



**TENİS SPORCULARINDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ
KULLANILARAK YAPAY ZEKÂ TABANLI PERFORMANS ANALİZ
SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin GÜRER
BEDEN EĞİTİMİ ve SPOR ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Faruk AKÇINAR

Doktora Tezi – 2025

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TENİS SPORCULARINDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ
KULLANILARAK YAPAY ZEKÂ TABANLI PERFORMANS ANALİZ
SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin GÜRER

Beden Eğitimi ve Spor Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Faruk AKÇINAR

Tez Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Vedat ÇINAR

Doç. Dr. Faruk AKÇINAR

Prof. Dr. Davut HANBAY

Prof. Dr. Betül AKYOL

Doç. Dr. Hüseyin Nasip ÖZALTAŞ

Bu araştırma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
2022/3053 Proje numarası ile desteklenmiştir.

MALATYA

2025

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
Sağlık Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

ETİK BEYANI

İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak “Doç. Dr. Faruk AKÇINAR” danışmanlığında hazırlayıp sunduğum “Tenis Sporcularında Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Yapay Zekâ Tabanlı Performans Analiz Sistemi Geliştirilmesi” başlıklı Doktora tezim içinde elde ettiğim verileri, bilgileri, belgeleri akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tezimde yararlandığım eserlere bilimsel kurallara uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin özgün olduğunu, tezimin çalışma ve yazımında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 08/07/2025

Hüseyin GÜRER
İmza

İÇİNDEKİLER

ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Tenis.....	4
2.1.1. Teniste Yaş Gruplarına Göre Sporcu Gelişimi ve Eğitim Süreçleri	4
2.1.2. Teniste Temel Vuruşlar.....	5
2.1.3. Teniste Performans ve Gereksinimleri.....	7
2.1.4. Teniste Performans Analizi.....	11
2.2. Görüntü İşleme.....	13
2.2.1. Görüntü İşleme Yöntemleri	14
2.2.2. Görüntü işleme Teknikleri	14
2.2.3. Sporda Görüntü İşleme	15
2.2.4. Teniste Görüntü İşleme.....	16
2.3. Yapay Zekâ	17
2.3.1. Sporda Yapay Zekâ.....	19
2.3.2. Teniste Yapay Zekâ	19
2.4. Video İşleme	20
2.4.1. Sporda Video İşleme.....	21
2.4.2. Teniste Video İşleme	22
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Araştırma izinleri	25
3.2. Araştırma Evreni/Çalışma Grupları	25
3.3. Araştırmaya Dâhil Edilme Kriterleri.....	25
3.4. Araştırma Dışı Tutulma Kriterleri.....	25
3.5. Araştırma Modeli	26
3.6. Katılımcılar ve Kayıt Ortamı	26
3.7. Veri Toplama Süreci	27
3.7.1. Uluslararası Tenis Testi	27

3.8. Video İşleme ve Hazırlık	33
3.8.1. YOLOv8 Pose Estimation Modeli	34
3.8.2. Eğitim Süreci.....	36
3.8.3. Poz Tahmini ve Veri Çıkarımı	38
3.8.4. Hareket Sınıflandırması ve Analizi.....	40
3.9. Değerlendirme Metrikleri	41
3.9.1. Model Performans Metrikleri.....	41
3.9.2. Biyomekanik Analiz	43
3.9.3. Teknik Performans.....	44
4. BULGULAR.....	46
4.1. Model Mimari ve Performans Değerleri.....	46
4.2. Biyomekanik Analiz	47
4.3. Vuruş Tiplerine Göre Teknik Performans	48
4.4. Bulguların Pratik Çıkarımları.....	50
4.4.1. Antrenman Optimizasyonu	50
4.4.2. Teknik İyileştirme	50
4.4.3. Risk Yönetimi	51
5. TARTIŞMA	53
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	64
6.1. Uygulayıcılar için Öneriler	64
6.2. Gelecek Araştırmalar için Öneriler	64
KAYNAKLAR	66
EKLER.....	85
EK-1. Özgeçmiş	85
EK-2. Etik Kurul Onayı	86

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim sırasında ve tezimin her aşamasında her türlü konuda yardımını, bilgisini, deneyimini ve zamanını esirgemeyen sabırla danışmanlığımı yürüten, Daima mantıklı ve iyi yolları hedef gösteren Değerli Hocam ve Tez Danışmanım Doç. Dr. Faruk AKÇINAR'a ve ailesine sonsuz teşekkür ediyorum.

Tez izleme ve savunma sırasında tezin daha anlamlı hale gelmesinde Prof.Dr. Davut HANBAY, Prof. Dr. Betül AKYOL, Prof. Dr. Vedat ÇINAR ve Doç.Dr. Hüseyin Nasip ÖZALTAŞ'a değerli katkıları için teşekkür ederim.

Doktora tezimin daha anlamlı hale gelmesine katkı sunan Doç.Dr. Yalın AYGÜN, Dr. Öğretim Üyesi Hanifi KORKMAZ ve tezin analizleri konusunda yardımcı olan Hasan UCUZAL'a katkıları için teşekkür ederim.

TDK-2022/3053 proje numarası ile araştırmada için kullanılacak laboratuvar malzemelerinin ve sarf malzemelerinin teminini sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Yapılan saha testlerinde yer alan İnönü Üniversitesi Spor Bilimleri Fakültesi öğrencilerine ve tenis takımında yer alan sporculara katkıları için teşekkür ederim.

Bu süreçte her daim yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Bu zorlu ama öğretici yolculuk boyunca beni motive ederek desteğiyle her başarıma ortak olan çok kıymetli Aslı BERKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

ÖZET

Tenis Sporcularında Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Yapay Zekâ Tabanlı Performans Analiz Sistemi Geliştirilmesi

Amaç: Bu çalışma, tenis oynayan sporcuların teknik performanslarının nesnel biçimde değerlendirilmesini sağlamak amacıyla yapay zekâ tabanlı görüntü işleme tekniklerine dayalı bir değerlendirme sistemi geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu sistem, görüntü işleme tekniklerinden biri olan insan duruşu tahmini (pose estimation) yaklaşımı ile tenis hareketlerini ayrıntılı biçimde analiz etmeyi, aynı zamanda ITN [International Tennis Number (Uluslararası Tenis Numarası)] testi gibi objektif saha verileriyle elde edilen bulguları birleştirerek sistemin geçerliliğini ve güvenilirliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Materyal ve Metot: Çalışmaya, katılım koşullarını sağlayan 15 sporcu dâhil olmuştur. Araştırma, nicel ve deneysel bir yöntemle yürütülmüştür. Bunun için tenis oynayan sporcuların çeşitli açılardan çekilmiş video görüntüleri toplanmış, yapay zekâ destekli derin öğrenme modelleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Analizlerde güncel yapay zekâ modeli olan *YOLOv8-Pose* tercih edilmiştir.

Bulgular: Araştırma kapsamında geliştirilen bilgisayarla görü tabanlı poz tahmini sistemi, tenis sporcularının hareket dinamiklerini analiz etmek amacıyla kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, modelin hem teknik doğruluğunu hem de uygulama potansiyelini ortaya koymuştur. Sistem, performans metrikleri ve biyomekanik değerlendirmeler açısından tatmin edici sonuçlar üretmiş; sporcuların teknik davranışlarının nesnel verilerle analizine önemli katkı sağlamıştır. Elde edilen mAP@50 0.941 ve mAP@50–95 0.772 değerleri, modelin basit ve karmaşık pozisyonları yüksek doğrulukla tespit edebildiğini göstermiştir. Ortalama precision (kesinlik) 0.867 ve recall (duyarlılık) 0.884 skorları ise modelin hem yanlış pozitif tahminleri azalttığını hem de gerçek pozları başarıyla yakaladığını kanıtlamıştır.

Sonuç: Bu çalışma, *YOLOv8-Pose* modelinin, tenis sporcularının hareket dinamiklerini analiz etmede hem teknik doğruluk hem de uygulama pratikliği açısından güçlü bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Model, karmaşık vuruş desenlerini yüksek hassasiyetle tanımlayabilmiş; özellikle mAP, precision ve recall değerleri bakımından başarılı bir performans sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Tenis, Görüntü İşleme, Yapay Zekâ, Performans Analizi.

ABSTRACT

Development of an Artificial Intelligence-Based Performance Analysis System Using Image Processing Techniques in Tennis Players

Aim: This study aims to develop an evaluation system based on artificial intelligence-based image processing techniques to objectively evaluate the technical performance of tennis players. This system aims to analyze tennis movements in detail using the pose estimation approach, one of the image processing techniques, and to demonstrate the validity and reliability of the system by combining the findings obtained from objective field data such as the ITN (International Tennis Number) test.

Material and Method: Fifteen athletes who met the participation criteria were included in the study. The research was conducted using a quantitative and experimental method. For this purpose, video images of tennis players were collected from various angles and analyzed using artificial intelligence-supported deep learning models. The YOLOv8-Pose model was specifically chosen.

Result: The computer vision-based pose estimation system developed in the study was used to analyze the movement dynamics of tennis players, and the results obtained demonstrated both the technical accuracy and application potential of the model. The system produced satisfactory results in terms of performance metrics and biomechanical evaluations, contributing significantly to the objective analysis of athletes' technical behaviors. The obtained mAP@50 0.941 and mAP@50–95 0.772 values demonstrate that the model can detect both simple and complex positions with high accuracy. The average precision (accuracy) score of 0.867 and recall (sensitivity) score of 0.884 prove that the model both reduces false positive predictions and successfully captures real poses.

Conclusion: This study has demonstrated that the YOLOv8-Pose model is a powerful tool for analyzing the movement dynamics of tennis players in terms of both technical accuracy and practical application. The model was able to identify complex stroke patterns with high precision, demonstrating successful performance, particularly in terms of mAP, precision, and recall values.

Keywords: Tennis, Image Processing, Artificial Intelligence, Performance Analysis

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AR	: Artırılmış Gerçeklik
CNN	: Evrişimsel Sinir Ağları
FLOP	: Saniyede Farklı Kayan Nokta İşlemi
FN	: Yanlış Eksi
FP	: Yanlış Artı
FPS	: Saniyedeki Kare Sayısı
GCN	: Graf Evrişik Ağları
IMU	: Eylemsizlik Ölçü Birimi
ITF	: Uluslararası Tenis Federasyonu
ITN	: Uluslararası Tenis Numarası
KNN	: K-En Yakın Komşular
LSTM	: Uzun Vadeli Hafıza Ağları
Map	: Ortalama Doğruluk Metriği
ML	: Makine Öğrenmesi
ML	: Makine Öğrenmesi
MSE	: Ortalama Hata Kare
ROM	: Hareket Aralığı
TP	: Doğru Artı
VR	: Sanal Gerçeklik
YSA	: Yapay Sinir Ağları
YZ	: Yapay Zekâ

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
Şekil 3.1. Forehand vuruşu sırasında üst kamera kaydı.	28
Şekil 3.2. Forehand vuruşu sırasında sağ yan kamera kaydı.	28
Şekil 3.3. Forehand vuruşu sırasında sol yan kamera kaydı.	29
Şekil 3.4. Servis vuruşu sırasında sol yan kamera kaydı.	29
Şekil 3.5. Forehand vuruşu sırasında üst kamera kaydı.	30
Şekil 3.6. Servis vuruşu sırasında üst kamera kaydı.	30
Şekil 3.7. Servis vuruşu sırasında üst kamera kaydı.	31
Şekil 3.8. Backhand vuruşu sırasında sağ kamera kaydı.	31
Şekil 3.9. Backhand vuruşu sırasında üst kamera kaydı.	32
Şekil 3.10. Servis vuruşu sırasında sağ kamera kaydı.	32
Şekil 3.11. Servis vuruşu sırasında üst kamera kaydı.	33
Şekil 3.12. Servis vuruşu sırasında üst kamera tam saha görünümü.	33
Şekil 3.13. Yolo8 Pose Model Mimarisi	36
Şekil 3.14. 17 temel anahtar nokta	38

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
Tablo 4.1. YOLOv8-Pose modeline ait mimari özellikler ve işlem hızı.	46
Tablo 4.2. Algılama başarımı metrikleri (mAP, Precision, Recall)	47
Tablo 4.3. Sporculara ait eklem açısı dağılımları ve yüzdelik değerler	48
Tablo 4.4. Vuruş tipine göre dağılım ve tutarlılık oranları.	49



1. GİRİŞ

Günümüzde sporda başarıya ulaşmak, yalnızca fiziksel yeterlilikle değil, bilimsel, teknolojik ve veri temelli yaklaşımların etkin biçimde uygulanmasıyla mümkün hale gelmektedir. Spor bilimlerinde güncel başarı ölçütleri, artık sadece saha içi gözlemle değil, teknoloji destekli analizlerle belirlenmektedir. Teknolojik yenilikler, sporda ölçüm ve değerlendirme yaklaşımlarını kökten değiştirmekte; geleneksel yöntemlerin ötesine geçilmesini sağlamaktadır. Performansa etki eden çoklu faktörlerin bilimsel yöntemlerle çözümlenmesi, günümüz spor anlayışında kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Atletik performansı artırmaya yönelik bu gelişmeler, spor bilimleri açısından da önemlidir.

Atletik performansı artırmaya yönelik yaklaşımlar, artık yalnızca fiziksel gelişimle sınırlı kalmamakta; teknolojik gelişmelerden yararlanan daha kapsamlı ve veriye dayalı yaklaşımlar da hızla öne çıkmaktadır. Bu bağlamda tenis gibi dinamik ve teknik olarak karmaşık sporlar için yapay zekâ ve görüntü işleme tekniklerinin etkin şekilde kullanımı, antrenman verimliliğini yükseltmiş; sporcuların gelişiminin somut bir şekilde takip edilmesi açısından vazgeçilmez bir hale gelmiştir (1, 2).

Yüksek tempolu vuruş dizileri, hızlı karar verme gereklilikleri ve teknik çeşitliliği nedeniyle tenis, bilişsel ve motor becerilerin sürekli ölçülmesini gerektiren sporlar arasında yer almaktadır (3-5). Tenis performansında teknik hareketleri sadece sayısal olarak değil, aynı zamanda görsel ve uzamsal verilerle analiz etme yeteneği, oyuncuların motor becerilerinin gelişimini optimize etmek için büyük önem taşımaktadır. Bu durumda geleneksel analitik yöntemlerin öznellik ve zaman alıcı süreçler nedeniyle yetersiz kaldığı açıkça görülmektedir (1, 4). Bu noktada yapay zekâ destekli görüntü işleme sistemleri, performans analizinde nesnellik ve zaman etkinliği açısından önemli gelişmeler sunmaktadır (3).

Video işleme tekniklerindeki son gelişmeler, bu tür sistemlerin hem antrenman sahalarında hem de yarışma ortamlarında kullanılabilirliğini artırmış; anlık geri bildirim mekanizmaları sayesinde sporcu gelişimini belirgin şekilde hızlandırmıştır (1, 3). Ayrıca derin öğrenme tabanlı yöntemler, özellikle insan duruşu tahmini (pose estimation) sayesinde sporcunun vücut pozisyonlarını son derece hassas analiz ederek teknik analiz sürecini büyük ölçüde geliştirmiştir (4).

Teniste vuruş anındaki duruş ve hareket kalıplarının ayrıntılı olarak değerlendirilmesi, teknik hataların zamanında tespiti ve potansiyel yaralanma risklerinin

önceden belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Teniste performans analizi, tarihsel olarak gözleme dayanmakta sonrasında ise sayısal veri toplamaya yönelik notasyon analizleriyle gelişmiştir (1, 4, 6). Ancak bu yöntemlerin zaman alıcı olması, gözlemciye bağlı hatalara maruz kalması ve performansın kapsamlı değerlendirilmesindeki kısıtlamaları nedeniyle modern spor bilimlerinin gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalmıştır (1, 4). Günümüzde bu yöntemler taktik, teknik, psikolojik ve fizyolojik olarak incelenen çok boyutlu değerlendirmelere dönüşmüştür. Bu bağlamda görüntü işleme, video analizi ve giyilebilir sensör teknolojilerinden elde edilen verilerin bütünleşmiş kullanımı, analiz süreçlerini daha nesnel, çok boyutlu ve zaman açısından verimli hale getirmiştir (1-3).

Tenis performans analizindeki tüm gelişmelere rağmen yapay zekâ tabanlı görüntü işleme tekniklerinin tenis performans analizine sistematik ve kapsamlı bir şekilde dâhil edilmesinde literatürde belirgin eksiklik gözlenmektedir (4). Özellikle sporcuların üç boyutlu duruş ve hareketlerini analiz etmek amacıyla derin öğrenme temelli poz tahmin yöntemlerinin yaygın olarak kullanılmaması önemli bir eksiklik olarak belirlenmiştir (4). Ayrıca Uluslararası Tenis Federasyonu tarafından geliştirilen ITN [International Tennis Number (Uluslararası Tenis Numarası)] gibi nesnel değerlendirmelerin ve yapay zekâ analizlerinin birlikte kullanımı, literatürde henüz yeterince yer bulamamıştır (4).

Literatürde yapay zekâ tabanlı görüntü işleme yöntemlerinin tenis gibi dinamik ve çok boyutlu sporlarda performans analizine dâhil edilmesine yönelik çalışmalar sınırlı kalmakta, özellikle poz tahmini temelli sistemlerin saha testi verileriyle bütünleşik olarak değerlendirilmesine dair sistematik yaklaşımların eksikliği dikkat çekmektedir.

Bu çalışma, tenis oynayan sporcuların teknik performanslarının nesnel biçimde değerlendirilmesini sağlamak amacıyla yapay zekâ destekli görüntü işleme yöntemlerini esas alan bir değerlendirme sistemi geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu sistem, görüntü işleme tekniklerinden biri olan *pose estimation* yaklaşımıyla tenis hareketlerini detaylıca analiz etmeyi, aynı zamanda ITN testi gibi objektif saha değerlendirmeleriyle elde edilen bulguları birleştirerek sistemin geçerliliğini ve güvenilirliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, aynı zamanda literatürdeki bu boşluğun giderilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu bağlamda çalışmada aşağıdaki hipotezler test edilmiştir:

H1: Pose estimation tabanlı görüntü işleme teknikleri, tenis sporcularının vuruş hareketlerini yüksek doğrulukla sınıflandırabilir.

H2: Görüntü işleme ile elde edilen teknik performans verileri, ITN saha testi sonuçlarıyla anlamlı düzeyde ilişkilidir.

H3: Geliştirilen sistem, antrenörlerin geleneksel gözlem yöntemlerine göre daha hızlı ve daha tutarlı geri bildirim sağlamaktadır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Tenis

Tenis, her yaşta ve seviyede rekabeti ve katılımı teşvik ettiği için yaşam boyu süren bir spor olarak tanımlanmaktadır (7). Bir başka tanıma göre tenis; strateji, çevresel koşullar, zihinsel beceriler ve teknik gibi çeşitli bileşenlerin etkili biçimde uygulanmasını gerektiren, yüksek düzeyde motor ve açık beceriler isteyen karmaşık ve dinamik bir spordur (8-10). Bu bileşenlerin etkili kullanımı, oyuncuların performans düzeyini artırarak maç kazanma olasılıklarını yükselttiğini düşündürmektedir.

19. yüzyılın sonlarından günümüze bakıldığında tenis, Olimpiyatlar ve dört Grand Slam turnuvasının etkisiyle hızla popülerleşmiş ve önemli bir etkinlik haline gelmiştir (11). Tenisin izlenme ve katılım düzeyindeki artışta sosyal medya ve teknolojiye büyük dönüşümün etkili olduğu düşünülmektedir. Uluslararası Tenis Federasyonu'nun (ITF) 2024 raporuna göre tenis oynayan kişi sayısı 2019'da 84.4 milyon iken 2024'te 106 milyona ulaşmıştır. 2019 ve 2024 verileri karşılaştırıldığında tenis sporunda profesyonel oyuncu sayısı %8 artarak 3.931'e, ergen ve genç oyuncu sayısı ise %30 artarak 9.531'e yükselmiştir (12). Beş yıllık değişim oranlarına bakıldığında performans tenisinin ne kadar geliştiği, özellikle genç sporculardaki bu artış, tenis sporunun altyapı düzeyinde büyüme gösterdiğine işaret etmektedir.

Teniste üç ana oyun yüzeyi bulunur: Sert zemin, toprak zemin ve çim zemin. Grand Slam turnuvalarına baktığımızda Amerika Açık ve Avustralya Açık, sert zeminde; Wimbledon çim zeminde, Fransa Açık ise toprak zeminde oynanmaktadır (13).

2.1.1. Teniste Yaş Gruplarına Göre Sporcu Gelişimi ve Eğitim Süreçleri

Tenis eğitimi, zaman içinde yayılan ve yaşa göre 4 aşamaya ayrılan karmaşık bir süreç olarak tanımlanır. Birinci aşamada çocuklar, 5-6 yaşında tenis eğitimine başlamaktadır. Bu dönem, tenis becerileri, temel hareket becerileri ve fiziksel gelişimin birlikte geliştiği dönemdir. Robinson ve arkadaşları, temel hareket becerilerini şöyle tanımlamaktadır: "Temel hareket becerileri, çocukların motor gelişimlerini etkileyen önemli bir aşamayı ifade etmektedir" (14). Bu beceriler, genellikle çocukluk döneminde öğrenilen ve yaşam boyu kullanılan temel fiziksel yetenekleri içermektedir. Temel hareket becerilerinin gelişimi, çocukların motor becerilerini koordine etme, denge kurma, kuvvet uygulama ve esneklik kazanma sürecini içermektedir. Çocukların bu süreçte

sadece tenis becerileri değil, aynı zamanda motor becerileri ve fiziksel özellikleri de gelişmektedir. Genç yaş gruplarında, özellikle son beş yılda, oyuncu katılımının arttığı gözlenmektedir. Bu artış, tenis sporunun erişilebilirliğinin arttığını ve tabana yayılma eğiliminin güçlendiğini göstermektedir. Gallahue, Lopes ve arkadaşlarına göre motor beceri, “öğrenilmiş hedefe yönelik bir ya da birden fazla vücut parçasının hareketi ya da istemli hareket görevi olarak belirtilmektedir” (15, 16). 9-12 yaş arası 2. aşama, motor beceri gelişimi ve tenis hareketlerinin mükemmelleştirilmesi açısından kritik bir dönemdir. Bu aşamada motor beceriler ve fiziksel özellikler geliştirilirken tenis teknik boyutu da en üst seviyeye çıkarılmaya çalışılır. 3. ve 4. aşamalarda ise oyuncular, motor koordinasyonlarını geliştirir ve ergen ile genç sporcular rekabet ve performansa odaklanır (17). Bu aşamalarda sporcuların turnuvalarda başarılı olmaları için yalnızca teknik ve fiziksel özelliklerin değil, taktiksel düşünmenin de gerekliliği vurgulanır. Gençlik dönemi ise daha zorlu ve kapsamlıdır. Genç tenisçiler, yılda 15-25 arasında turnuvaya katılırken kızların ilk uluslararası deneyimi yaklaşık 15, erkeklerin ise yaklaşık 16.5 yaşlarında gerçekleşir (18, 19). Genç tenisçiler, genellikle haftada 15-20 saat, günde birkaç kez antrenman yapmaktadır. Bu yoğun programda performans ve gelişimi optimize etmek için antrenman ile maç yüklerinin bilimsel olarak belirlenmesi önemlidir (20). Tenis dalında uzun vadeli sporcu gelişim modelleri incelendiğinde erken başarının temel hareket becerilerinin kazanılması ve fiziksel aktiviteye karşı olumlu tutum geliştirilmesinin belirli bir oyun seviyesine ulaşmayla ilişkili olduğu görülmektedir (21-23).

2.1.2. Teniste Temel Vuruşlar

Teniste üç temel vuruş vardır: Servis, forehand ve backhand. Bunlar, teniste en yaygın kullanılan vuruşlardır. Diğer vuruşlar ise vole ve smaçtır. Tüm puanlar servisle başlar. Modern teniste vuruşların yaklaşık %76-81’i arka çizgi gerisinde forehand ve backhand içeren ralliler sırasında gerçekleşir (24, 25). Servis, puana başlamak, forehand ve backhand ise oyunda kalmak için kritiktir. Teniste servis; nöromüsküler, antropometrik, biyomekanik, teknik ve taktik parametrelerden etkilenir ve modern tenis maçlarının temposunu ve sonucunu belirlemede en önemli vuruşlardan biri olarak değerlendirilir (26-28). Topla raket arasındaki temas anında raketin yüzeyinin topa göre konumuna bağlı olarak üç ana servis türü vardır ve bunlar düz, spin ve slice olarak adlandırılmıştır (29). Sporcular, ilk ve ikinci servis durumlarına göre farklı servis teknikleri kullanabilir. Servisin temel unsurları arasında raketin hızı ve yönü, topun darbe

anındaki yüksekliği, raketin ağırlığı, raketin açısıyla topun yönü ve hızı yer almaktadır (30). Profesyonel tenis oyuncularında servis hızlarının 200 km/s'yi aştığı görülmüş ve bunu başarmak için kinetik zincirin ayaklardan pelvis, gövde, üst kol, ön kol, el ve rakete doğru ilerlemesi gerektiği tespit edilmiştir (31). Teniste her vuruş için kritik olan kinetik zincir kavramı, genellikle proksimalden distale doğru sırayla gerçekleşen tüm vücut hareketi olarak tanımlanmaktadır (27, 32). Kinetik zincirin bozulması, servis sırasında top hızında düşüşe ve omuz yaralanmalarına neden olabilir.

Tüm vuruş hareketlerinin %25'ini oluşturan forehand, tenisin en sık uygulanan ve ikinci derecede kritik öneme sahip temel vuruşu olarak belirlenmiştir (33-35). Oyuncu, hareketi kalçaların ve omuzların geri dönüşüyle başlatmakta ve baskın üst ekstremité (raket kolu) yarım dairesel bir açıyla geri çekmekte ve topa bağlı olarak nötr, yarı açık veya açık bir duruş sergilemektedir (36). Tenise özgü duruşlar, sporcunun topa açı verme biçimine ve topu atacağı konuma göre değişir. Vuruş aşamasında raket, bacakların itiş, omuz, gövde ve kalçanın dönüşüyle ileri doğru hareket ettirilir. Vuruş, vücudun önünde farklı yüksekliklerde gerçekleştirilebilir (37) . Top, rakete temas ettiğinde topun momentumu ve raket merkezine olan uzaklığı, döner bir tork oluşturarak hareket enerjisini kola ve bileğe iletir. Bu tork, raket kafası hızının vücudun açısal hareketiyle kola ve bileğe aktarılmasını sağlar. Böylece kinetik zincir, verimli bir şekilde çalışır (38-40). Raket, dominant olmayan omuzun üzerine gelene kadar ilerler. Bu hareket, forehand vuruşunun son aşaması olan bitiriş tamamlamaktadır (41). Bu aşamaların eksiksiz yapılması iyi ve güçlü bir forehand vuruşu için önemlidir.

Teniste backhand vuruşu, tek veya çift elle yapılmakta olup son 30 yılda tek elden çift ele doğru bir evrim gözlenmiştir. Dünya sıralamasında ilk 10'da yer alan kadın ve erkek sporcuların tamamının güncel verilere göre çift el backhand kullandığı belirlenmiştir (40, 42). Sporculardaki bu değişimin, çift el backhand vuruşunun tek ele göre güç, isabet ve kontrol gibi özellikleri daha kolay sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Backhand, sporcunun baskın olmayan eliyle tek veya çift elle yapılan bir vuruş türü olup, hazır pozisyon, raketin geriye açılması, topa temas, vuruş, takip ve bitiriş aşamalarından oluşmaktadır (43). Yapılan analizler, backhand ve forehand vuruşlarının benzer kas gruplarını aktive ettiğini göstermektedir. Ancak bu durum, daha fazla gövde rotasyonu gerektirdiği gibi iki elle yapılan backhand vuruş gücünün büyük ölçüde baskın olmayan kol ve bilekten kaynaklandığını ortaya koymaktadır (43).

2.1.3. Teniste Performans ve Gereksinimleri

Tarihsel süreçte tenis, yalnızca teknik becerilerin ön planda olduğu bir branştan, fiziksel, psikolojik, teknik, taktik öğelerle birlikte patlayıcı kuvvetin önemli olduğu karmaşık bir spora dönüşmüştür. Bu dönüşüm, tenis performansının yalnızca teknik değil, psikolojik ve taktik yönleriyle birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Modern müsabakalar; hızlı tempo, yüksek vuruş hızı, etkili servis karşılama ve çoklu taktiklerle çeşitlilik göstermektedir (44-46). Günümüzde tenis, tempolu ve yüksek yoğunluklu formatıyla strateji, beceri ve atletizmin bütünleştiği bir spor dalı olarak tanımlanmaktadır.

Teniste performansı oluşturan faktörlere bakıldığında şu dört ana başlıktan sözü edilebilir: Psikolojik boyut, zihinsel dayanıklılık, odaklanma ve stratejik düşünme. Literatüre bakıldığında bu yeteneklerin, oyuncunun stres yönetimi, karar verme ve dikkat düzeylerini artırdığı tespit edilmiştir (47). Fiziksel boyut; kuvvet, dayanıklılık, esneklik ve çeviklik gibi motor becerileri kapsamaktadır. Bu özellikler hem yüksek yoğunluklu rallileri (bir puanı oluşturan vuruşların toplamı) sürdürmek hem de yaralanmaları önlemek açısından kritik bir öneme sahiptir (48). Teknik boyut; servis, return, forehand, backhand, slice ve spin gibi temel vuruş mekaniğinin yanı sıra etkin ayak hareketlerini içermektedir. Son olarak taktiksel boyut ise rakip eğilimlerinin analizi ve puan yapılandırmasının stratejik yönetimini kapsamaktadır (47).

Teniste Fiziksel Gereksinimler

Teniste yüksek performans; kuvvet, sürat, dayanıklılık, patlayıcı güç, çeviklik, denge, esneklik ve koordinasyon gibi çoklu fiziksel bileşenlerin etkileşimine dayanmaktadır (49). Forehand, backhand, servis ve vole gibi vuruşların etkin uygulanabilmesi hem kaba hem de ince motor becerilerin uyumlu çalışmasıyla mümkündür (50, 51). Kaba ve ince motor becerilerin birlikte kullanımı teniste performans açısından belirleyici bir unsur olarak kabul edilmektedir.

Uluslararası Tenis Federasyonu (ITF), şampiyonluk performansında belirleyici faktörleri reaksiyon süresi, sürat ve motor koordinasyon olarak tanımlamıştır. Modern tenisin hızlı yapısı nedeniyle bu özelliklerin performans açısından kritik olduğu kabul edilmektedir. Deneyimli antrenörler ise kinestetik farkındalık ve reaksiyon yeteneğini en önemli motor koordinasyon becerileri olarak vurgulamıştır (52, 53).

Tenis müsabakalarına bakıldığında bir puan almanın ortalama süresi 3-10 saniye arasındadır. Bu süreçte sporcuların ortalama 8-15 metre sprint atarak 3-4 kez yön değişiminde bulundukları tespit edilmiştir. Vuruşları yapabilmek için sporcularda sprint,

yön değiştirme, ani dur kalk ve denge gibi fiziksel özelliklerin st düzeyde gelişmiş olması gerekmektedir (45, 54).

Oyuncuların stratejileri, teknik ve taktik kararları ile oyun yüzeyi ve hava koşulları gibi faktörler, tenis maçlarının sonuç ve süresinin öngörülemez olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle maçlar, beş saate kadar sürebilmekte ve tenis için dayanıklılığın kritik bir fiziksel gereksinim olduğunu göstermektedir (45, 54, 55). Hibbs ve arkadaşları dayanıklılığı, sporcuların uzun süreli fiziksel aktivite sonucu ortaya çıkan yorgunluğa bedensel ve zihinsel yönden direnebilme yetisi olarak tanımlamışlardır (56). Ma süreleri, hava koşulları ve sporcuların benzer seviyelerde olması nedeniyle değişkenlik gösterebilir; bu durumda iyi bir dayanıklılık seviyesi, sporcunun performans düşüşünü önleyebilir.

Teniste kuvvet parametresinin özellikle kollar ve gövdedeki kas gücünün forehand, backhand, servis ve genel atletik performansta vuruş doğruluğunu ve top hızını artırdığı tespit edilmiştir (57). Kuvvet, bir yandan kasın bir dirence karşı kasılabilme veya bu dirence dayanabilme yeteneği olarak tanımlanırken, diğer yandan da kasın kasılma ve gevşeme evreleri boyunca dış bir dirence etkili biçimde karşı koyabilme kapasitesi olarak açıklanmıştır (58). st ekstremitte kuvvet antrenmanlarının, etkili forehand ve backhand için çok önemli olan hız ve denge tenis yeteneklerini iyileştirdiği bulunmuştur (59). Özellikle el kavrama kuvveti de raket sporlarında önemli bir parametre olarak görülmektedir.

Esneklik, sporcuların bağ ve kas yaralanma riskini engelleyerek daha geniş bir aralıkta hareket etmelerine imkân tanımaktadır. İngraham, esnekliği, eklem ya da eklem gruplarının maksimal düzeyde hareket edebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (60). Bacak, kol ve raket arasındaki koordinasyonun gerekli olduğu teniste dinamik esnekliğin geliştirilmesi, vuruş performansının da gelişmesini sağlamaktadır (61).

Fiziksel gereksinimlerden sürate bakıldığında süratin servis gücü, reaksiyon süresi, yön değiştirme yeteneği ve oyun içi hareketliliği etkileyen temel faktörlerden olduğu tespit edilmiştir (62-64). Sürat, motorik bir aksiyonu mevcut bir ortamda en kısa sürede tamamlayabilme yetisi olarak tanımlanmıştır (65). Grosser ise sürati şu şekilde ifade etmiştir: “Bilişsel sürece dayalı, en büyük irade gücünün katkısıyla belirli koşullarda kas-sinir sisteminin mümkün olan en büyük hızla etki ve hareket süresini gerçekleştirebilme yeteneğidir.” (66). Turner, evikliği denge, hız, kuvvet ve kas-sinir koordinasyonu iç birliğiyle iki nokta arasında vücudu hareket ettirme ve yön değiştirme becerilerini mümkün olduğunca kolay, hızlı, akıcı ve kontrollü bir şekilde yapabilme

olarak tanımlamaktadır’’ (67). Sürat ve çevikliğin, hızlı ayak hareketleri, hızlı yön değişiklikleri, kort konumlanması ve gelen topa pozisyon alma gibi performans unsurlarında kritik olduğu belirlenmiştir. Rakip hareketlerine hızlı tepki verebilmek için çeviklik ve süratin performansta belirleyici olduğu görülmektedir (68). Tenis gibi hızlı sporlarda bu özellikler, sporcular için önemlidir ve performansı üst düzeye çıkarabilir.

Tenise özgü duruşlarda denge, stabilitenin korunması, ani yön değişikliklerinde stratejik konumlandırmanın sağlanması ve enerjinin yerden alınarak kinetik zincir yoluyla daha güçlü ve isabetli vuruş yapılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca vücudun kütle merkezinin kontrolü, etkili performans için önemlidir (69, 70). Nasher dengeyi, vücudun ağırlık merkezinin konumunu destek tabanı üzerinde dikey olarak muhafaza ederek görsel, vestibüler ve somatosensorik yapılardan hızlı, sürekli geri bildirim alma ve ardından düzgün ve koordineli nöromüsküler eylemleri yürütme işlemi şeklinde tanımlar (71). Tenis, oyuncuların ani yön değişiklikleri ve yanal hareketler yapmasını gerektirdiğinden ayak bileklerine yüksek stres binmektedir. Bu durum, ayak bileği yaralanmalarının sporcular için önemli bir sorun olduğunu göstermektedir. Yaralanmalar, genellikle zayıf denge ve yanlış inişlerden kaynaklanır. Tenis yaralanmalarının önlenmesinde denge gelişimi bu nedenle büyük önem taşımaktadır (72).

Bir uyarıyı algılamak ve tepki süresi başlatmaya reaksiyon zamanı denmektedir. Tenis gibi dinamik ve oyununun hızlı olduğu sporlarda reaksiyonun çok önemli olduğu tespit edilmiştir (73). Davids ve ark., sezinleme zamanını, genel olarak herhangi bir rota izleyen obje veya nesnenin sonlanma noktasını ve bu noktaya ne zaman geleceğini tahmin etme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (74). Sezinleme zamanı, sporcuların maç içerisinde rakiplerinin hareketlerini, vuruş yeri ve hızını tahmin ederek doğru konumda olmasını sağlamak ve tepki verme süresini azaltmaktadır. Dolayısıyla sezinleme zamanı tenis gibi hız, çeviklik ve reaksiyon becerilerinin öne çıktığı sporlarda çok önemli bir beceri olarak görülmektedir (75). Rakibin topa vurmasıyla reaksiyon, topu nereye atacağıyla ilgili de sezinleme zamanı, önemli özellikler olarak öne çıkmaktadır.

Teniste Psikolojik Gereksinimler

Fiziksel gereksinimlerin yanı sıra, sporcuların performansını etkileyen bir diğer temel unsur da psikolojik faktörlerdir. Teniste psikolojik gereksinimlere bakıldığında baskıyı yönetebilme, odaklanmayı sürdürülebilme, duyguları düzenleme, motivasyon, özgüven, zihinsel hazırlık ve maç içi psikolojik momentum gibi öğeler öne çıkmaktadır (76, 77). Bu özelliklerle birlikte sporcuların stresi kontrol etmesi, farklı rekabet

düzeylerine uyum sağlaması ve teknik-taktik becerilerini en üst düzeyde göstermesine olanak tanıdığı düşünülmektedir. Teniste momentum; puan, oyun veya setlerle değişebilir ve bu da sporcunun kazanma, kaybetme durumunu belirleyebilir.

Bu psikolojik yönlerin geliştirilmesi, sporcunun müsabaka sırasında daha iyi taktik kararlar almasına ve rakibine üstünlük kurmasına doğrudan katkıda bulunmaktadır (78). Tenis, farklı tekniklerin, gerçek zamanlı taktik çözümlerin ve yoğun baskının aynı anda yönetildiği bir spor olarak ifade edilmektedir. Tenis, yalnızca fiziksel yeterlilik değil, aynı zamanda hızlı tepki verme ve kort içi bilgiyi verimli işlemeye dayalı doğru karar alma kapasitesi gerektirmektedir (79). Antrenman programlarına düzenli psikolojik hazırlık çalışmalarının eklenmesi, fiziksel, teknik ve taktik çalışmaları tamamlayarak genel performansı belirgin biçimde artırabilir.

Teniste Teknik ve Taktik Gereksinimler

Spor performansında etkili olan faktörlere bakıldığında sadece fiziksel, fizyolojik veya psikolojik değil, teknik ve taktik gereksinimler de performans analizi için önemlidir ve bunlar, performansın optimum olmasını sağlayan faktörler olarak tespit edilmiştir (80, 81).

Tenisin taktiksel becerilerine ilişkin bir meta-analiz çalışmasında, en önemli değişkenler; eğitim, performans ve karar verme olmak üzere üç boyutta incelenmiştir. Bu beceriler; beklenti, oyun bilgisi, strateji, durumsal farkındalık, uygulama, oyuncu beceri seviyesi, oyuncu kişiliği ve sorunun tespiti olmak üzere sekiz temel özelliklerle tanımlanmıştır (82). Bu değişkenler, sporcuların fiziksel ve teknik özelliklerin ötesinde oyunda kalmalarını veya galip gelmelerini sağlayan unsurlar olarak değerlendirilebilir. Üst düzey tenis müsabakalarında başarı için taktik ve stratejiler belirleyici rol oynar. Tenis stratejisi ise servis, servis karşılama, ralli, vole ve voledeki oyuncuya karşı oyun gibi beş oyun durumuna dayalı vuruşlar ile oyun kalıplarının kombinasyonuna bağlıdır (19, 83). Beş oyun durumu, müsabaka sırasında sporcuların yaptıkları vuruşların bütünü olarak da düşünülebilir. Teniste oyuncuların taktik ve teknik davranışları değişkenlik gösterebilir. Oyun stratejileri ise rakibin davranışını hesaba katmadan önceden tanımlanmış ve belirli bir süre veya müsabaka boyunca sabit bir şekilde devam edebilir (84). Müsabakayı kazanabilmek için yaygın olan stratejilerden biri, geri çizgiden pasif bir oyunla kendi hatalarını azaltmaktır. Bununla birlikte tersi olan aktif strateji ise kortta keskin açılarla güçlü vuruşlar yaparak rallilere hâkim olmak, rakibi hatalara zorlamak veya puanları doğrudan kazanmak olarak bulunmuştur (85, 86). Stratejilerden biri,

oyunda kalıp rakibin hata yapmasını beklemektir; diğeri ise hücum ağırlıklı oynayarak rakibi hataya zorlamak veya doğrudan puan kazanmaktır.

Spor performansında teknik beceriler, performans seviyesini belirlemektedir. Buna ek olarak sporcular, geçmiş performanslar hakkında açıklama yapabilir ve gelecek performanslarını da tahmin edebilir (87). Ergenlik ve gençlik döneminde mükemmel hale gelen teknik, sonraki dönemlerde yerini oyun stiline bırakmaktadır. Literatürde yüksek performans seviyesindeki tenisçilerin top hızlarının yüksek, hata oranlarının düşük ve isabet yüzdelerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir (48). Forehand, backhand, servis ve vole gibi çeşitli teknik hareketlerde artan top hızının rakibin topu başarılı bir şekilde geri döndürme süresini azaltarak onu hataya zorladığı bulunmuştur (88). Bir müsabakada sporcunun kontrolü eline alabilmesi için isabet oranının yüksek olması, kortun belli bölgelerine farklı açılar ile vuruşlar yapabilmesi ve rakibin hata yapmasını sağlaması gerekmektedir (89). Ayrıca spin, slice veya flat gibi farklı vuruşlar, rakibin hata yapmasına neden olabilir. Dönüş hızı ise topun fileyi aşmasını, kortta kalmasını ve topun derine düşerek rakibi zorlamasını sağlar (90). Teniste optimum performans için raket tutuşu (vuruş türüne göre), duruş (açık, kapalı, yarı açık) ve ayak çalışması gibi temel teknik becerilerin geliştirilmesini önermektedir (91). Sporcunun açık, kapalı veya yarı açık duruşlarda bulunmasının da vuruşları etkilediği düşünülmektedir.

2.1.4. Teniste Performans Analizi

Teniste performans analizi, sporcuların mevcut fiziksel, psikolojik, teknik ve taktik durumlarını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu performans parametreleri, sporcunun eksiklerini gidermek ve sakatlık riskini azaltmak açısından spor bilimlerinde önemli bir araçtır. Teknolojinin spora daha fazla dâhil olmasıyla bu analizler büyük bir dönüşüm geçirmiştir. Sporcuların hem kendi hem de rakiplerinin performans verilerini incelemesi, müsabakalara hazırlık sürecinde strateji geliştirmeyi kolaylaştırmakta ve rakibin performansını daha iyi öngörmelerine katkı sağlamaktadır (92-94). Antrenörler ve sporcular biyomekanik, teknik, taktik, fizyolojik ve psikolojik faktörleri analiz ederler. Bu değerlendirmeler hem antrenman sürecini hem de turnuva stratejisini belirlemede yol gösterici olmaktadır (45, 95). Bu faktörlerin analiz edilmesi ve değerlendirilerek geleceğe yön vermesi, sporcu performansının maksimum seviyeye çıkmasını sağlayabilir.

Teniste performans analizi ilk olarak notasyonel analiz olarak başlamış ve beş ana hedef belirlenmiştir. Bu hedeflere bakıldığında taktik değerlendirme, teknik değerlendirme, hareket analizi, bir veri tabanı ve modellemenin geliştirilmesi, antrenör

ve sporcular için eğitim amaçlı kullanım olarak incelenmiştir (96). Geleneksel performans analizi, ağırlıklı olarak manuel veri toplama, öznel gözlem teknikleri ve standart istatistik modellerine dayanmaktadır. Kanıtlanmış etkinliklerine rağmen bu yöntemler genellikle uygulama, yorumlama için önemli miktarda zaman ve çaba gerektirmektedir (96-98). Bu modeller, etkili kullanılsa da spor performansının karmaşık ve çok faktörlü yapısını yeterince yansıtamamaktadır. Spor bilimlerinde yaşanan teknolojik gelişmeler, performans analizinde nesnelliği artıran, gerçek zamanlı ve çok boyutlu değerlendirme imkânı sunan yeni bir dönemi başlatmıştır (99-101). Önceki analiz yöntemleri, sporcuların performansını tüm parametreleriyle değil, sınırlı açılardan değerlendirmiş; bu da sübjektifliğe yol açarak performans düzeylerinin tam belirlenmesini zorlaştırmıştır.

Yapay zekâ, artırılmış ve sanal gerçeklik, performans analizine yeni bir boyut kazandırarak karmaşık verilerin anlaşılabilir hale gelmesini sağlamıştır. Bunun sonucunda sporcular, antrenörler ve analistler performansı daha kolay yorumlayıp değerlendirebilir duruma gelmişlerdir (102). Yeni teknolojilerin spora dâhil olması, teniste performans ölçüm ve değerlendirme yöntemlerini geliştirerek sporcu performansına katkı sağlamıştır. Performans analizinde gözlemsel, video, notasyonel ve zaman-hareket analizlerinin yanı sıra, giyilebilir cihazlardan elde edilen veriler de yaygın olarak kullanılmaktadır (103). Bu teknolojik gelişmelerin performans analizinde kullanılan yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

Gözlemsel Analiz: Atletik performansın çeşitli yönlerini değerlendiren uzmanların sporcuları veya müsabakaları doğrudan gözlemleyerek sporcuların güçlü ve zayıf yönlerine yönelik veri toplaması, belgelemesi ve değerlendirmesini kapsayan analiz türü olarak ifade edilmektedir (104, 105).

Video Analiz: Müsabaka veya antrenman sırasında alınan görüntülerin kaydedilerek beceri, teknik, oyuncu hareketleri ve taktik gibi çeşitli yönlerin analiz edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Yapılan analizler sonucunda sporculara ve antrenörlere geri bildirimde bulunularak değerlendirmeler yapılması sağlanır (103, 106).

Notasyonel Analiz: Bu analiz türüne bakıldığında ise, sporcuların müsabaka veya antrenman sırasında gerçekleşen olayların kaydedilip analiz edilmesini kapsamaktadır. Nicel olarak toplanan ve kodlanan veriler, performansın nesnel biçimde değerlendirilmesini sağlayarak taktik ve teknik açıdan bilgi sunmaktadır (99).

Zaman-Hareket Analizi: Bu analiz türünde sporcuların antrenman veya müsabaka sırasındaki tüm hareketleri kaydedilmektedir. Sporcunun fiziksel taleplerini

ölçmek ve değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan aktivitenin süresi, şiddeti, yoğunluğu, sıklığı ve dinlenme süreleri gibi veriler elde edilerek antrenman programları hazırlanmaktadır. Bunlara ek olarak müsabaka sırasında fiziksel performansın değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır (103).

Küresel Konumlandırma Sistemleri (GPS): GPS teknolojisi tenis müsabakalarında fiziksel talepleri analiz etmek, kat edilen mesafe, hız, hızlanma ve GPS konumlandırma modülü ile donatılmış bir tenis topuyla top takibini yaparak performansın değerlendirilmesini sağlayan bir sistemdir (107).

Giyilebilir Cihazlar ve Sensörler: Tenis performans analizinde giyilebilir cihazlar ve sensörler, hareket analizi, vuruş sıklığı ve fiziksel uygunluk ölçümleri ve fizyolojik verileri toplayarak sporcunun performansının geliştirilmesi ve sakatlığının önlenmesini sağlayan performans değerlendirme araçlarıdır (95). Atalet ölçüm birimi (IMU) sensörleri; ivmeölçer (ivme), jiroskop (açısal hız), manyetometreler manyetik kuvveti ölçmektedir (97, 108)

Otomatik Takip Sistemleri: Günümüzde Hawk-Eye, Trackman, PlaySight ve FoxTen gibi sistemlerle tenis topu ve oyuncular, otomatik olarak izlenmekte; gelişmiş top takibi sayesinde müsabaka sırasında yüksek hacimli performans verileri toplanmaktadır. Çoklu kameralarla farklı açılardan elde edilen veriler birleştirilerek ayrıntılı analizler yapılmakta ve bu sayede antrenman stratejileri geliştirilebilmektedir (109, 110). Bu sistemlerin performans analizinde kullanımı hassas ölçümleri gerçekleştirirse de maliyet ve erişilebilirlik açısından bir sorundur.

Bu tez kapsamında yukarıda açıklanan analiz yöntemlerinden video analiz yöntemi tercih edilmiştir. Bu kapsamda görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri de kullanılarak sporcuların servis, forehand ve backhand vuruşları değerlendirilecektir.

2.2. Görüntü İşleme

Sayısal görüntü verilerini, bilgisayar veya yazılım yoluyla amacına uygun olarak değiştirmek için yapılan uygulamalar, görüntü işleme olarak tanımlanır. Bu işlemler görüntülere ilişkin analizlerin ve değişikliklerin bilgisayar teknolojileri aracılığıyla yürütülmesini içermektedir (111). Görüntü işleme ikiye ayrılır: (a) analog, (b) dijital. Analog görüntü işleme, parlaklık ve uzamsal koordinatların sürekliliği nedeniyle optik veya elektronik yollarla gerçekleştirilen işlemleri kapsar. Dijital görüntü işleme ise görüntülerin örneklenip sayısallaştırılmasıyla bilgisayar veya donanımlar tarafından analiz edilmesini ifade eder (112).

Görüntü işlemedeki temel kavramlar dâhilinde görüntü matrisindeki her bir eleman piksel, görüntüdeki piksel sayısı çözünürlük, piksellerin X ve Y koordinatlarındaki değeri parlaklık, görüntüde kaç piksel olduğunu gösteren grafik histogram, görüntü üzerindeki en parlak ve en karanlık bölgeler arasındaki mesafe ise kontrast olarak tanımlanmaktadır (111, 113)

Görüntü işleme süreci dört temel aşamadan oluşur: Görüntü oluşturma (yakalama öncesinden görüntü matrisine kadar), görüntü görselleştirme (optimizasyon), görüntü analizi (verilerin soyut yorumlanması) ve görüntü yönetimi (verilerin arşivlenmesi, saklanması ve erişimi) (114).

2.2.1. Görüntü İşleme Yöntemleri

Görüntü işlemede kullanılan yöntemler, farklı nedenlerden kaynaklanan görüntü kirliliğini ortadan kaldırmak, detayları daha net ortaya çıkarmak ve görüntü kalitesini artırmak için yapılan işlemler bütünüdür ifade etmektedir. Görüntü işleme aşamaları aşağıdaki gibidir (115):

Gölge Düzeltme: Görüntüleme sırasında oluşan gölgelerin ortadan kaldırılması işlemidir.

Kontrast Geliştirme: Görüntüdeki karışıklık düzeyini artırarak ayırt edilebilirliği iyileştirir.

Keskinleştirme: Görüntüdeki kenar hatlarını belirginleştirmeye yönelik bir işlemidir.

Bozulma (Distorsiyon) Giderme: Lens kayması, kamera titreşimi veya nesne hareketlerinden kaynaklı bozulmaların düzeltilmesini kapsar.

Kirlilik Giderme: Görüntüdeki kontaminasyonların veya istenmeyen parazitlerin temizlenmesini içerir.

2.2.2. Görüntü İşleme Teknikleri

Elde edilen görüntülerin işlenmesi ve bu görüntülerden yeni görüntülerin elde edilmesi sürecinde aşağıda yer alan yöntemler kullanılmaktadır (116, 117):

Görüntü Edinimi: Kameralar, sensörler veya diğer ekipmanlar aracılığıyla görüntü verisinin toplanmasıdır.

Görüntü Ön İşleme: Bir sonraki aşama öncesi gürültü giderme, renk düzeltme gibi ilk iyileştirme adımlarıdır.

Görüntü Geliştirme: Gri tonlama, filtreleme (ortalama, medyan) ve frekans dönüşümü gibi işlemlerle görüntü kalitesinin artırılması için kullanılan yöntemdir.

Görüntü Segmentasyonu: Görüntünün anlamlı bölgelere ayrılması veya orijinal görüntüyü birden farklı bölgeye ayırmak için kullanılan yöntemdir.

Özellik Çıkarma: Görüntüdeki şekil, renk veya doku gibi niteliklerin belirlenmesi ve sınıflandırılması işlemine denir.

Nesne Tanıma: Görüntüdeki nesnelerin tespiti ve konumlandırılması yöntemidir.

2.2.3. Sporda Görüntü İşleme

Sporda görüntü işleme tekniklerinin kullanımı, sporcu hareketlerinin doğru bir şekilde tanımlanması, antrenörlerin antrenman planlarını düzenlemesi, sakatlıkların önlenmesi gibi konularda bilimsel temeller sağlamaktadır (118). Elde edilen verilerle sporun farklı bilimsel temellerinde farklı amaçlar için bilimsel çalışmalar yapılabilir.

Sporda görüntü işleme teknikleri, sporcuların fiziksel, psikolojik, teknik ve taktik performansını değerlendirmede ve gelecekteki performanslarını geliştirmede önemli bir araç haline gelmiştir. Bu teknolojiler, hareket biyomekaniği, fizyolojik tepkiler, bilişsel işlevler ve stratejik kararları analiz etmek için gelişmiş yöntemler sunmaktadır (3, 119). Bu bağlamda görüntü işlemenin spora çok yönlü katkılar sağladığı söylenebilir. Görüntü ve video işleme tekniklerinin yaygınlaşması, sporcu performansını geliştirmeye yönelik yeni çalışma alanları oluşturmuş ve farklı branşlardaki araştırmaları teşvik etmiştir (120). Farklı branşlarda performansların analiz edilmesi, sakatlıkların tahmin edilmesi ve önlenmesi, tekniklerin düzeltilmesi ve taktikle birlikte oyun stratejilerinin görüntülü işlenmesi, yapay zekâyla internetle etkileşim kurulması sporda eğitim metotlarını büyük oranda etkilemiştir (121, 122). Literatüre bakıldığında farklı spor dallarında görüntü işlemenin etkili bir şekilde kullanıldığı görülmektedir.

Sporların fiziksel gereksinimleri, biyomekanik yoluyla görüntü ve video işleme teknikleriyle gelişmiş algoritmalar kullanılarak sporcuların hareketlerini izleme olanağı vermektedir. Bu tekniklerle eklem açıları, hız, ivme ve kuvvet üretimi hakkında veriler elde edilerek sporcu performansının gelişmesi sağlanmaktadır (123). Görüntü işleme teknikleri ile sporcuların yaptıkları hareketleri analiz etmek, potansiyel riskleri belirlemek ve biyomekanik analizlerle yaralanmayı önlemek de sağlanmaktadır (124-126).

Görüntü işleme sayesinde sporcuların yüz ifadeleri, beden dili gibi sözel olmayan göstergeler aracılığıyla duygu durumu, stres seviyesi ve bilişsel yorgunluk analiz edilebilir. Bu analizler sonucunda psikolojik performans değerlendirilerek sporunun gelişimi desteklenebilir (127). Görüntü işleme yoluyla sporcuların psikolojik performansının analiz edilmesi, stres yönetimi, dikkat ve odaklanmanın artırılması, zihinsel dayanıklılığın geliştirilmesi açısından antrenör ve spor psikologlarına destek sağlamaktadır. Yapılan analizler sonucunda sporcuların özgüven, öz farkındalık ve motivasyonlarının da arttığı görülmektedir (128) .

Sporcuların teknik performansı; kameralar, hareket yakalama sistemleri ve görüntü işleme tekniklerinin birlikte kullanımıyla eklem açıları, koordinasyon, hareket tanıma ve branşa özgü tekniklerin analiz edilmesiyle değerlendirilir. Bu verilerle teknik kusurlar tespit edilip hareket kalıpları iyileştirilebilir, sakatlık riski azaltılabilir ve performans geliştirmeye yönelik antrenman programları oluşturulabilir (129).

Bireysel veya takım sporlarında yer alan sporcuların görüntü işleme teknikleri kullanılarak yapılan taktiksel analizlerinde oyuncuların pozisyonları, takım veya sporcu stratejileri ölçülebilir. Bunlara ek olarak farklı taktiklerin etkilerine bakılabilir, rakiplerin oyun planlarındaki zayıf yönler belirlenebilir (104, 130).

Görüntü işleme tekniklerinin bireysel ve takım sporlarında kullanımı; fiziksel, psikolojik, teknik ve taktik performansın geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu teknikler, sakatlıkların önlenmesi ve antrenman stratejilerinin düzenlenmesinde nesnel ölçümler ve kişiselleştirilmiş geri bildirim sunarak performans gelişimine önemli etki etmektedir (131, 132) .

2.2.4. Teniste Görüntü İşleme

Spor bilimleriyle görüntü işleme tekniklerinin beraber kullanımı, tenis performans analizinde köklü bir dönüşüm sağlamıştır. Geleneksel ölçüm yöntemlerinin yerini, sporcu performansını çok yönlü değerlendirebilen analiz yaklaşımları almıştır. Bu teknikler, sporcuların fiziksel, psikolojik, teknik ve taktik performanslarını değerlendirmelerine, antrenmanlarını planlamalarına ve maç stratejilerini geliştirmelerine olanak tanımaktadır (133).

Teniste görüntü işlemenin en önemli uygulamalarından biri, sporcuların derin öğrenmeye dayalı insan duruş tahminidir. Sporcuların vuruş tekniklerini yaparken hareketin aşamaları sırasında sporcuyu izlemek için kullanılmaktadır. Sporcuların üç boyutlu pozlarını tahmin ederek vuruş teknikleri, fiziksel parametreleri ve genel

performansları hakkında bilgi vermektedir (134). Sporcuların vuruş öncesi, sırası ve sonrası sporcular, farklı yönlerden değerlendirilebilir ve yorumlanabilir. Servis, forehand, backhand, vole gibi temel hareketlerin sınıflandırılması için görüntü işleme teknikleri kullanılmakta ve vuruşların biyomekanik analizleri yapılarak sporcuların performansının analiz edilmesini sağlamaktadır (134, 135).

Tenis, tempolu bir spordur; bu sebeple topun hareketini ve pozisyonunu doğru bir şekilde belirlemek ve oyuncuların performansını değerlendirmek için görüntü işleme teknikleriyle yapılan analizler, düşük kameralı sistemlere göre daha doğru bilgi vermektedir (136). Müsabakalar sırasında alınan görüntülerin görüntü işleme teknikleri ile gelecekteki vuruş noktaları, vuruş hızı, açısı ve nereye vuruş yapılabileceği tahmin edilebilmektedir (137). Oyuncuların ve topun pozisyonlarının izlenmesiyle tenise özgü beceriler nicel olarak değerlendirilmekte; görüntü işlemeyle topun konumu, hızı ve topun tahminine dair pozisyonlar elde edilerek oyuncuların seviyeleri sınıflandırılabilir (136). Görüntü işleme, teniste saha çizgilerini belirlemek için de kullanılmaktadır. Bu kullanım, müsabakalarda çizgi kararlarının doğruluğunu tespit etmede hakemlere destek olmakta ve seyircilerin topun içeride veya dışarıda olması durumunu daha iyi görmelerini sağlamaktadır (136, 138). Görüntü işleme, çizgi kararlarında yüksek doğruluk sağlasa da bazı sistemlerin düşük kamera ile çalışması veya çevresel faktörler sebebiyle performansı düşebilmektedir.

2.3. Yapay Zekâ

Yapay zekâ, insan düşünce yapısını anlayıp taklit ederek bilgisayarlara insanlar gibi bilgi edinme, algılama, görme, düşünme ve karar verme vb. özellikleri kazandırma bilimi olarak tanımlanmaktadır (139). Yapay zekâ terimi, John McCarty tarafından 1956 yılında bir konferansta ortaya atılmış ancak makinelerin insan davranışını taklit edebilme ve düşünebilme olasılığını test etmek Turing testini geliştiren Alan Turing tarafından daha önce gündeme getirilmiştir (140). Üç yapay zekâ türü vardır. İlk olarak dar yapay zekâ: Belirli bir alana odaklanan ve sadece odaklandığı alan için çözüm üreten yapay zekâ türüdür. İkinci olarak genel yapay zekâ: İnsanı taklit ederek insanı özellikler göstermesi hedeflenen görüntünün tanınması, doğal dil işleme, ses tanıma, tahmin ve hareket edebilme ve öğrenme gibi davranışları yapabilen yapay zekâdır. Üçüncü yapay zekâ türü süper yapay zekâ ise gelecekte insanın sahip olduğu tüm yeteneklere veya daha fazlasına sahip olacağı beklenen yapay zekâ olarak ifade edilmiştir (141, 142).

Yapay zekânın kuramsal temelleri; bilgisayar bilimi, matematik, sinirbilim ve bilişsel psikoloji gibi farklı disiplinlere dayanmaktadır. Yapay zekâ alt dallarına bakıldığında ise:

Makine öğrenmesi: Makine öğrenimi, verileri modele uydurarak ve algoritmalar kullanarak, modelleri eğiterek özel programlama gerektirmeden sorunları ele alan istatistiksel bir tekniktir. Organize ve yapılandırılmamış verileri analiz ederek, çeşitli sorunların tahmin edilmesini kolaylaştırır (143). Makine öğrenimi, geniş veri setleri içindeki önemli kalıpları tanımlayan ve bu kalıplara dayalı tahminler üreten algoritmaları ifade etmektedir (144). Makine öğrenimi, yapay zekânın bir alt kümesi olarak, matematiksel, istatistiksel ve veri madenciliği tekniklerini kullanarak ilişkili verilerden otomatik öğrenmeyi kolaylaştırır. Yapay zekâ, insan zekâsını taklit eden ve akıl yürütme, öğrenme ve dil işleme gibi faaliyetleri gerçekleştiren geniş bir kavram olarak ifade edilmiştir.

Makine öğrenmesi, yapay zekânın bir alt kümesini oluşturur ve bilgisayarların verilerden desenleri ayırt etmesine ve belirli görevleri önceden belirlenmiş kılavuzlar olmadan otonom olarak yerine getirmesine olanak tanır. Belirlenmiş kuralların yokluğunda, belirli görevlerin otomatik olarak yerine getirilmesini sağlamaktadır (145).

Derin öğrenme: Derin öğrenme, mimarisi ve işleyişi açısından insan beyninin nöronlarından esinlenerek birçok katmandan oluşan ve sinir ağı mimarilerini kullanan bir makine öğrenimi modeli olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte işlenmemiş verilerden temsiller çıkararak ve tüm sorunları otonom ele alarak geleneksel makine öğreniminden sapar (146). Derin öğrenme, çok katmanlı sinir ağı modelleriyle verilerin farklı soyutlama düzeylerinde temsil edilmesini sağlar. Gizli iç görüler çıkarma kapasitesi ve büyük veriyle çalışma yeteneği, bu modelleri veri işleme açısından etkili kılmıştır. Bu sayede veriler, gerçek dünya problemlerine daha kolay uyum sağlamakta ve modeller yeni koşullara adapte olabilmektedir (147).

Yapay Sinir Ağları: Çeşitli katmanlarda birbirine bağlı düğümlerden oluşan ağlara yapay sinir ağları denmektedir. Bu ağlar, insan beyninde bulunan nöronlara benzemektedir. Daha fazla sayıda etkinliği aynı anda gerçekleştirebilirler ve bunu yapabilmek için sayısal değerlere sahiptirler (147). Gelecek olayları tahmin etmek, yapay sinir ağlarının önemli bir uygulamasıdır. Yapay sinir ağları, öğrenme algoritmalarını kullanarak araştırma yapmak, yeni bilgiler üretmek, görüntüleri ve kavramları anlamak için kullanılmaktadır. Bu görevleri otonom olarak yerine getirmek için bilgisayar sistemlerini kullanırlar (148).

2.3.1. Sporda Yapay Zekâ

Son yıllarda yapay zekâ, sporda önemli bir dönüşüm başlatmış; geleneksel antrenman yöntemlerinin yerini, sporcuları fiziksel, psikolojik, teknik ve taktik açıdan değerlendiren veri odaklı sistemler almıştır. Bu dönüşüm; performansın artırılması, sakatlık riskinin azaltılması, iyileşme sürecinin hızlandırılması ve bilişsel-spor becerilerinin geliştirilmesini kapsamaktadır (149-152).

Spora dâhil olan yapay zeka, üç temel alanda öne çıkmaktadır: performans analizi, sakatlık tahmini ve önlenmesiyle sanal ve artırılmış gerçeklikle desteklenen antrenman sistemleri. Performans analizinde giyilebilir sensörlerden elde edilen fizyolojik ve biyomekanik veriler, makine öğrenimiyle işlenerek antrenmanlar bireyselleştirilmekte; bu sayede teknik doğruluk ve verimlilik artırılmaktadır (3, 151).

Yapay zekâ destekli sakatlık tahmini ve sakatlığı önleme süreçlerinde geçmiş sakatlık öyküsü, duruş analizi ve yorgunluk gibi faktörler Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) algoritmalarıyla analiz edilerek riskler önceden belirlenebilir. Ayrıca sporcuların performansı, dijital ikiz teknolojisiyle oluşturulan sanal modeller aracılığıyla simüle edilebilir (153, 154).

Teknik ve taktik gereksinimlerde yapay zekâ kullanımı, özellikle teknik becerilerin geliştirilmesi ve karar verme süreçlerinin iyileştirilmesinde VR ve AR teknolojileriyle desteklenen uygulamalar aracılığıyla sporculara güven ve motivasyon sağlamaktadır (103, 155).

Yapay zekâ, sporcuların yalnızca fiziksel değil, teknik, taktik ve psikolojik performanslarını da geliştirmektedir. Ayrıca sporcu sağlığının korunması, sakatlıkların önlenmesi, veri odaklı karar süreçlerinin iyileştirilmesi, antrenman verimliliğinin artırılması ve antrenman ile müsabaka analizlerine katkı sağlayarak en iyi sonuçların elde edilmesine olanak tanımaktadır (156-158).

2.3.2. Teniste Yapay Zekâ

Yapay zekânın spordaki çok yönlü uygulamaları tenis gibi karmaşık bir sporun da bu alandan etkilenmesini sağlamıştır. Özellikle bireysel karar verme süreçlerinin yüksek hassasiyet ve çok fazla tekrar gerektirmesi yapay zekâ için iyi bir uygulama alanıdır. Ayrıca topun küçük ve hızlı yapısı nedeniyle takibinin zor olması gibi etkenler, tenis gibi sporlarda bu teknolojiyi daha gerekli hale getirmiştir. Anlık kararlar ve motor becerilerin ön planda olduğu tenis, yapay zekâ uygulamaları için elverişli bir ortam sunmaktadır (159, 160).

Yapay zekânın tenis antrenmanına dâhil olması ile sporcuların kişisel gelişim süreçlerini desteklemek, teknik hataları analiz etmek ve sakatlanmaları önlemek gibi birçok yönü kapsayan yenilikler ortaya çıkmıştır (161). Sporcuların koluna, bileğine veya raketine takılan giyilebilir sensörlerle elde edilen servis kinetiği, vuruş mekaniği ve hareket kalıpları gibi veriler, makine öğrenimi algoritmalarıyla analiz edilerek gerçek zamanlı geri bildirim sağlanır. Bu sayede antrenman yoğunluğu, içeriği ve süresi sporcu ihtiyaçlarına göre yeniden yapılandırılabilir (162, 163). Bunların yanı sıra yapay zekâ sadece oyuncu performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda biyomekanik verilerin kullanımıyla sakatlanma riskini azaltır ve sporcuların teknik becerilerini optimize eder (3, 126).

Teniste en önemli gereksinimlerden biri olan taktik becerilerin, yapay zekâ teknolojileriyle maç sırasındaki stratejik karar verme süreçlerine katkı sağladığı görülmektedir. Geçmiş maç verilerinin analiziyle rakiplerin oyun taktikleri ve eğilimleri belirlenebilir; bu doğrultuda taktik öneriler geliştirilebilir (103, 164).

Modern tenisteki teknolojik evrim, yalnızca sporcuları değil, aynı zamanda antrenörleri, seyircileri ve antrenman tekniklerini de etkileyerek sporun görülme ve icra edilme şeklinde önemli değişikliklere yol açmaktadır (122). Bu teknolojik değişimin temeli, artan işleme kapasitesi ve büyük veri üretimidir. Bu da yapay zekâ destekli eğitim programlarının değerlendirilmesini ve verimliliğini kademeli olarak artırdığını göstermektedir (165).

Sonuç olarak teniste yapay zekâ uygulamaları kişiselleştirilmiş antrenmanları kolaylaştırmakta, sporcu performansını artırmakta ve hem sakatlıkların önlenmesi hem de stratejik karar destek sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

2.4. Video İşleme

Video işleme, video sinyalini ardışık kareler üzerinden dijital ortamda iyileştirme ve analiz etme tekniklerinin bütünü olarak tanımlanır. Süreç, görüntünün sayısallaştırılmasıyla başlar ve çeşitli algoritmaların uygulanmasına olanak tanır. Temel yaklaşım, her kareyi iki boyutlu bir sinyal olarak ele alarak durağan görüntü işlemlerini videoya uyarlamaktır (166).

Günümüz teknolojisinin hızlı değişimi, insanların tüketebileceği veri hacmini artırmıştır. Bu durum, hızlı ve pratik hizmetler sunabilmek için sinyal işleme teknolojilerinin sürekli ilerlemesini zorunlu kılmaktadır (167, 168). Videolarda insan davranışı temel odak noktasıdır. Hareketin analizi ve tanımlanması, video işleme

araştırmalarının hem kritik hem de karmaşık bir alanını oluşturur. Kare dizilerindeki insan etkinliklerinin sınıflandırılması, bilgisayarlar a eylemleri insan benzeri bir anlayışla yorumlama yetisi kazandırmaktadır (169).

Yüksek performanslı donanım ve sinir ağı tabanlı yöntemlerin yaygınlaşmasıyla insan hareketi analizi kısa video sınıflandırmasından uzun video anlayışına; ardından çapraz-model eylem yerelleştirme ve tespitine dönüşmüştür (170). Bu gelişmeler, eklem koordinatları ve açđ dizilerini hassas şekilde ölçebilen insan hareketi tanıma teknolojilerine olan talebi artırmıştır. Elde edilen parametreler; tıp, spor, dans ve kimlik doğrulama gibi alanlarda temel veri sunmaktadır (171).

2.4.1. Sporda Video İşleme

Video işleme teknolojileri, ağdaş sporlarda izleyici deneyimini iyileştirmek, antrenman tekniklerini geliştirmek ve veri analizini kolaylaştırmak açısından kritik önem taşımaktadır. Bu sistemler puanlama, oyuncu takibi ve performans analizi alanlarında uygulanabilir, yüksek değerli çıktılar üretmektedir.

Olay tabanlı segmentasyon (Gerçek zamanlı müdahale gerektiren) yaklaşımlarında önceden eğitilmiş risk profili modelleri, karelerin puan anlarına karşılık gelme olasılığını hesaplayarak klip etiketleme doğruluğunu yükseltir (172). İçerik türüne dayalı renk tabanlı segmentasyon da (Aktör, arka plan vb.) iletim verimliliğini artırır ve yeni kodlama şemalarının geliştirilmesini destekler (173)

Birçok modern sistem, ma içindeki olayların başlangıç ve bitiş noktalarını otonom olarak algılar; video akışını kliplere böler ve olaya özğü veri depolama işlevlerini devreye alır (173). Bulut tabanlı çoklu-hareket tanıma algoritmaları ile 3-B video analizi teknikleri, bilimsel temelli ve bireyselleştirilmiş antrenman programları tasarlamak için eğitim sahasında kullanılmaktadır (174, 175).

Seyir deneyimini daha da zenginleştirmek amacıyla yavaş çekim analizleri ve olay bazlı özetler, sporun yapısal özelliklerini çıkararak performans değerlendirmesine katkı sunar (176).

Son araştırmalar, atletik hareket tanımını geliştirmek için mekânsal-zamansal dikkat (spatial-temporal attention) mekanizmalarını önerir. Bu modelleri CNN-LSTM mimarileriyle birleştirmek, karar verme doğruluğunu artırmaktadır (177). Ayrıca skor tanıma sistemleri, video karelerinden metin bilgisi çekerek skor ve zaman verilerini anlık rapor hâline getirebilmektedir (178).

Sistemler, sporcu hareketlerini kare kare inceleyerek duruş, pozisyon ve biyomekanik parametreler hakkında anlık geri bildirim üretir (179). Bu sayede teknik düzeltmeler hızlanır ve öğrenme eğrisi yukarı yönlü gelişir (180).

Klinik uzmanlar ile antrenörler, yaralanma riskini artıran hareket kalıplarını ve biyomekanik sapmaları video üzerinden belirleyebilir. Analiz sonuçları, rehabilitasyon programlarının etkililiğini izlemeye ve sporcunun oyuna dönüş sürecini takip etmeye de olanak tanır (119).

Geçmiş maç kayıtları, rakip davranış kalıplarını ortaya çıkararak veri temelli taktik planların geliştirilmesini sağlar. Derin öğrenme modelleri, oyuncu performans analizi, sakatlık tahmini ve strateji gibi alanlarda spor performansını optimize eden yeni ufuklar açmaktadır (130). Yenilikçi çözümler, özellikle gerçek maç senaryolarını yansıtan sanal ortamlar yoluyla taktik ve stratejik becerilerin gelişimini hızlandıracaktır (121)

2.4.2. Teniste Video İşleme

Video işlemenin sporda kullanımından sonra teniste kullanımına bakıldığında teniste oyuncu performansını değerlendirmek, taktiksel analizi detaylı yapmak ve maç içerisinde gerçekleşen olayları çözümlmek için temel bir araç olarak kullanıldığı görülmektedir. Video verilerinin yakalanması, işlenmesi ve analizinden üretilen içerik; eğitim, yayıncılık ve arşivleme başta olmak üzere çok sayıda alanda etkin biçimde kullanılmaktadır.

Kalibre edilmiş kameralarla çalışan otomatik arşivleme sistemleri, top izlerini çıkarır; videoları taktik desenlere göre kategorize eder ve her segmente anlamsal etiketler ekleyerek performans analizi ile çevrimiçi yayın süreçlerinin verimliliğini artırır (181).

Çok ölçekli görüntü özellik analizi yaklaşımları, tenis yayınlarında servis, ralli ve vole gibi kritik olayları otomatik tanımak amacıyla geliştirilmiştir. Han ve Farin, görsel özellikleriyle oyun bağlamını piksel düzeyinden sahne düzeyine kadar inceleyen bu teknolojiler sayesinde kapsamlı maç özetleri ve ayrıntılı içerik analizleri üretilebileceğini göstermiştir (182).

Yang, çok kameralı görüntü işleme teknolojilerinin oyuncu takibini kolaylaştırdığını ve MPEG-4 / HLS gibi yeni formatlarla otomatik sahne dönüşümü sayesinde yayın verimliliğini artırdığını bildirmiştir (189). Bilgisayar görüşü tabanlı nesne izleme sistemleri ise top temas anlarıyla oyuncu hareketlerini milisaniye hassasiyetinde analiz edebilmektedir (183).

Bilgisayar görüsü tabanlı izleme sistemleri; oyuncu takibi, hareket algılama ve vuruş temsili konularında yüksek doğruluk sağlar. Vuruş türlerini sınıflandırmak için sık kullanılan yöntemlerden biri optik akış analizidir (184). Buna ek olarak, yüksek hızlı kameralar ile kablosuz sensörleri birleştiren hibrit sistemler, tenis servisine ait dinamik parametreleri gerçeğe yakın biçimde taklit edebilmekte ve çeşitli teknik araştırmalarda test platformu olarak kullanılmaktadır (161).

Gerçek zamanlı saha takip sistemleri, kort çizgilerini tanımlamak ve kamera hareketine bağlı olarak homografiyi güncellemek için Olasılıklı Hough Dönüşümü (Probabilistic Hough Transform) algoritmasından yararlanır (185). Öte yandan gizli Markov modelleri, ses ve video sinyallerini bütünleştiren analizlerde kullanılarak video içeriğinin önem derecesini puan, oyun ve set düzeylerinde yükseltir (186) .

Video işleme teknolojilerinin tenise dâhil olması, fiziksel, psikolojik, teknik ve taktik alanlarda önemli kazanımlar sağlamıştır. Video işleme, oyuncunun yapmış olduğu hareketleri, biyomekanik verileri ve topun düştüğü yer hakkında kapsamlı bilgi vererek antrenörlerin geliştirilmesi gereken alanları net bir şekilde belirlemesine olanak tanımaktadır (161).

Video işleme, oyuncuların eğitiminde ve sakatlıkları önlemede yapılan programların etkinliğini artırır. Sporunun yapmış olduğu hareketlerin analizi ve biyomekanik hataların tespitiyle antrenörler, güç, çeviklik ve dayanıklılığı geliştirmeye yönelik kişiselleştirilmiş egzersiz planları oluşturabilir. Bunlara ek olarak aşırı kullanıma bağlı yaralanma riskini azaltabilir (119)

Video analizi ayrıca yorgunluk ile kas dengesizliklerini hızlıca ortaya koyar; bu tespitler, uygun müdahalelerle optimal performansın korunmasına olanak tanır (179). Geniş ölçekli maç kayıtları, oyuncu davranışını öngören modeller üretmek ve yeni senaryolar içeren etkileşimli antrenmanlar tasarlamak için önemli bir veri havuzu sunar (180). Bunlara ek olarak giyilebilir sensörlerle yüksek hızlı kameraların birlikte kullanımı tenis sporcularında fiziksel gereksinimlerin daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına katkı sağlar. Sonuç olarak görüntü işlemenin kullanıldığı analizlerin doğruluğu artar (187).

Psikolojik açıdan video geri bildirimi, oyuncunun özgüvenini, motivasyonunu ve zihinsel dayanıklılığını artırmada etkili bir araçtır. Sporcular, performans kayıtlarını analiz ederek öz farkındalık ve hedef planlamalarını geliştirir; böylece güçlü ve zayıf yönlerini daha net belirleyebilirler (133). Video analizleri, başarılı vuruşların somut kanıtını sunarak geliştirilmesi gereken alanları ortaya koyar ve kaygı ile başarısızlık korkusu gibi psikolojik engellerin azalmasına katkı sağlar (177).

Video analizi; vuruş mekaniği, ayak hareketi ve kort konumlanmasını ayrıntılı inceleyerek teknik gelişime katkı sağlar. Görüntülerle desteklenen kesin geri bildirim, oyuncuların daha verimli ve tutarlı vuruşlar geliştirmesine imkân tanır. Ayrıca, kinetik zincirin tüm halkalarını değerlendirerek enerji iletimini optimize etme fırsatları sunar. Sporcuların tekniklerinin elit oyuncularla karşılaştırılması ise gelişim için görsel bir referans sağlar (188). Son olarak, sanal gerçeklik tabanlı antrenman ortamları, gerçekçi ve sürükleyici bir deneyim sağlayarak beceri edinimini hızlandırdığı tespit edilmiştir (189).

Video işleme, rakibin zayıf yönlerinin analiz edilmesini ve buna göre taktikler oluşturularak müsabakaya göre strateji geliştirilmesini sağlar. Maç ve oyuncu veri tabanları, ayrıntılı raporlar ve skor tahmin modellerinin geliştirilmesini destekler (190). Yapay zekâ, veri toplama otomasyonu ve büyük veri setlerinin işlenmesi yoluyla spor analizini önemli ölçüde dönüştürmüş; sanal gerçeklik de etkileyici eğitim ortamları yaratmıştır (103). Gerçek maç koşullarını yansıtan sanal senaryoların, taktik ve stratejik becerilerin gelişimini daha da hızlandırması beklenmektedir (121).

3. MATERYAL VE METOT

Bu doktora tez çalışmasında bilgisayar görü teknolojileri yoluyla geliştirilen bir poz tahmin yöntemi, tenis oyuncularının vücut hareketlerini kapsamlı bir şekilde analiz etmek için kullanıldı.

Bu yöntem, maçlar veya antrenmanlar sırasında oyuncuların duruşlarını ve hareketlerini hassas bir şekilde gözlemlemeyi mümkün kılacaktır. Çalışmanın ana amacı, elde edilen ayrıntılı hareket verilerini kullanarak sporcuların performansını daha objektif ve kapsamlı bir şekilde değerlendirmek ve böylece onların teknik, taktik ve fiziksel gelişim süreçlerine katkıda bulunmaktır. Ayrıca bu tür analizlerin sporcuların hareketlerini optimize etmek ve yaralanma riskini azaltmak gibi önemli uygulama alanları için değerli veriler sağlayacağı düşünülmektedir.

3.1. Araştırma izinleri

Araştırma için İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulundan 2024/6831 karar sayısı ile izin alındı ve Helsinki Deklarasyonu'na göre çalışmalar yürütüldü. Ayrıca BAP tarafından TDK 2022/3053 proje numarası ile bu araştırmaya katkı verildi.

3.2. Araştırma Evreni/Çalışma Grupları

Yapılan power analizinde, araştırmaya dâhil edilecek gönüllü sayısının tespiti için G-power (3.1.9.3) güç analiz programı kullanıldı. Alfa (α) değeri=.05, güç ($1-\beta$)=.95 ve etki büyüklüğü=.90 olarak analiz edildiğinde, araştırmaya en az 15 katılımcının dâhil edilmesi gerektiği bulundu. Malatya ilinde turnuva deneyimi olan 15 lisanslı sporcu çalışmaya katıldı. Veri setleri, bu 15 sporcuya uygulanan ITN testlerinden elde edildi.

3.3. Araştırmaya Dâhil Edilme Kriterleri

- Minimum 3 yıllık tenis geçmişine sahip bireyler
- Lisanslı ve turnuva tecrübesi olan bireyler
- Araştırmaya katılmaya gönüllü bireyler
- Herhangi bir sakatlığı ve hastalığı bulunmayan bireyler

3.4. Araştırma Dışı Tutulma Kriterleri

- Lisanslı veya turnuva tecrübesi olmayan bireyler

- Çalışmaya gönüllü olmayan bireyler
- Spor sakatlığı veya hastalığı olan bireyler

3.5. Araştırma Modeli

Bu araştırma, nicel deneysel bir yaklaşım kullanılarak gerçekleştirildi. Çalışmada yapay zekâ destekli derin öğrenme modelleri kullanılarak tenis oyuncularının çeşitli açılardan video görüntüleri toplandı ve bu veriler daha sonra derinlemesine analiz edildi. YOLOv8-Pose modeli, özellikle güncel ve güçlü olması nedeniyle seçildi. Modelin en büyük avantajlarından biri, gerçek zamanlı işleme yapabilme yeteneğidir. Ayrıca vücuttaki önemli eklem noktalarını (bilek, diz ve omuz gibi) doğru bir şekilde algılama yeteneği, sporcuların hareket dinamiklerini hassas ve ayrıntılı bir şekilde izlemeyi mümkün kıldı. Bu özellikler, spor performansını objektif değerlendirmek için gereklidir.

3.6. Katılımcılar ve Kayıt Ortamı

Veri seti, tamamı profesyonel düzeyde tenis oynayan toplam 15 tenis oyuncusundan oluştu. Veri toplama sürecinden önce oyunculara çalışma hakkında bilgi verildi ve test protokolleri açıklandı. Test protokolleri sırasında günün farklı saatleri seçildi ve sistemin işleyişi test edildi.

Veri toplama süreci farklı beceri seviyelerindeki sporculardan tenisin temel teknik hareketlerini toplamak için planlandı. Kayıtlar, sert zeminli bir tenis kortunda açık havada yapıldı. Sporcular, forehand, backhand ve servis gibi temel tenis tekniklerini kullandılar. Gündüz doğal ışık, gece özel aydınlatma kullanıldı. Veri seti hareket analizine etkilerini belirlemek için farklı aydınlatma koşullarına başvuruldu. Bu kapsamlı yöntem, çeşitli oyuncu profilleri ve farklı çevre koşullarını içeren zengin ve kapsayıcı bir veri seti sağladı. Her sporcunun hareketini kaydeden üç kamera, saniyede 120 kare (120 FPS) ve 1080p çözünürlükte görüntüler yakaladı. Bir kamera, sporcunun sol tarafına, diğeri sağ tarafına ve üçüncü kamera ise kortun üst kısmına yerleştirildi. Böylece sporcu hareketleri çeşitli açılardan kaydedilerek çok açılı izlenme mümkün kılındı. Bu yüksek çözünürlüklü görüntüleme yöntemi ve yüksek kare hızı, sporcuların vücut hareketlerinin kapsamlı analizini sağladı. Sonuç olarak hareket kalıplarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi için güvenilir bir veri kaynağı oluşturuldu.

Elde edilen bu sonuçlar, sporcular ve antrenörler için çok önemlidir. Bu tür gelişmiş analizler, geleneksel gözlem temelli değerlendirmelere göre daha objektif ve nicel veriler sağlar ve her sporcunun gelişim sürecinin somut verilerle takip edilmesini

mümkün kılar. Bu nedenle antrenman ve performans geliştirme prosedürleri daha bilimsel bir temele dayanır. Bu kapsamlı veri seti, çeşitli oyuncu profilleri, değişken çevre koşulları ve değişken oyun ortamları nedeniyle tenis performansının kapsamlı ve çok yönlü bir analizine zemin hazırlar ve bu alandaki araştırma ve uygulamalar için sağlam bir temel sağlar.

Video analizleri, sporcuların vücut duruşlarını, ayak pozisyonlarını ve vuruşlar sırasındaki genel hareket dinamiklerini kapsamlı bir şekilde inceledi. Bu kapsamlı değerlendirme, her sporcunun kendine özgü hareket tarzlarının belirlenmesini ve zaman içindeki değişikliklerin sistematik olarak izlenmesini sağladı. Bu veriler, teknik performansın objektif bir şekilde değerlendirilmesini sağlamakla kalmadı, aynı zamanda yaralanma riski ve bu riski önleme gibi kritik alanlarda da önemli bilgiler verdi. Böylece sporcuların hem performans geliştirme hem de sağlık yönetimi süreçlerinde bilimsel kararlar alabilmelerini sağlamak için önemli bir veri kaynağı oluşturuldu.

3.7. Veri Toplama Süreci

3.7.1. Uluslararası Tenis Testi

Uluslararası Tenis Numarası (ITN), bir oyuncunun genel oyun seviyesini ölçmek için ITF tarafından onaylanmış on puanlık bir derecelendirme sistemidir. Ölçek, ITN 1 (elit) ile ITN 10 (başlangıç seviyesi) arasında değişir ve tamamen kortta yapılan objektif testlere dayanır (191).

ITN saha testinde beş teknik özellik değerlendirilir: zemin vuruş derinliği (90 puan), zemin vuruş doğruluğu (84 puan), vole derinliği (72 puan), servis (108 puan) ve hareket kabiliyeti (76 puan). Böylece toplamda en fazla 430 puan elde edilebilir. Derinlik ve doğruluk bölümlerinde güç boyutu (top hızı) da puanlanır (191).

Derinlik testi, on adet alternatif forehand-backhand zemin vuruşunu içerir. Doğruluk testi, sırasıyla altı adet düz forehand-backhand ve altı adet çapraz forehand-backhand vuruşundan oluşur. Sekiz adet alternatif forehand-backhand vole, vole derinliğinde gerçekleştirilir. Servis bölümünde her bir hedef alana üçer adet olmak üzere toplam 12 servis atılır (191).

Aşağıda ITN testi sırasında farklı kamera açılarından çekilmiş örnekler bulunmaktadır. Üst kamera, sağ kamera ve sol kamera; oyuncuların servis, forehand ve backhand vuruşları sırasında görüntülerini kaydetti. Çekilen görüntüler aşağıda gösterilmektedir (Şekil 3.1.-3.12.).



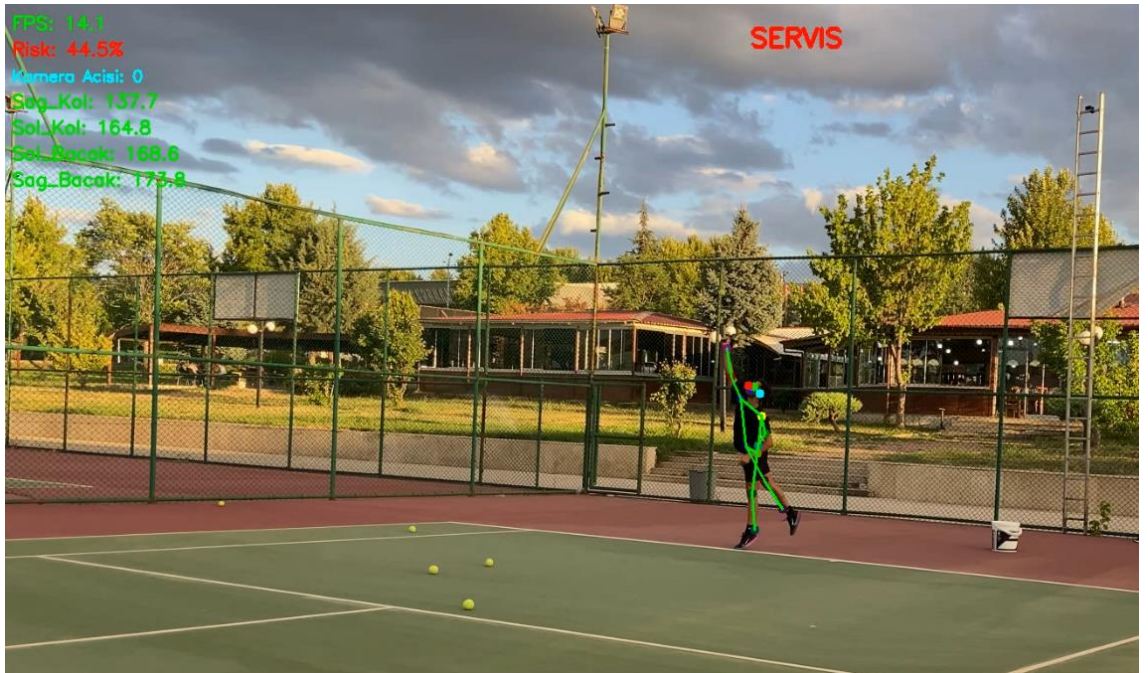
Şekil 3.1. Forehand vuruşu sırasında üst kamera kaydı.



Şekil 3.2. Forehand vuruşu sırasında sağ yan kamera kaydı.



Şekil 3.3. Forehand vuruşu sırasında sol yan kamera kaydı.



Şekil 3.4. Servis vuruşu sırasında sol yan kamera kaydı.



Şekil 3.5. Forehand vuruşu sırasında üst kamera kaydı.



Şekil 3.6. Servis vuruşu sırasında üst kamera kaydı.



Şekil 3.7. Servis vuruşu sırasında üst kamera kaydı.



Şekil 3.8. Backhand vuruşu sırasında sağ kamera kaydı.



Şekil 3.9. Backhand vuruşu sırasında üst kamera kaydı.



Şekil 3.10. Servis vuruşu sırasında sağ kamera kaydı.



Şekil 3.11. Servis vuruşu sırasında üst kamera kaydı.



Şekil 3.12. Servis vuruşu sırasında üst kamera tam saha görünümü.

3.8. Video İşleme ve Hazırlık

Çalışmanın ilk aşamasında, video kayıtları modelin gereksinimlerini karşılamak için belirli ön işleme prosedürlerinden geçirildi. Bu prosedür, modelin doğruluğunu ve

işleme verimliliğini artırmak için özenle tasarlandı ve uygulandı. İlk olarak uzun video kayıtları, 5-10 saniye süren kısa videolara bölündü. Bu bölümlere, veri işlemeyi kolaylaştırmanın yanı sıra, sporcuların hareketlerinin daha net, odaklanmış ve ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesini sağladı. Sonuç olarak modelin eğitim ve değerlendirme süreçlerinde daha yüksek performans elde edildi.

Bir sonraki adım, video görüntülerini karelere bölerek kapsamlı bir şekilde işlemektir. İçindeki hareketlerin ayrıntılı bir şekilde incelenmesine izin vermek için her çerçeve ayrıntılı olarak incelendi. Bu noktada görüntü kalitesini iyileştirmek ve modelin odaklanması gereken alanlara odaklanması için çeşitli görüntü geliştirme yöntemleri kullanmak mümkündür. Bu yöntemler, modelin performansını iyileştirmek ve hareket algılamasının doğruluğunu artırmak için çok önemlidir.

İstenmeyen gürültüyü azaltmak için görüntüde bir Gauss bulanıklığı filtresi kullanıldı. Bu, modelin yanlış veya gereksiz ayrıntılara odaklanmaktan kaçınmasına izin verdi; çünkü görüntüdeki rastgele ve dikkat dağınıcı ayrıntıların miktarı azaldı. Sonuç olarak modelin genel doğruluğu ve analiz performansı iyileştirildi (192). Ayrıca görüntülerdeki kontrastı dengelemek için histogram denkleştirme yöntemi kullanıldı. Bu yöntem, gövde çizgilerinin ve detaylarının daha net görünmesini sağlayarak modelin ilgili bölgeleri daha net tespit etmesine yardımcı oldu. Sonuç olarak hareket algılama ve analiz prosedürlerinin güvenilirliği ve doğruluğu artırıldı (193). Bu ön işleme adımlarından sonra her kare 640x640 piksele yeniden ölçeklendirildi.

YOLOv8 modelinin giriş biçimine uyum sağlaması için sabit bir boyutlandırma standardı uygulamak kritik öneme sahiptir. Bu tutarlılık, modelin farklı kareleri aynı şekilde işlemesine ve karşılaştırılabilir sonuçlar üretmesine olanak tanır. Böylece analizin doğruluğu ve model performansı artmış olur.

Son olarak bir arka plan basitleştirme adımı uygulandı. Bu süreç, oyuncunun hareketlerini arka plandaki görsel karmaşadan ayırmayı mümkün kıldı. Böylece modelin odaklanması gereken ana unsurlar (örneğin oyuncunun pozu ve vücut pozisyonu) daha net bir şekilde vurgulandı.

3.8.1. YOLOv8 Pose Estimation Modeli

Model Mimarisi YOLOv8-Pose, Ultralytics tarafından geliştirilen son teknoloji yapay zekâ modelidir. Gerçek zamanlı insan duruş tahmini görevleri için özel olarak optimize edilmiş bu model, yüksek doğruluğu ve hızlı işleme yetenekleriyle öne çıkmaktadır. YOLOv8-Pose, çoklu eklem noktalarının hassas tespiti ve hareket

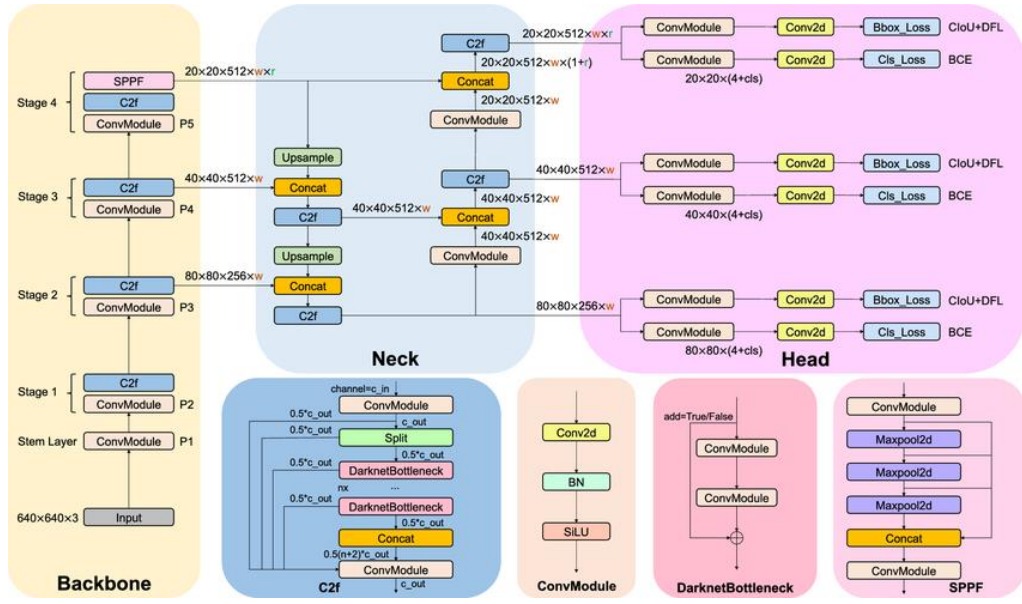
analizinde etkili performansı nedeniyle spor bilimi ve biyomekanik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelin bu özellikleri, hareket dinamiklerinin gerçek zamanlı ve doğru bir şekilde izlenmesini sağlayarak sporcuların performans değerlendirmesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (194). Bu model, yüksek tempolu ve dinamik sporlarda insan vücudunun hareketlerini izlemede özellikle etkilidir. Mimarisi sayesinde hızlı ve beklenmedik hareketleri esnek ve yüksek doğrulukla algılama kapasitesine sahiptir. Bu özellik, modelin, sporcuların karmaşık ve hızlı hareketlerini hassas bir şekilde izlemesini sağlar ve performans analizi çalışmaları için modeli tercih edilen bir seçenek haline getirir. Sonuç olarak bu model, spor alanında hareket değerlendirmelerinde güvenilir ve gerçek zamanlı veriler sağlamak için önemli bir araç haline gelmiştir.

Modelin mimarisi üç ana bölümden oluşur (Şekil 3.13.)(195):

Backbone (CSPDarknet) Katmanı: Modelin ilk görüntüsünden temel görsel özellikleri çıkarmaya yardımcı olur. Bu katman, görüntünün iskeletini oluşturur ve modelin görsel içeriğinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. CSPDarknet mimarisi, hesaplama kaynaklarını verimli bir şekilde kullanırken güçlü temsil yetenekleriyle öne çıkar. Bu nedenle, YOLOv8 modeli hem hızlı hem de güvenilir bir şekilde çalışır ve gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek performans sunar (196).

Neck (PANet) Katmanı: Modelin orta katmanı olarak farklı ölçeklerdeki özelliklerin etkili bir şekilde entegre olmasını sağlar. Bu katman, tenis bağlamında küçük, orta ve büyük nesnelerin eş zamanlı ve doğru analizinde kritik öneme sahiptir. PANet mimarisi, görüntüdeki ayrıntı ve bütünlük arasında dengeli bir ilişki kurmak için yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya bilgi akışını kullanır. Bu, modelin çok ölçekli özelliklerini dâhil ederek daha kapsamlı ve doğru tespitler yapmasını sağlar (197).

Head (Çıkış Katmanı): Bu, modelin son aşamasını temsil eder ve her bireyin vücudundaki 17 kritik eklem noktası (örneğin dirsek, diz, bilek, omuz) tahmin edilir. Bu tahminler, COCO veri setinde tanımlanan standart nokta koordinatları şeklinde yapılır. Bu nedenle modelin sonuçları uluslararası olarak tanınan ve yaygın olarak kullanılan bir formatta sunulur. Bu, farklı çalışmaların karşılaştırılmasını ve değerlendirilmesini kolaylaştırır. Bu standardizasyon sayesinde modelin performansı tarafsız ve tutarlı bir şekilde ölçülebilir (198).



Şekil 3.13. Yolo8 Pose Model Mimarisi (195).

Bu tez çalışmasında insan duruş tahmini için geliştirilen YOLOv8m-pose modelinin özel bir versiyonu kullanıldı ve tenis sporunun özel uygulama gereksinimlerine uyarlandı. Model, başlangıçta COCO veri seti üzerinde önceden eğitilmiş ağırlıklarla yapılandırıldı; böylece genel insan duruşlarını tanımak için temel bilgiye sahip oldu. Daha sonra transfer öğrenimi kullanılarak bu önceden var olan bilgi korundu ve tenis oyuncularının hareketlerini daha iyi tanımak için özel olarak oluşturulmuş bir tenis veri seti üzerinde ince ayar yapıldı. Bu süreç, modelin forehand, backhand ve servis gibi tenis hareketlerini yüksek doğrulukla tanıma yeteneğini artırdı ve belirli uygulama alanı için performansını optimize etti.

3.8.2. Eğitim Süreci

Model, özenle seçilmiş hiperparametreler doğrultusunda eğitildi. Eğitim süreci boyunca toplam 100 dönem tamamlandı ve model, veri setindeki örnekleri tekrar tekrar işleyerek öğrenme kapasitesini derinleştirdi. Her eğitim adımında modelin bir seferde 16 görüntüden oluşan mini grupları işleyecek şekilde parti boyutu 16 olarak ayarlandı. Bu parametre seçimi, öğrenme verimliliği ile mevcut donanım kaynaklarının optimizasyonu arasında denge sağlamak için dikkatlice yapıldı. Bu yapı, hem eğitim süresinin makul bir seviyede tutulmasına hem de modelin genel performansının iyileştirilmesine katkıda bulundu.

Modelin öğrenme hızı, yani parametre güncellemelerinin büyüklüğü, 0.001 olarak ayarlanan optimal öğrenme hızı ile dikkatlice kontrol edildi. Bu seçim, modelin eğitim

süreci boyunca hızlı ama istikrarlı bir şekilde öğrenmesini sağladı ve aşırı büyük adımlar nedeniyle sapmalara neden olmadan istikrarlı ve etkili bir optimizasyon süreci sağladı. Sonuç olarak model hem genel doğruluk hem de genelleme performansı açısından dengeli bir öğrenme eğrisi izledi.

Eğitim sürecinde tercih edilen optimizasyon algoritması, derin öğrenme alanında yaygın olarak kullanılan Adam (Adaptive Moment Estimation) algoritmasıdır. Adam algoritması, klasik gradyan iniş yöntemlerine kıyasla daha hızlı yakınsama sağladığı ve uyarlanabilir öğrenme oranları sunarak farklı parametrelerin güncellenmesini optimize ettiği için tercih edildi. Bu özellikler sayesinde model eğitiminde hem verimlilik hem de eğitim sürecinin istikrarı ve başarısı önemli ölçüde artırıldı (199).

Modelin çıktılarının hata miktarını hesaplamak ve öğrenmeyi yönlendirmek için şu iki bileşenli kayıp fonksiyonu kullanıldı:

Mean Squared Error (MSE): Modelin performans değerlendirmesinde tahmin edilen eklem koordinatlarıyla gerçek (referans) koordinatlar arasındaki farklar karelenerek ortalama hata (Mean Squared Error, MSE) hesaplandı. MSE, özellikle regresyon türü çıktılar için yaygın ve ideal bir ölçüt olarak kabul edilir; çünkü tahmin hatalarının büyüklüğünü kare alarak daha yüksek hatalara karşı duyarlı bir performans değerlendirmesi sağlar. Bu sayede modelin konum tahminlerindeki doğruluk hassasiyeti objektif biçimde analiz edildi ve geliştirilme potansiyeli belirlendi (200).

Objectness Loss: Model sadece eklem noktalarını tespit etmekle kalmayıp görüntüdeki insan varlığının da doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu bağlamda model aynı anda hem poz tahmini hem de insan varlığı tespiti görevlerini yerine getirerek analizlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmaktadır. Böylece eklem koordinatlarının geçerliliği ancak insan varlığı doğrulandıktan sonra değerlendirilmekte ve yanlış poz tespiti önlenmektedir (201).

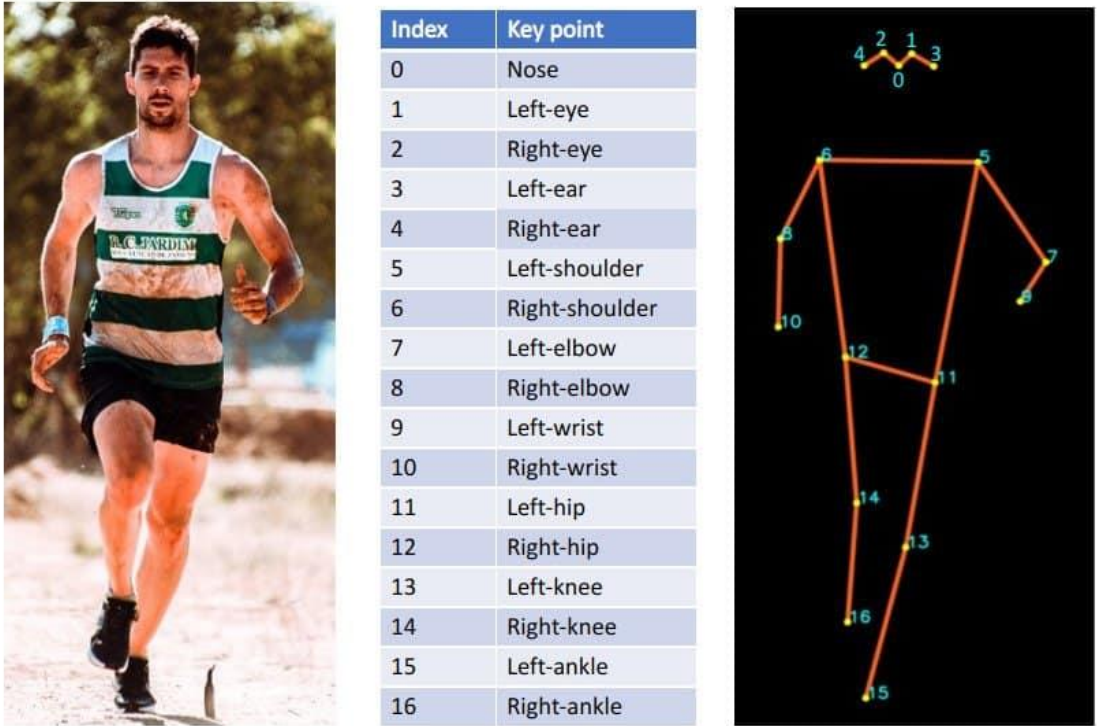
Eğitim süreci, yüksek performanslı bir bilgi işlem altyapısı üzerinde gerçekleştirildi. NVIDIA TESLA A40 GPU'nun sağladığı paralel işlem gücü sayesinde model, karmaşık hesaplamaları yüksek hız ve verimlilikle gerçekleştirebildi. Bu donanım desteği, eğitim sürecinin optimize edilmesini sağladı ve toplam eğitim süresi yaklaşık 1 saat gibi çok kısa bir sürede tamamlandı. Sonuç olarak model, hızlı prototipleme ve parametre ayarlama süreçlerini destekleyerek araştırmanın verimliliğini artırdı. Python 3.9.15 programlama dili kullanılarak geliştirilen proje, poz tahmini için Ultralytics kütüphanesini ve GPU desteği için PyTorch kütüphanesini kullandı.

Model eğitim parametreleri ayrıca aşağıda belirtilmiştir:

- Epoch: 100
- Batch size: 16
- Öğrenme oranı: 0.001
- Optimizasyon algoritması: Adam
- Kayıp fonksiyonu: Mean Squared Error (MSE) + Objectness loss

3.8.3. Poz Tahmini ve Veri Çıkarımı

Model eğitimi tamamlandıktan sonra performans, test veri seti üzerinde kapsamlı bir şekilde değerlendirildi. Bu değerlendirme aşamasında model, her video karesi için insan vücudundaki 17 temel kilit noktanın koordinatlarını yüksek doğrulukla tahmin etti. Anahtar noktalar, insan anatomisindeki kritik bölgeleri temsil eder ve baş, boyun, her iki omuz, dirsek, bilek, kalça, diz ve ayak bileği gibi yapıları içerir (Şekil 3.14.) (202).



Şekil 3.14. 17 temel anahtar nokta (202).

Her video karesinde modelin çıktısı, her bir anahtar noktasının (x_i, y_i) biçimindeki iki boyutlu konumunu temsil eder. Bu koordinatlar, görüntü düzlemine karşılık gelen eklem noktasının kesin konumunu temsil eder ve hem poz izlemenin hem de ayrıntılı hareket analizinin temelini oluşturur. Böylece hareketlerin zamansal ve mekânsal değişimleri hassas bir şekilde izlenerek performans değerlendirmesi için güvenilir veriler sağlanabilir.

Bu tahmini koordinatlarla aşağıdaki işlemler gerçekleştirildi:

Hareket dizileri oluşturuldu: Aynı bireyin ardışık video karelerinde tespit edilen pozlar, sistematik olarak takip edilerek hareket akışları oluşturuldu. Bu yöntem sayesinde örneğin, bir ön vuruşun başlangıcından tamamlanmasına kadar tüm pozisyon değişiklikleri ve hareket dinamikleri ayrıntılı olarak izlenebildi. Böylece hareketin zamansal evrimi ve teknik detayları ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiş ve performans değerlendirmeleri için zengin veriler elde edilmiştir.

Zamansal filtreleme yapıldı: Model tarafından üretilen tahminlerin güvenilirliğini artırmak amacıyla güven puanı düşük anahtar noktalar, veri kümesinden çıkarıldı. Bu yaklaşım, analizlerin yalnızca modelin yüksek doğrulukla belirlediği koordinatlar üzerinde yapılmasını ve güvenilir kabul edilmesini sağladı. Böylece poz tahmin sonuçlarının doğruluğu ve tutarlılığı artırıldı, yanlış poz tespitlerinