldırılan ağırlık 2 kilogramdan küçükse puan verilmez; 2 kilogramdan 10 kilograma kadar ise iki puan verilir ve 10 kilogramdan fazla ise üç puan verilir. Üst beden statik haldeyse, yani bir dakikadan fazlaysa veya bir dakikada dört veya daha fazla hareket tekrarlandığında, bir puan eklenmesi gerekir.

A skoru ölçümü tamamlandıktan sonra, gövde, boyun ve bacak analizleri yapılır. Boyun analizi ölçümünde, Şekil 3.11'deki gibi öne doğru 10°'ye kadar eğilme için bir puan, 10°-20°'ye kadarki için 2, 20°'den fazla eğilme için üç puan verilir. Geriye doğru olan eğilmeler için dört puan verilir.



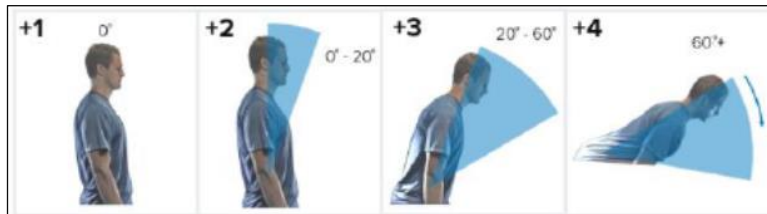
Şekil 3.11. RULA Boyun Bükülmesi Puanı [35]

Bu hareketlerin yanı sıra boynun dönmesi veya eğilmesi halinde Tablo 3.18'deki gibi bir puan eklenir.

Tablo 3.18. RULA Boyun Bükülmesi Puanı Tablosu [35].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
0°-10°	1	Boyunda meydana gelen dönmelerde +1 puan eklenir.
10°-20°	2	Eğilme olduğunda +1 eklenir.
>20°	3	
Arkaya eğilme	4	

Gövde puanı ölçümü yapılırken, yere dik olan doğru ile gövdenin paralel olması, yani gövdenin tamamen dik olması halinde bir puan verilir. Şekil 3.12'de gösterildiği gibi, 20°'ye kadar açı yaparak eğilmesi durumunda iki puan verilir, 20° ile 60° açı yaparak eğilmesi halinde üç puan verilir. 60°'den fazla açı yaparak eğilmesi durumunda dört puan verilir.



Şekil 3.12. RULA Gövde Puanı [35]

Dönme veya eğilme olması durumunda Tablo 3.19'deki gibi birer puan eklenir.

Tablo 3.19. RULA Bel Puanı Tablosu [35].

Hareket	Puan	Değişim Puanı
0°	1	
0°-20°	2	Dönme varsa +1
20°-60°	3	Eğilme varsa +1
>60°	4	daha eklenmeli

Bacaklar destekli değil ise 2, destekleniyorsa 1 puan olarak alınır. Bu değerler Tablo 3.20'de yer alan RULA B Tablosunda eşlenir ve RULA B Puanı bulunur. Bu değere kuvvet/yük puanı eklenerek gövde, bacak, boyun skoru elde edilir.

Tablo 3.20. RULA B Skor Tablosu [35].

TABLO B		Gövde											
		1		2		3		4		5		6	
		Bacak											
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Byun	1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
	2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
	3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
	4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
	5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
	6	8	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9

Boyun, gövde ve bacak skoru ile el , kol ve bilek skoru birleştirilerek Tablo 3.21'de yer alan C skoru oluşturulur.

Tablo 3.21. RULA C Skor Tablosu [35].

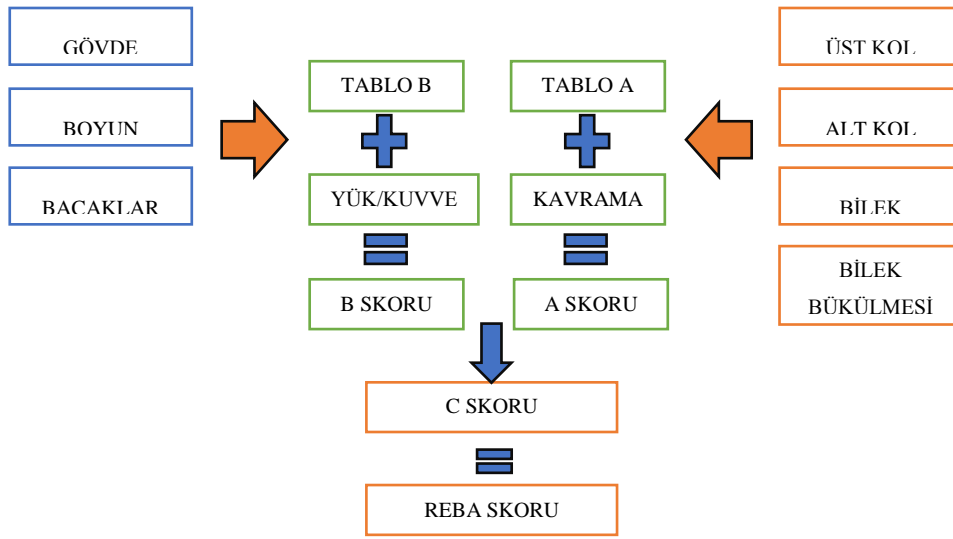
Tablo C		Boyun, Gövde, Bacak Skoru						
		1	2	3	4	5	6	7
El, Kol, Bilek Skoru(A)	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	6
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	5	6	6	7	7
	7	5	5	6	6	7	7	7
	8+	5	5	6	7	7	7	7

Elde edilen sonuç Tablo 3.22’de yer alan baremler ile değerlendirilir ve eylem planı çıkarılır.

Tablo 3.22. RULA Final Skoru Tablosu [35].

RULA SKORU	Değerlendirme
1-2	Kabul Edilebilir
3-4	Değişiklik Gerekebilir
5-6	Yakında Değişiklik Gerekli
7	Hemen değişiklik Gerekli

Yukarıda detaylı anlatılan RULA sürecinin akış şeması Şekil 3.13’de yer almaktadır.

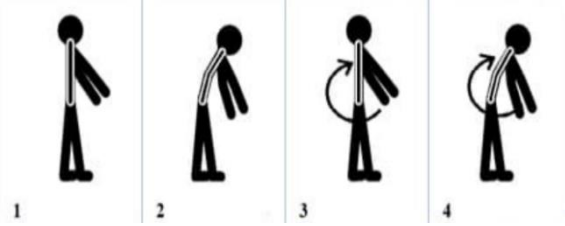


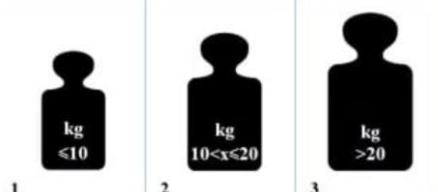


Şekil 3.13. RULA Süreç Akış Şeması [33]

3.3. OWAS Yöntem Akışı

OWAS, tekrarlayan görevlerle ilişkili riski değerlendirmek için tasarlanmıştır ve uzun bir süre boyunca aynı hareketin sık tekrarını içeren görevler için kullanışlıdır. Tekrarlayan görevlerle ilişkili riskin kapsamlı bir değerlendirmesini sağlar ve daha fazla dikkat gerektiren belirli sorunlu alanların belirlenmesine yardımcı olabilir [36].

Tablo 3.21. OWAS Gövde, Kol, Bacak ve Ağırlık Tablosu

Duruş	Duruş Görselleri	Risk Durumları
Gövde		1)Düz 2)Dönmüş 3)Burkulmuş 4) Dönmüş & Burkulmuş
Kollar		1)İki kol da omuz seviyesinin altında 2)Bir kol omuz seviyesinin üzerinde 3)İki kol da omuz seviyesinin üzerinde
Bacaklar		5) Bir diz bükük ve desteksiz 6) Bir diz yerde ve destek alınmakta 7) İki ayak üzerinde ayakta durulmakta
Yüklenen Ağırlık		1)Ağırlık<10 2)10<x<20 3)x>20

OWAS ile Gövde, kollar, bacaklar ve yüklenen ağırlık bazında hesaplama yapılır. Tablo 3.21’de yer alan gövdenin puanlaması yapılırken yere dik olarak alınan doğruya göre vücut duruşu düz, dönmüş, burkulmuş ve hem dönmüş hem de burkulmuş olabilir. Kollar ise OWAS üzerinde iki kolun da omuz seviyesinin altında olması, birinin omuz seviyesinin üzerinde olması, ikisinin de omuz seviyesinin üzerinde olması olarak ayrılır. Sistem üzerinde bu ifadeleri netleştirmek için eşik değerler verilmiştir. Bacaklar ise , bir dizin bükülmesi ve ağırlığın bu diz üzerine verilmesi, bir dizin yerde olması ve iki ayağın da havada olup ağırlığın dengeli olması olarak sıralanmaktadır. Finalde elde edilen puanlar tablo ile eşleştirilerek Tablo 3.22’deki final OWAS skoru bulunur .

Tablo 3.22. OWAS Skor Tablosu [37].

OWAS	Bacaklar																					
	1			2			3			4			5			6			7			
	Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			
Kollar	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Gövde	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	2	3	1	1	1	1	2	
	1	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3
	2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3	4
	2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3	4
	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1
	3	2	2	3	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1
	2	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1
	3	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1
1	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4	
4	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4	
2	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4	
3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4	

Tablo 3.22 ile elde edilen OWAS final skoru 4 kategoride değerlendirilir. Kategoriler Tablo 3.23'deki gibi sınıflandırılır. Alınan skor 1 ise yakın sürede bir önleyici faaliyet gerekmez. İkinci düzeyde ise, yakında yapılması gereken acil bir önlem gerekmemesiyle beraber, riski oluşturan durumlar için araştırma yapılması gerekmektedir. Skor 3 ve 4'te ise kesinlikle riski azaltıcı önlemler uygulanmalıdır.

Tablo 3.23. OWAS Eylem Planı Tablosu [37].

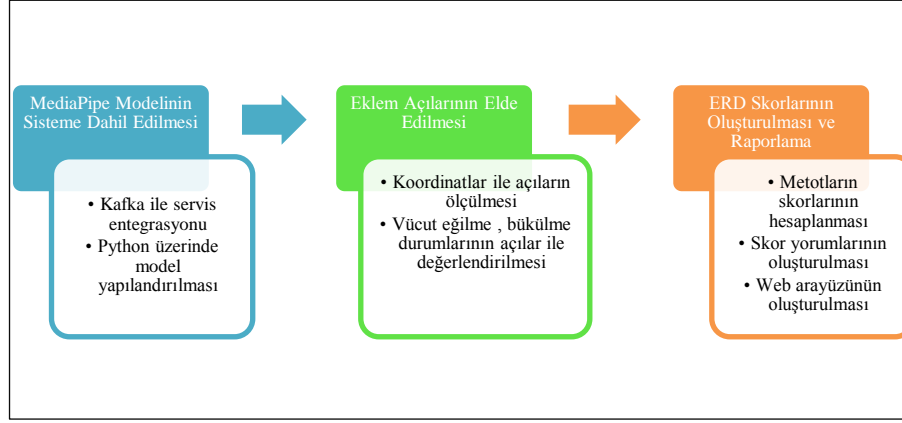
Kod	Açıklama
1	Yakın zamanda önlem gerekmemekte
2	Yakın bir zamanda önlem için araştırma yapılmalı
3	Yakın zamanda önlem uygulanmalı
4	Acilen düzenleyici önlem uygulanmalı

Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır.

- i Bilgisayarlı görü modelinin oluşturulması ve yüklenen fotoğrafların poz tahminin yapılması.

- ii Poz tahmini ile elde edilen koordinatlardan vücut eklem açılarının elde edilmesi.
- iii Hesaplanan açılar ile REBA, OWAS, RULA skorlarının oluşturulup raporlanması.

Sistemin süreç akışı Şekil 3.14’de görülebilmektedir.



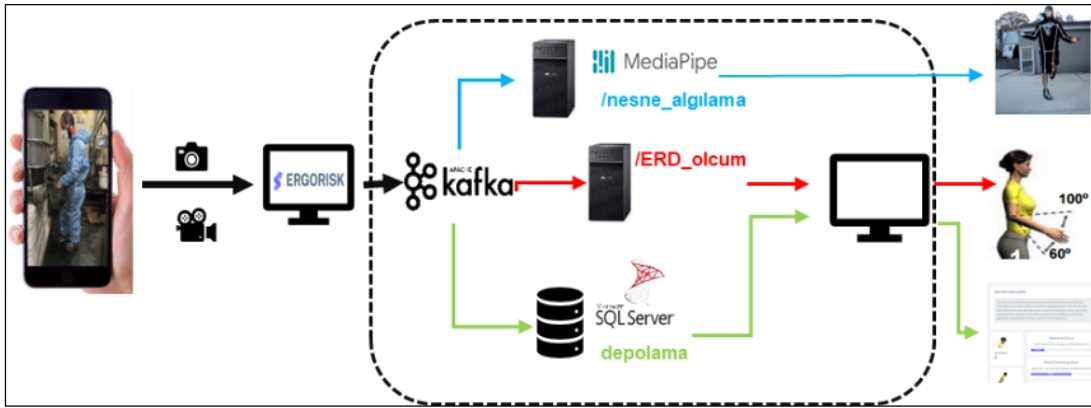
Şekil 3.14. Platform süreç akışı

3.4. Bilgisayarlı Görü Modelinin Sisteme Entegre Edilmesi

Platformun web üzerinde çalışması planlanmıştır. Çalışılacak olan sistemde mikro servis mimarisi ile ilerlenmiş, çoklu kullanıcıların aynı anda sisteme erişebilmeleri sağlanacaktır. Çoklu kullanıcıların sistem üzerinde aynı anda işlem yürütmesini sağlamak için bir kuyruk yönetim kütüphanesi olan Kafka tercih edilmiştir. Kafka bir üretici ve alıcı arasında veri iletimini ve işlem kayıtlarının tutulmasını, bunların da birçok abone ile aynı anda yapılmasını sağlayan dağıtık kuyruk kütüphanesidir [38]. Kullanıcılardan gelen görsel işleme talepleri Kafka ile kuyruğa alınır ve yukarıda belirtilen servislerin kullanılabilirlik durumlarına göre sırayla başlıklar vasıtasıyla iletilir. Bu esnada önyüzde kullanıcıya bekleme ekranı yöneltilir ve işlem tamamlandığında kullanıcı sonuç raporuna ulaşır.

Platformun bulut tabanlı olması ve çoklu kullanıcıya aynı anda cevap verebilmesi gerekmektedir. Sistem üzerinde yüksek hız, doğruluk oranı ve çoklu erişim performansı göz önüne alınarak MediaPipe kütüphanesi tercih edilmiştir [39]. MediaPipe, Google tarafından platformlar arası bilgisayarlı görü algılamaları

oluşturmak ve geliştirmek amacıyla yapılan bir kütüphanedir [40]. Bu geniş çaplı kütüphanede nesne algılama, izleme ve vücut duruş tahmini gibi görevler için yeniden kullanılabilir, modüler bileşenlerin sağlanmıştır. Bu projede de vücut duruş tahmini modülü kullanılmıştır. MediaPipe, yüz algılama, el izleme ve poz tahmini dahil olmak üzere belirli görevler için önceden eğitilmiş bir dizi model sunmaktadır. Bu, sıfırdan eğitim modellerine kıyasla zamandan ve işgücünden tasarruf sunmaktadır [41]. Kullanıcıların farklı ön işleme, çıkarım ve son işleme bileşenlerini birleştiren işlem hatları oluşturmasına olanak tanıyarak farklı mimariler ve yapılandırmalarla denemeler yapmayı kolaylaştırmaktadır. Yazılım algoritmasının genel görünümü Şekil 3.15’de görülebilmektedir.



Şekil 3.15. Platform yazılım akışı

Mediapipe kütüphanesi içerisinde derin öğrenme algoritmalarından R-CNN (Bölge Tabanlı Evrişimli Sinir Ağları-Region Based Convolutional Neural Networks) algoritması kullanılmıştır. R-CNN, bilgisayar görüşünde nesne algılama görevleri için tasarlanmış öncü bir derin öğrenme mimarisidir [42].

R-CNN, evrişimli sinir ağlarının gücünü bölge önerme yöntemleriyle birleştiren yeni bir yaklaşım getirmiştir. Algoritma, birkaç aşamada çalışmaktadır. İlk adımda, giriş görüntüsünde nesnelere içermesi muhtemel potansiyel sınırlayıcı kutular oluşturmak için bir bölge önerisi algoritması kullanılmaktadır. Bu alanlar bölge önerileri olarak adlandırılmaktadır. Her bölge önerisi daha sonra sabit bir boyuta bükülür ve sabit uzunlukta bir özellik vektörü çıkarmak için önceden eğitilmiş bir CNN'ye dönüştürülür. Bu durumda CNN, değişken boyutlu bölgeleri sonraki aşamalar için tutarlı bir girdi boyutuna dönüştüren bir özellik çıkarıcı görevi görür [42].

MediaPipe kütüphanesi, poz tahmini için sonuçlarını Bağlamdaki Ortak Nesnelere (Common Objects in Context-COCO) formatında üretmektedir. COCO veri kümesi, özellikle poz tahmini alanında, bilgisayarla görme araştırma ve geliştirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. COCO veri seti, nesne algılama ve segmentasyonun yanı sıra insan anahtar nokta açıklamaları için büyük ölçekli bir kıyaslama sağlamaktadır. Anahtar noktalar, bir kişinin vücudundaki omuzlar, dirsekler, bilekler, kalçalar, dizler ve ayak bilekleri gibi eklemleri temsil etmektedir [43]. Tablo 3.24’de COCO veri setinde yer alan vücut anahtar noktaları gösterilmiştir.

Tablo 3.24. COCO veri setinde yer alan vücut noktaları açıklamaları [43].

Vücut Noktası	Adı	Vücut Noktası	Adı
0	Burun	17	Sol Serçe Parmağı
1	Sol Göz Başı	18	Sağ Serçe Parmağı
2	Sol Göz	19	Sol İşaret Parmağı
3	Sol Göz Sonu	20	Sağ İşaret Parmağı
4	Sağ Göz Başı	21	Sol Başparmak
5	Sağ Göz	22	Sağ Başparmak
6	Sağ Göz Sonu	23	Sol Kalça
7	Sol Kulak	24	Sağ Kalça
8	Sağ Kulak	25	Sol Diz
9	Sol Ağız	26	Sağ Diz
10	Sağ Ağız	27	Sol Bilek
11	Sol Omuz	28	Sağ Bilek
12	Sağ Omuz	29	Sol Topuk
13	Sol Dirsek	30	Sağ Topuk
14	Sağ Dirsek	31	Sol Ayak Parmağı
15	Sol Bilek	32	Sağ Ayak Parmağı
16	Sağ Bilek		

Bu aşamada poz algılama modelinin aşamaları anlatılacaktır. İlk adımda, ilk olarak bazı zorunlu model parametrelerin sağlanması gerekmektedir. Bu parametreler, ayrıca sürecin sonraki aşamalarında model testinde kullanılacaktır. Poz algılama sınıfı, mp_pose değişkeni ile tutulacaktır. Bu değişken, poz algılama metodunu (mp_pose) çağırarak için kullanılacaktır. Mp_pose nesnesini başlatmadan önce sistem üzerindeki kameradan gelen görüntüleri algılamak amacıyla OpenCv ile görüntü kareleri alınır.

Static_image_mode, varsayılan olarak false ile başlatılır. Bu da verilen görüntüleri video formatında ele alacağı ve her görüntüde insan arayamayacağını belirtmektedir. Bu değer true yapıldığında ise, her bir kare işlenir. ENABLE_SEGMENTATION parametresi, true olarak ayarlanırsa çıktı, poz yer işaretleriyle birlikte bir

segmentasyon maskesi oluşturur. Çalışmada insanı diğer ortamdan ayırt edebilmek amacıyla değer true olarak işaretlenmiştir. MODEL_COMPLEXITY parametresi , varsayılan değer 1'dir. 0, 1 veya 2 olabilmektedir. Daha yüksek karmaşıklık seçilirse doğruluk süresini arttırır ve bununla birlikte , performans düşüklüğü oluşturabilmektedir. MIN_DETECTION_CONFIDENCE değeri, [0.0 – 1.0] aralığındadır. Adından da anlaşılacağı gibi algılamanın geçerli sayılabilmesi için en düşük güven değeridir. Varsayılan değer 0,5'tir.Çalışma'da yapılan testler sonucunda 0.5 güven değeri yeterli bulunmuştur.

Bu aşamadan sonra algılama süreci başlar. Derleyici ilk olarak, ön işleme sırasında orijinal görüntüden hiçbir şey kaybetmemek için orijinal görüntünün bir kopyasını oluşturur ve kaydeder. Daha sonra mavi, yeşil, kırmızı formatı, bilgisayarlı görüde yaygın olarak kullanıldığı için kırmızı,yeşil,mavi formatına çevrilir.

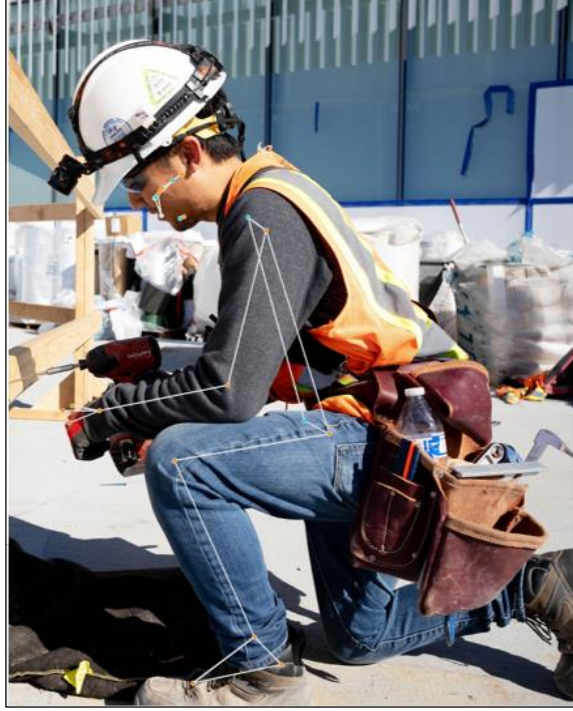
Nesne algılama algılanan alanlar koordinatlar ile diziye aktarılır.Bu aşamada model birden fazla sonuç üretir. En net algılamayı sağlamak amacıyla algoritma Temize Çekme (Non Max Supression NMS) işlemi uygular.

NMS nesne algılama algoritmalarında üst üste binen sınırlayıcı kutuları ortadan kaldırmak için bilgisayarla görme ve görüntü işlemede kullanılan bir tekniktir. NMS'nin amacı, yalnızca en güvenilir algılamaları tutmak ve gereksiz olan veya daha düşük bir güven puanına sahip diğer tüm algılamaları kaldırmaktır [44].

Bu aşamada Tensorflow modeli ile algılama gerçekleştirilir. Algılama sonrasında doğrulama ve yer işaretlerinin görüntüde algılanıp algılanmadığını kontrol edilmektedir. daha sonra yer işaretleri algılandığında, Bunlar draw_landmarks fonksiyonu kullanılarak görüntü üzerine çizilir. Eğer algılamada bir sonuç yoksa, algılama nesnesi boş döndürülür.

Son aşamada algılanan alanlara iskelet yapısı ile yerleştirme yapılır. Etiketleme işleminden sonra görselin koordinatları baz alınarak OpenCv ile koordinatlar yerleştirilir.Burada x ve y, fotoğraf üzerinde yüzdesel bazda algılanan vücut bölümünün konumunu vermektedir. Görünürlük (visibility) ve Mevcutluk (presence) , algılamanın doğruluk tahmin oranını vermektedir.

Alınan algılama koordinat değerleri , fotoğrafın koordinat değerleri ile çarpılır. Elde edilen çarpım sonucunda hangi vücut bölgesinin fotoğraf üzerinde denk geldiği piksel değeri belirlenir ve işaretleme yapılır. COCO iskelet modeli ile işaretlenen vücut anahtar noktaları arasında Şekil 3.16’de görülen çizgiler çizilir. İşlem video ile yapılması durumunda, anlatılan tüm adımlar, her 10 karede bir tekrar edilir. Bu aşamada hem fotoğraf , hem de video için elde edilen tüm algılama sonuçları veritabanına kaydedilir.



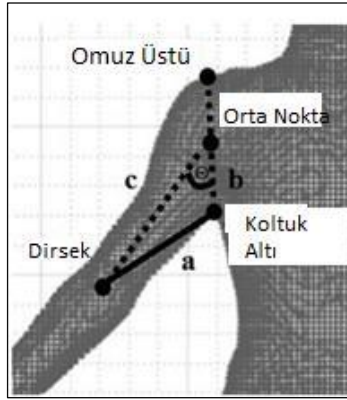
Şekil 3.16. Analiz algoritması ile elde edilmiş poz algılama örneği

Poz tahmininin doğruluğu, daha doğru 3B modeller, daha iyi anahtar nokta tespiti ve eşleştirme algoritmaları kullanılarak veya derinlik kameraları veya hareket sensörleri gibi diğer kaynaklardan ek bilgiler entegre edilerek geliştirilebilir.

3.5. Vücut Eklem Açılarının Ölçülmesi

ERD metotlarında genel olarak kişinin 3 boyutlu görünüşüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple sistem yan ve ön görsel girdilerinden elde edilen sonuçları ayrı ele almaktadır. Tasarlanan yaklaşımda, yapılan ölçümlerin çoğunluğu vücut eklem açıları ile elde edilmiştir.

Çalışma içerisindeki açı ölçümleri doğrudan ve dolaylı olarak ikiye ayrılmaktadır. ERD metodu içerisinde doğrudan açığa bağlı olan risk hesaplarında ölçülen açılar ve açılara göre belirlenecek skorlar sabittir. Örneğin, omuz açısını hesaplarken Şekil 3.17’de görülen COCO veri seti üzerindeki anahtar noktalar ile bir üçgen oluşturulmuştur. Eksen çizgisi olarak omuz uç noktası ve koltukaltı noktasının orta hizası ile dirsek arasında oluşan üçgende yer alan ve a kenarına karşı olan açığı üst kol açısı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.17. Kosinüs teoremi ile omuz açısı

Denklem 3.1’de vücudun omuz noktası olarak baz alınacak alanın formülü gösterilmiştir. Burada koltuk altının bulunduğu alan doğrunun alt, omuz üstü ise üst noktasıdır. Bu çalışmada kosinüs teoremi ve dik üçgen formülleri ile vücut açılarının bulunmuştur.

$$Orta\ Nokta = \frac{Üst\ Omuz + KoltukAltı}{2} \quad (3.1)$$

Üç metot için de kapsayıcı olacak 6 vücut açısı Boyun açısı, Üst Kol açısı, Alt Kol açısı, El açısı, Bel açısı ve Bacak açısı olarak sınıflandırılmıştır. Bu açıların hesaplanmasını belirlenen formüllerle sağlamak için 32 vücut noktası gerekmektedir. Hesaplamalar kosinüs teoremi ile Denklem 3.2’deki formül ile hazırlanmıştır. Buradaki a, b ve c Şekil 3.8’deki gösterimle eşleştirilmiştir.

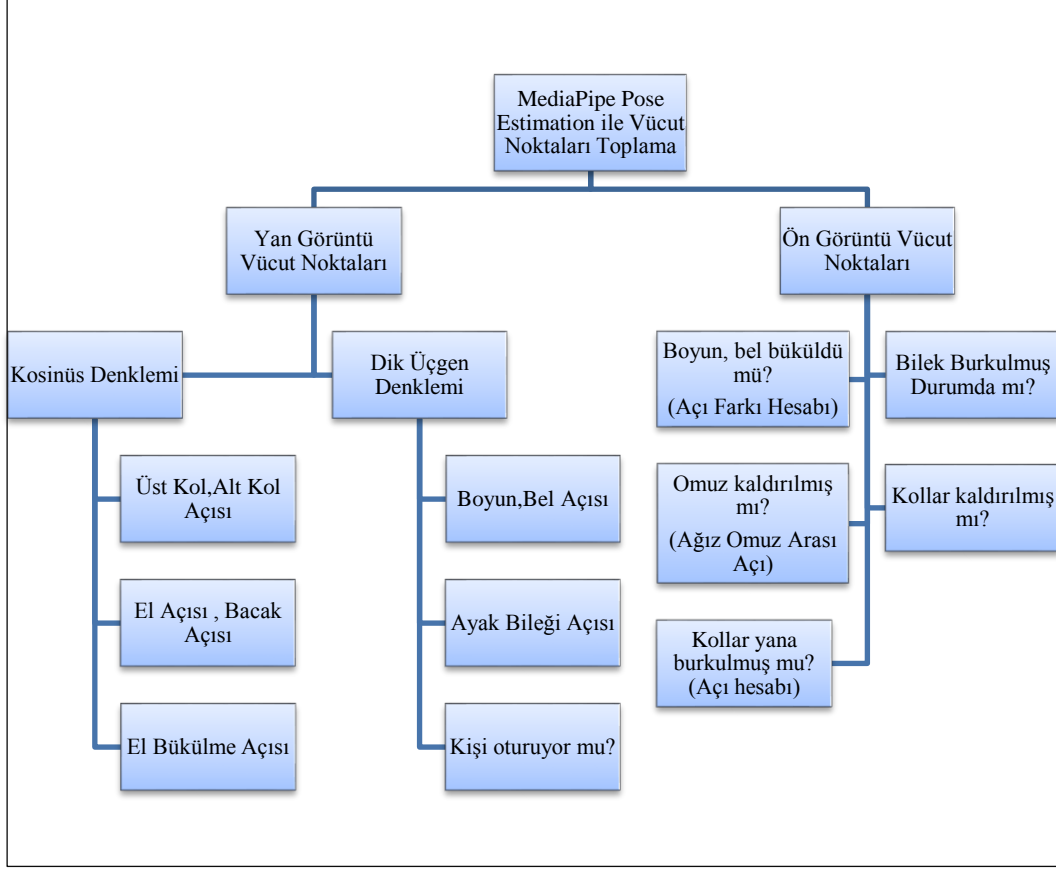
$$\emptyset = \cos^{-1}\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 * b * c}\right) \quad (3.2)$$

ERD metodunun bazı bölümlerinde ise doğrudan açıların kaç derece olduğu sonuç vermemektedir. Örneğin omuz kaldırılmış mı sorusunun cevabı için yapılan fotoğraf denemeleri sonucunda COCO anahtar noktalarından bazılarında oluşturulan oran alınmıştır. Örneğin göre Şekil 3.18'teki gibi ağız ve omuz aralığı aşırı yakın olduğu durumda bunun omzun kaldırıldığı varsayılır.



Şekil 3.18. Omuz kalkmış mı sorusunda kullanılan oran noktaları

Sonuç olarak Şekil 3.19'daki hiyerarşiyede görülebileceği üzere, toplanan vücut noktaları, önce ön ve yan olarak gruplanır. Daha sonra Yan vücut noktalarından doğrudan skor hesabında kullanılan ana vücut açıları hesaplanır. Bu veriler veri tabanına kaydedilir. Ön görüntü üzerinden ise metotların uzmandan yorumlamasını istediği sorulara cevap bulunur. Bulunan tüm açıları üzerinden final skorları hesaplanır.



Şekil 3.19. Sistemde elde edilen koordinatlardan bulunan açıların dağılımı

3.6. Sakarya Faaliyet Gösteren Bir Firmada Örnek Uygulama

Sakarya'daki sanayi bölgelerinden birinde yer alan bir işletmede, ergonomik risk analizi platformunun işçiler üzerinde testi sağlanmıştır. Çalışma anında, Şekil 3.20'deki işçiye ait olan ön ve yan fotoğraflar panel üzerinden yüklenmiştir. Yüklenen fotoğrafın 32 vücut anahtar noktası OpenCv ile fotoğraf üzerinde işlenmiştir.



Şekil 3.20. Yük kaldırma işlemi esnasında işçinin ön ve yan görüntüsü

Görselin koordinatları kafka servisi ile iletilmiştir. İletilen servis ile vücuda ait açılar bulunacaktır. Bulunan açılar ortak olarak 3 ergonomik metot için de kullanılacaktır. Elde edilen koordinatlar ile öncelikle boyun açısı bulunacaktır. Boyun açısı için dik açı kullanılması uygundur. Şekil x’de kulak içi ile göz başlangıcı arasındaki doğru baz alınır (mavi). Bu doğruya ek olarak yatayda bir doğru alınır.



Şekil 3.21. Boyun açısında koordinatların fotoğraf üzerinde yerleştirilmesi (Baz alınacak yatay eksen-kırmızı kesikli, boyun eğimi-mavi doğru)

Elde edilen koordinatlar ile boynun yataydaki eğilme açısı bulunur. Denklem 3.3’de koordinatlar yerleştirilip kod üzerinde sonuç bulunmuştur.

$$\arctan\left(\frac{582 - 480}{1125 - 1045}\right) = 52 \quad (3.3)$$

52 derecenin boyun skor seviyesi karşılığı Tablo 3.1 ile bulunur. Tabloya göre boyun riski 2 olarak bulunur. Boyunda yana eğilme veya esneme tespit edilmemiştir.

Kalan tüm açılar diğer anahtar noktalar ile bulunmuştur. El açısı 55° olarak bulunmuştur. Bacak açısı ise 103° olarak ölçülmüştür. Üst kol açısı 14° ve alt kol açısı 36°'dir. Gövde açısı ise 65°'dir.

Açılar bulunduktan sonra skor tabloları ile sonuçlar alınmıştır. Tablo 3.25'te REBA metodu ile skor hesaplamaları gösterilmiştir. Burada gövde puanı 4 olarak elde edilmiştir. Boyun puanı ise 2'dir. Bacak puanı da 4 olarak bulunmuş , Bu değerler Tablo 3.4 üzerinde eşleştirildiğinde 8 puanlık sonuç elde edilmiştir. Bunun üzerine kaldırılan ağırlık 15 kilogram olduğundan dolayı yük puanı 2 olarak bulunmuştur. Böylece A skoru 10 olarak elde edilmiştir.

İkinci aşamada Üst kol puanı 1, alt kol 2 , bilek puanı ise 2 olarak elde edilmiştir. Bu puanlar Tablo 3.9 üzerinde eşleştirildiğinde 2 puanı elde edilmiştir. Kavrama puanı da 0 olarak tespit edilmiş ve B Skoru 2 olarak bulunmuştur. C skoru ise Tablo 3.10 ile eşleştirilerek 10 olarak bulunur. Aktitive skoru ise 0 olarak belirlenmiştir. Genel Reba skoru ise 10 olarak bulunmuştur En üst seviye Reba risk kategorisine girmektedir.

Tablo 3.25. Yük kaldırma işlemi REBA Skor Sonucu

Vücut Uzvu	REBA Skoru
Gövde	4
Boyun	2
Bacak	4
Tablo A	8
Yük/Kuvvet Puanı	2
A SKORU	10
Üst Kol	1
Alt Kol	2
Bilek	2
Tablo B	2
Kavrama Puanı	0
B SKORU	2
C SKORU	10
Aktivite Puanı	0
REBA SKORU	10

REBA hesaplaması tamamlandıktan sonra, derleyici ile RULA için skor hesaplaması yapılmıştır ve Tablo 3.26'daki sonuç elde edilmiştir. Burada yine üst kol puanı , alt kol ve bilek puanı 3 olarak belirlenmiştir. Bilek bükülmesi puanı ise 1'dir. Bulunan değerler ile Tablo 3.17'de eşleşme yapıldığında puan 4 olarak bulunmuştur. Yük/kuvvet puanı ise 2 olarak belirlenmiştir. A skoru ise bu kuvvet puanı eklenerek 6 olarak bulunmuştur. Boyun ve gövde puanı 4 olarak belirlenmiştir. Bacak puanı ise 2'dir. Bu puanlar Tablo 3.20 tablosundan eşleştirilerek B puanı 7 olarak bulunmuş, daha önce bulunan Yük/kuvvet puanı ise bu puana tekrar eklenerek B skoru 9 olarak bulunur. Buradan Tablo 3.21'de eşleşme yapılarak maksimum skor olan 7 skor puanı elde edilir.

Tablo 3.26. Yük kaldırma işlemi RULA Skor Sonucu

Vücut Uzvu	RULA Skoru
Üst Kol	3
Alt Kol	3
Bilek	3
Bilek Bükülmesi	1
Tablo A	4
Yük/Kuvvet Puanı	2
A SKORU	6
Boyun	4
Gövde	4
Bacak	2
Tablo B	7
Yük/Kuvvet Puanı	2
B SKORU	9
C SKORU	7

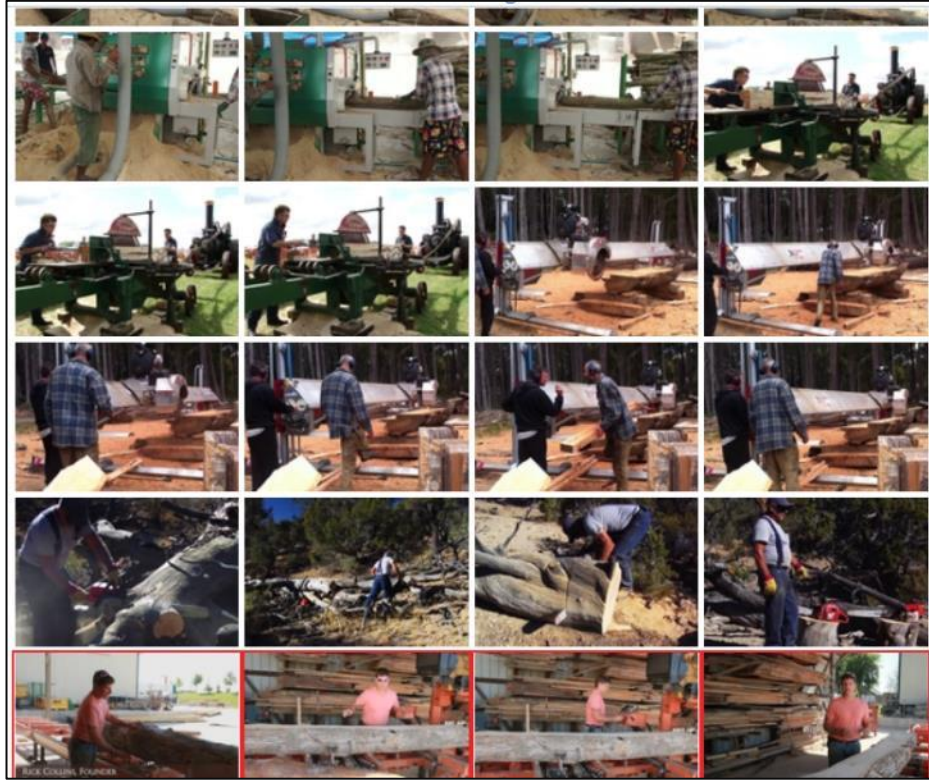
Son aşamada OWAS için sonuçlar elde edilip sonuç ekranında kullanıcıya yöneltilmiştir. Burada yine kollar 1 puan, gövde 2, bacaklar 1 ve yük puanı da 1 olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.27'den hareketle final skoru 2 olarak bulunmuştur. Burada OWAS'ın riski orta kategoride değerlendirdiği görülmektedir.

Tablo 3.27. Yük kaldırma işlemi OWAS Skor Sonucu

Vücut Uzvu	OWAS Skoru
Kollar	1
Gövde	2
Bacaklar	1
Yük	2
Final Skoru	2

4. MODELİN DOĞRULANMASI

Çalışmada, model doğruluğunu sağlamak amacıyla iki aşamalı test uygulanmıştır. İlk olarak insan algılama ve poz tahmini başarımı belirlenmeye çalışılmıştır. Teste girdi olarak MPII Çok Kişili İnsan Duruş Veri Seti kullanılmıştır. MPII, insanları çeşitli pozlarda tasvir eden görseller ve bunlara karşılık gelen etiketlerden oluşan bir koleksiyondur. Koleksiyon fotoğraf örnekleri Şekil 4.1'deki gibidir. Baş, boyun, omuzlar, dirsekler, dizler ve ayak bilekleri gibi vücut parçaları için 2B eklem konumlarını içermektedir [45]. Bu yönleriyle veri seti, çalışmadaki bilgisayarlı görü yazılımını test etmek üzere uygundur.



Şekil 4.1. MPII görsel veri seti örneği [46]

Test için, veri seti içerisinde bulunan çalışma sahası alanlarına ait görseller alınmıştır. Elde edilen fotoğraflar OKS testine tabi tutulmuştur. OKS, bir görüntüdeki bir nesnenin tahmin edilen anahtar noktaları ile yer gerçeği anahtar noktaları arasındaki benzerliğin bir ölçüsü olarak tanımlanır. Genellikle nesne algılama gibi bilgisayarlı

görü görevlerinde kullanılır. OKS, poz tahmini kıyaslamalarda yaygın olarak kullanılan bir değerlendirme ölçütüdür [47].

Denklem 4.1’de, Nesne Anahtar Nokta Benzerliği denkleminde d_i parametresi vücut bölümüne ait algılanan görsel koordinatları ile gerçek koordinatlar arasındaki Öklid uzaklığını göstermektedir. σ_i parametresi ise Denklem 4.2’de yer alan formül ile ölçülür. Buradaki L değeri algılanan her nesnenin genişlik piksel sayısını gösterir. \bar{I} değeri her bir vücut parçasını, n ise toplam anahtar nokta sayısını gösterir. Çalışmada 1586 görsel ile test sağlanmıştır. Şekil 4.2’de test için kullanılan örnek fotoğraf görülebilmektedir.

$$OKS = \sum_{i=1}^n e^{\left(\frac{-d_i^2}{2\sigma_i^2}\right)} / n \quad (4.1)$$

$$\sigma = 0.25 * L \quad (4.2)$$



Şekil 4.2. OKS testi için kullanılan işçi fotoğrafı [46]

Analiz tamamlandıktan sonra, fotoğrafın piksel bazında genişlik ve uzunluk değerleri, algılanan her bir vücut uzvunun koordinatları, algılama doğruluk değerleri veri tabanından alınmıştır. Üst ekstremite bölgesine ait algılama skorları ve OKS değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. OKS değerleri 0.95 ve 1 arasında yer almıştır.

Tablo 4.1. İşçi fotoğrafında baş ve omuz bölgesine ait analiz koordinatları.

Vücut Bölgesi	Algılanan Genişlik	Algılanan Yükseklik	Algoritma Skoru	Gerçek Genişlik	Gerçek Yükseklik	OKS Değeri
Burun	716	321	0,99	700	334	0,95
Sol Göz Başı	736	453	0,99	726	454	0,98
Sol Göz	749	389	0,99	736	359	0,97
Sol Göz Sonu	762	259	0,99	754	216	0,99
Sağ Göz Başı	708	337	0,99	680	344	0,89
Sağ Göz	701	552	0,99	690	566	0,98
Sağ Göz Sonu	695	385	0,99	696	394	0,99
Sol Kulak	791	504	0,99	804	510	0,97
Sağ Kulak	701	451	0,99	701	454	1,00
Sol Ağız	742	294	0,99	733	293	0,99
Sağ Ağız	709	360	0,99	694	350	0,96
Sol Omuz	853	617	0,99	853	641	1,00
Sağ Omuz	696	397	0,99	700	386	0,94

Alt ekstremite bölgesine ait OKS skorları Tablo 4.2’de verilmiştir. Alt ekstremitede kalça bölgesinde algılama analiz doğruluğunda sapma olduğu gözlenmiştir. Bilek, ayak bölgesinde veya kollarda OKS değeri 1’e yaklaşmıştır. Bu noktada MediaPipe modelinde vücudun dış bölgelerinde algılama kesinliğinin arttığı çıkarılmaktadır.

Tablo 4.2. İşçi fotoğrafında gövde ve bacaklara ait algılama koordinatları.

Vücut Bölgesi	Algılanan Genişlik	Algılanan Yükseklik	Gerçek Genişlik	Gerçek Yükseklik	OKS Değeri
Sol Dirsek	618	842	607	850	0,93
Sağ Dirsek	488	541	479	542	0,92
Sol Bilek	816	616	825	625	0,53
Sağ Bilek	659	719	653	734	1,00
Sol Serçe Parmağı	536	453	549	457	1,00
Sağ Serçe Parmağı	902	570	909	571	1,00
Sol İşaret Parmağı	161	832	168	821	0,99
Sağ İşaret Parmağı	652	522	652	523	1,00
Sol Başparmak	734	611	734	622	0,96
Sağ Başparmak	593	711	588	717	1,00
Sol Kalça	733	436	746	437	0,44
Sağ Kalça	1177	593	1185	596	1,00
Sol Diz	828	288	818	525	0,92

Tablo 4.2. (Devamı) İşçi fotoğrafında gövde ve bacaklara ait algılama koordinatları.

Vücut Bölgesi	Algılanan Genişlik	Algılanan Yükseklik	Gerçek Genişlik	Gerçek Yükseklik	OKS Değeri
Sağ Diz	929	467	919	356	1,00
Sol Bilek	133	393	142	391	0,90
Sağ Bilek	740	335	729	456	1,00
Sol Topuk	488	466	477	317	0,95
Sağ Topuk	964	482	970	361	0,80
Sol Ayak Parmağı	506	+291	509	504	0,99

Tablolarda genişlik ve yükseklik değerleri piksel bazında verilmiştir. Hesaplamaya önce burun noktasından başlanmıştır. D_0 değeri Öklid bağıntısı ile 19 bulunmuştur. Denklem 4.1’de yer alan sigma değeri obje genişliği uygulama bazında 230 alınarak 57,50 bulunmuştur. Bulunan sigma değeri Denklem 4.2’de yerleştirilmiş, üstel değeri alınmış ve sonuçta burun için OKS değeri 0,95 hesaplanmıştır. OKS değeri 1’e yaklaştıkça tahminin gerçeğe yaklaşımı artar.

Kalan tüm anahtar noktaları için OKS değerleri hesaplanmış ve ortalamaları alınmıştır. Genel OKS değeri ise %92 bulunmuştur. Literatürde bu veri seti ile birçok çalışma yürütülmüştür. Örneğin, YOLO algılama kütüphanesi ile yapılan bir çalışmada OKS değeri %87 bulunmuştur [48]. Bir diğer çalışmada OKS değeri %71 bulunmuştur [49]. Kilit nokta konumlarını ve ısı haritası dağılımlarını ortaklaşa tahmin eden bir çalışmada ise %91 değeri elde edilmiştir [50].

Algılanan vücut noktaları ile yapılan açı ölçümlerinin testi amacıyla da algoritmaya girdi olarak fotoğraflar eklenmiş ve sonucu alınmıştır. Analizi yapılan fotoğrafların algoritma tarafından algılanan açı değerleri kaydedilmiştir. Bunun yanında açılarının gerçek değerleri ErgoFellow adlı yazılımın Görsel analiz aracı ile manuel hesaplanıp kaydedilmiştir. (Şekil 4.3)



Şekil 4.3. ErgoFellow yazılımı manuel açı hesaplama aracı

Çalışmada kullanılan REBA, RULA ve OWAS metotları eklem merkezlerinin açılarından elde edilen sonuçlara göre yorumlanmakta ve risk skoru hesaplanmaktadır. Risk analizinde hatayı en aza indirmek için vücut eklem açılarındaki sapmanın minimum olması gerekmektedir. Bu sebeple ikinci aşamada üç metot için de ortak olarak kullanılan vücut ölçümleri belirlenmiştir. MPII veri setinden 40 fotoğraf platformdaki algorithmda çalıştırılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Sonuçlardaki sapmaları ölçmek için Ortalama Mutlak Sapma (Mean Absolute Deviation-MAD), Ortalama Hata Karesi (Mean Squared Error-MSE), RMSE değerleri kullanılacaktır. Analizdeki her bir vücut bölümünün kendi RMSE değeri hesaplanmıştır. Algılanan açı değerleri (A_i) ve ölçülen (F_i) arasındaki hata değerlerinin ortalaması alınmış ve Denklem 4.3'teki MAD değeri bulunmuştur.

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i - F_i|}{n} \quad (4.3)$$

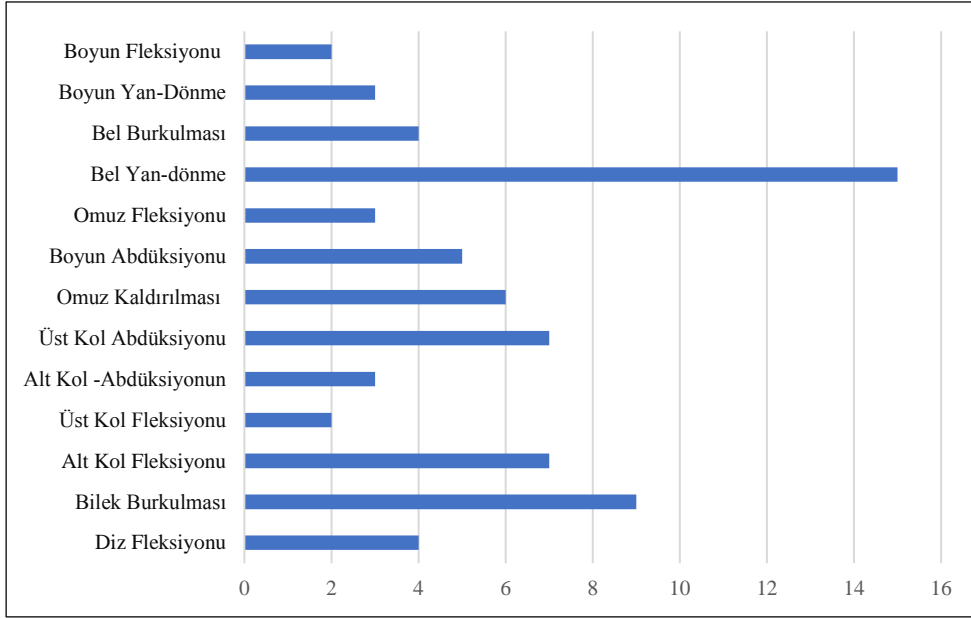
Gerçekten sapma değerlerinin karelerinin ortalaması alınarak ise Denklem 6'daki Ortalama Hata Karesi değeri bulunmuştur.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{n} \quad (4.4)$$

MSE değerinin ise karekökü alınarak Denklem 4.5'deki Ortalama Karekök Sapması değeri bulunmuştur.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{n}} \quad (4.5)$$

Hesaplanan değerlerin sonuçları Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Sonuçlarda bel – yan dönme ölçüsündeki sapma payı 14° olurken, kol ve alt kol bölgelerinde 5-8 ° arasına kadar düşmüştür. Bilek burkulması, alt kol fleksiyonu ve üst kol abdüksiyonu RMSE değerinin ortalama veya üzerinde olduğu parçalar olmuştur. Buna karşın Boyun fleksiyonu, üst kol fleksiyonu ve alt kol abdüksiyonunda sapma düşük gerçekleşmiştir. Omzun kaldırılması, bilek burkulması gibi belirlenmesi daha gözlemciye bağlı durumlar olduğundan dolayı, sapma değerleri nispeten yüksek seyretmiştir.



Şekil 4.4. Eklem açıları RMSE değeri (Derece cinsi)

Ortalama sapma 5,8° gerçekleşmiştir. Literatürde bulunan önceki çalışmalarla baz alındığında açı algılama değerlerinin tutarlı olduğu gözlemlenebilmektedir. Plantard çalışmasında kutu ile ağırlık kaldırma işlemine yönelik RULA analizi yürütmüş ve 13 vücut anahtar noktası için ortalama 7,7° RMSE değeri elde etmiştir [51]. Giyilebilir teknolojilerle yapılan bir ergonomik ölçümde ortalama 10° değeri elde etmişlerdir [52]. Çalışmalarında ortalama 8° sapma değeri elde etmişlerdir [53]. Bir diğer çalışmada, sensörler vasıtasıyla yürütülen analizde 2° ve 5° aralığında sapma değeri elde edilmiştir [54]. Burada kameralı çalışmalara görece belirgin bir fark olduğu

gözlemlenmektedir. Genellikle ERD metotları arasında 20 30°'lik aralıklarla hesaplama yapıldığı baz alındığında eklem açısı algılama performansının yüksek olduğu çıkarımı yapılmaktadır.

Son aşamada, REBA, RULA için ergonomik risk değerlendirme skorlarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. OWAS skoru 1-4 arasında yer aldığı ve değişkenliği yüksek olduğu için bu teste dahil edilmemiştir. Bu işlem için 30 farklı işe ait işçi fotoğrafları çekilmiştir. Bu fotoğraflar öncelikle karar verici yardımıyla ve manuel analiz aracı olan ErgoFellow ile sonuçları elde edilip, Tablo 4.3 'de Gözlemci Yoluyla Elde Edilen Skor sütununda yazılmıştır. Platformdan elde edilen sonuçlar ise algoritma sütununa yazılmıştır. Tablo 4.3'de REBA için yapılan analizlerde risk skorlarının 9-11 arasında 17 değer, 7'den küçük 3 değer şeklinde yer aldığı görülebilmektedir.

Analiz sonuçlarına göre, iki skor seti arasında Root Mean Square Error (RMSE) değeri 0.65 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, araştırmacının yazılımının gözlemci tarafından oluşturulan gerçek değerlendirmelerle %5'lik bir fark içerdiğini göstermektedir. Sonuçlar, REBA ergonomik değerlendirme yönteminin uygulanmasında araştırmacının yazılımının belirli işçiler için gerçek değerlendirmelerle yüksek düzeyde tutarlılık sağladığını göstermektedir.

Tablo 4.3. Algoritma Skorunun Gözlemci ve Algoritma Bazında Karşılaştırılması

Numara	REBA-Gözlemci Yoluyla Elde Edilen Skor	REBA-Algoritma Skoru	RULA-Gözlemci Yoluyla Elde Edilen Skor	RULA-Algoritma Skoru
1	12	11	6	6
2	9	9	6	6
3	10	10	5	6
4	9	9	6	6
5	5	6	5	5
6	11	11	6	4
7	9	10	7	7
8	10	10	6	7
9	11	10	6	4
10	10	10	8	8
11	7	7	5	5

Tablo 4.3. (Devamı) Algoritma Skorunun Gözlemci ve Algoritma Bazında Karşılaştırılması

Numara	REBA-Gözlemci Yoluyla Elde Edilen Skor	REBA-Algoritma Skoru	RULA- Gözlemci Yoluyla Elde Edilen Skor	RULA- Algoritma Skoru
12	10	9	7	7
13	7	7	6	6
14	9	9	6	6
15	10	10	5	5
16	11	11	7	7
17	5	5	4	4
18	8	8	7	8
19	11	11	7	7
20	10	10	6	6
21	5	6	7	6
22	11	10	5	5
23	9	8	5	6
24	10	9	3	3
25	9	8	5	5
26	10	10	7	7
27	9	10	6	5
28	10	9	6	6
29	11	10	7	7
30	11	11	5	5
Ortalama		0.43		0.37
RMSE		0.66		0.61

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ergonomik risk değerlendirme alanında, aynı anda üç ortamda sonuç verebilecek web tabanlı, mobil ve masaüstü platformlarda çalışabilen bir uygulama geliştirilmiştir. Platform, ölçümü yapılan kişiye ait vücut bölümü bazlı risk skoru, risk durum değerlendirmesi ve alınacak aksiyon önerileri sunmaktadır. Uygulama üzerinde ERD metotları içerisinde yer alan REBA, OWAS ve RULA analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Değerlendirici daha sonra kendi profiline giderek analizi yapılan çalışana ait sonuç raporlarını görüntüleyebilmekte veya indirebilmektedir.

Platform üzerinde analizi oluşturmak amacıyla nesne algılayıcı ve ergonomik hesaplama yapan iki model çalışmaktadır. Yazılımın testi amacıyla OKS testi uygulanmıştır. MediaPipe bazlı model üzerinde yapılan testin sonucunda ortalama nesne algılama ve poz tahmini başarımları %92 olarak ölçülmüştür. Benzer çalışmalar ile yapılan kıyaslama sonucunda güncel yazılımlarla tutarlı olduğu görülmüştür. İkinci basamakta bulunan omuz, bel, kol ve boyun bölgesinde ergonomik açı ölçümlerinin sonuçları test edilmiş ve sapma değerleri ölçüldüğünde tüm vücut için ortalama 5,8° RMSE sonucu alınmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalarda ise ortalama 5-10° sonucu elde edilmiştir. Sonuçlar, önerilen modelin, MPII veri setindeki çalışma anına ait fotoğraflar ile vaka incelemelerinin deneylerinde gösterildiği gibi, potansiyel olarak gerçek zamanlı izleme sistemlerinin otomatik tespiti ve analizine uygulanabileceğini göstermektedir.

Anormal çalışma davranışını %100 doğrulukla tanımlayamamasına rağmen, geliştirilmiş bilgisayarlı görü dayalı ergonomik ölçüm yaklaşımı, işletmelerin KİSR önleme çalışmalarında önemli fayda sağlayabilecektir. Önerilen yaklaşım ile, işçileri çalışma ortamından ayırmadan ve çok müdahaleci olmayan bir yolla eşzamanlı izleme sağlanabilecektir. Bununla da işçinin risk ölçüm doğruluğunun arttırılacağı düşünülmektedir. Çalışmanın 32 eklem açısı ile cevaplanması net olmayan alanları otomatik hesaplaması yönüyle literatüre katkı sağlayacağı öngörülmektedir. İleride, işçi ergonomisi üzerinde muhtemel diğer alanlarda anormal kullanıcı davranışları, ışık,

ses gibi diğer faktörleri de R-CNN modeline dahil edilerek risk analizi yapısı geliştirilebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 11(12), 5725.
- [2] Can, G. F., & Fiğlali, N. (2017). Görüntü İşleme Temelli Hızlı Üst Ekstremitte Değerlendirme Yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3).
- [3] Soe, K. T., Laosee, O., Limsatchapanich, S., & Rattanapan, C. (2015). Prevalence and risk factors of musculoskeletal disorders among Myanmar migrant workers in Thai seafood industries. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics: JOSE*, 21(4), 539–546.
- [4] Kim, I., Kim, K.-R., Lee, K.-S., Chae, H.-S., & Kim, S. (2014). Ergonomic interventions to prevent work-related musculoskeletal disorders incurred by the weight lifting tasks in livestock feed manual material handling, 776–779.
- [5] Delice, E. K., Can, G. F., & Kahya, E. (2020). Hızlı ofis zorlanma değerlendirmesi yönteminin entegre bir çok kriterli karar verme yaklaşımıyla geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1297-1314.
- [6] (U.S. Bureau of Labor Statistics (USBLS],2022,9 Kasım). Employer-Reported Workplace Injuries and Illnesses. <https://www.bls.gov/news.release/pdf/osh.pdf> adresinden 1 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [7] ([USBLS],2016,10 Kasım). Employer-Reported Workplace Injuries and Illnesses. <https://www.bls.gov/news.release/pdf/osh.pdf> adresinden 1 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [8] Ou, Y.-K., Liu, Y., Chang, Y.-P., & Lee, B.-O. (2021). Relationship between Musculoskeletal Disorders and work performance of nursing staff: A comparison of hospital nursing departments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(13), 7085.
- [9] Seidel, D. H., Ditchen, D. M., Hoehne-Hückstädt, U. M., Rieger, M. A., & Steinhilber, B. (2019). Quantitative measures of physical risk factors associated with work-related musculoskeletal disorders of the elbow: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(1), 130.
- [10] Afsharian, A., Dollard, M. F., Glozier, N., Morris, R. W., Bailey, T. S., Nguyen, H., & Crispin, C. (2023). Work-related psychosocial and physical paths to future musculoskeletal disorders (MSDs). *Safety Science*, 164(106177), 106177.

- [11] Karthikeyan, G. R., Balaguhan, B., Mathanmohan, A., Deepak, V., Indrapriyadharshini, K., & Devar, M. N. (2022). Insights into knowledge, attitude and perception about dental ergonomics and work-related musculo skeletal disorders (MSD) among dental professionals at chengalpet district, Tamil Nadu, India: A cross-sectional study. *International Journal of Occupational Safety and Health*, 12(1), 1–7.
- [12] Korea Occupational Safety & Health Agency (Kosha) (2019). The status of industrial accident.
- [13] Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 29(3), 356–373.
- [14] ([USBLS],2021,26 Ağustos). 32 percent of nonfatal injuries resulting in days away from work treated in emergency room in 2019. <https://www.bls.gov/opub/ted/2021/32-percent-of-nonfatal-injuries-resulting-in-days-away-from-work-treated-in-emergency-room-in-2019.htm> adresinden 1 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [15] Baba, N. H., & Daruis, D. D. I. (2016). Repetitive strain injury (RSI) among computer users: a case study in telecommunication Company. *Malaysian Journal of Public Health Medicine*, 16(Special Volume (1)), 48-52.
- [16] ScienceDirect, Work-Related Musculoskeletal Disorder. <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/work-related-musculoskeletal-disorder> adresinden 1 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [17] ([USBLS] 2022,16 Aralık). Census of Fatal Occupational Injuries Summary. <https://www.bls.gov/news.release/cfoi.nr0.htm> adresinden 20 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [18] Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim ve Araştırma Merkezi (2013). Meslek Hastalıkları. <http://casgem.gov.tr/dosyalar/kitap/81/dosya-81-8942.docx> adresinden 20 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- [19] Oğuzöncül, A. F., & Kurt, O. (2020). Halk Sağlığı Bakışıyla Türkiye’de Kas İskelet Hastalıkları. *Turkiye Klinikleri Public Health - Special Topic*, 6(1), 52–54.
- [20] Elmas-Atay, S., & Kuzu Yildirim, S. (2022). İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Sektörlerin Risk Düzeylerinin CRITIC Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Sıralanması. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 47, 181–193.
- [21] El-Mir, Y., Ivarsson, J., Einarsson, L., & Badampudi, D. (2020). Ergonomic posture correction through a camera live feed and its applicability in terms of usability. [Yüksek lisans tezi] Blekinge Institute of Technology

- [22] Santos, S., Folgado, D., Rodrigues, J., Mollaei, N., Fujão, C., & Gamboa, H. (2020). Explaining the ergonomic assessment of human movement in industrial contexts. Proceedings of the 13th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. [Doktora tezi] Repositório da Universidade Nova
- [23] MassirisFernández, M., Fernández, J. Á., Bajo, J. M., & Delrieux, C. A. (2020). Ergonomic risk assessment based on computer vision and machine learning. Computers & Industrial Engineering, 149(106816), 106816.
- [24] Wu, S., Chen, Z., Zhao, X., Yao, M., Wang, Z., & Kuang, S. (2020). Design of an ergonomic App for entire rapid body assessment based on Mask RCNN. Journal of Physics. Conference Series, 1633(1), 012150.
- [25] Oyekan, J., Chen, Y., Turner, C., & Tiwari, A. (2021). Applying a fusion of wearable sensors and a cognitive inspired architecture to real-time ergonomics analysis of manual assembly tasks. Journal of Manufacturing Systems, 61, 391–405.
- [26] Seo, J., & Lee, S. (2021). Automated postural ergonomic risk assessment using vision-based posture classification. Automation in Construction, 128(103725), 103725.
- [27] Yunus, M. N. H., Jaafar, M. H., Mohamed, A. S. A., Azraai, N. Z., & Hossain, M. S. (2021). Implementation of kinetic and kinematic variables in ergonomic risk assessment using motion capture simulation: A review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(16), 8342.
- [28] Pérez Sancho, M., Baño Morales, D., Baydal-Bertomeu, J. M., Zambrano, I., & Soto, R. (2021). Ergonomic risk analysis inherent in neonate bathing activity performed by nurses using the REBA methodology through kinect depth sensors. Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN), 9(4), 864.
- [29] Vukicevic, A. M., Macuzic, I., Mijailovic, N., Peulic, A., & Radovic, M. (2021). Assessment of the handcart pushing and pulling safety by using deep learning 3D pose estimation and IoT force sensors. Expert Systems with Applications, 183(115371), 115371.
- [30] Lin, P.-C., Chen, Y.-J., Chen, W.-S., & Lee, Y.-J. (2022). Automatic real-time occupational posture evaluation and select corresponding ergonomic assessments. Scientific Reports, 12(1), 2139.
- [31] Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). Applied Ergonomics, 31(2), 201–205.
- [32] Sağıoğlu, H., Coşkun, M.B., Erginel, N. (2015), REBA İle Bir Üretim Hattındaki İş İstasyonlarının Ergonomik Risk Analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3 (3), ÖS: Ergonomi, 2015, 339-345.
- [33] Çakır, O. (2019). *İnşaat İşlerinde Ergonomik Risklerin Reba, Rula ve Niosh Risk Değerlendirme Yöntemleri İle İncelenmesi* [Yüksek Lisans tezi]. Üsküdar Üniversitesi.

- [34] McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91–99.
- [35] Ergo-Plus. (2023,20 Temmuz) A Step-by-Step Guide to the RULA Assessment Tool. <https://ergo-plus.com/reba-assessment-tool-guide/> adresinden 20 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- [36] Lee, T.-H., & Han, C.-S. (2013). Analysis of working postures at a construction site using the OWAS method. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics: JOSE*, 19(2),245–250.
- [37] Ünal, E. (2022). Kaba İnşaat İşlerinde Ergonomik Risklerin İncelenmesi ve Owas Risk Değerlendirme Yöntemiyle Örnek Risk Değerlendirme Çalışması [Yüksek Lisans tezi]. Üsküdar Üniversitesi.
- [38] Thein, K. M. M. (2014). Apache kafka: Next generation distributed messaging system. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 3(47), 9478-9483.
- [39] Garg, S., Saxena, A., & Gupta, R. (2022). Yoga pose classification: a CNN and MediaPipe inspired deep learning approach for real-world application. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*.
- [40] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.-L., Yong, M. G., Lee, J., Chang, W.-T., Hua, W., Georg, M., & Grundmann, M. (2019). MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines. arXiv preprint
- [41] Kim, J.-W., Choi, J.-Y., Ha, E.-J., & Choi, J.-H. (2023). Human pose estimation using MediaPipe pose and optimization method based on a humanoid model. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 13(4), 2700.
- [42] Sun, X., Wu, P., & Hoi, S. C. H. (2017). Face detection using deep learning: An improved faster RCNN approach.
- [43] Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft COCO: Common objects in context. In *Computer Vision – ECCV 2014*, 740–755
- [44] Liu, S., Huang, D., & Wang, Y. (2019). Adaptive NMS: Refining pedestrian detection in a crowd. *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 6459-6468
- [45] Yu, Z., Shin Yoon, J., Lee, I. K., Venkatesh, P., Park, J., Yu, J., & Park, H. S. (2020). HUMBI: A Large Multiview Dataset of Human Body Expressions. *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2990–3000.
- [46] Andriluka, M., Pishchulin, L., Gehler, P., & Schiele, B. (2014). 2d human pose estimation: New benchmark and state of the art analysis. In *Proceedings of the IEEE Conference on computer Vision and Pattern Recognition* ,3686-3693

- [47] Maji, D., Nagori, S., Mathew, M., & Poddar, D. (2022). YOLO-Pose: Enhancing YOLO for Multi Person Pose Estimation Using Object Keypoint Similarity Loss. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2637-2646
- [48] Cha, J.-Y., Yoon, H.-I., Yeo, I.-S., Huh, K.-H., & Han, J.-S. (2021). Periapical bone loss measurement using a region-based convolutional neural network on dental periapical radiographs. *Journal of Clinical Medicine*, 10(5), 1009.
- [49] Xiao, B., Wu, H., & Wei, Y. (2018). Simple baselines for human pose estimation and tracking, 446-481
- [50] Volkmann, N., Zelenka, C., Devaraju, A. M., Brünger, J., Stracke, J., Spindler, B., Kemper, N., & Koch, R. (2022). Keypoint detection for injury identification during turkey husbandry using neural networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(14).
- [51] Plantard, P., Shum, H. P. H., Le Pierres, A.-S., & Multon, F. (2017). Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. *Applied Ergonomics*, 65, 562–569.
- [52] Humadi, A., Nazarahari, M., Ahmad, R., & Rouhani, H. (2021b). Instrumented ergonomic risk assessment using wearable inertial measurement units: Impact of joint angle convention. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 9, 7293–7305.
- [53] Humadi, A., Nazarahari, M., Ahmad, R., & Rouhani, H. (2021a). In-field instrumented ergonomic risk assessment: Inertial measurement units versus Kinect V2. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 84(103147), 103147.
- [54] Cerqueira, S. M., Silva, A. F. D., & Santos, C. P. (2020). Smart vest for real-time postural biofeedback and ergonomic risk assessment. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 8, 107583–107592.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Anıl Özkan GEÇİCİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021-Halen , İpekyol A.Ş, Yazılım Uzmanı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

DİĞER ESERLER: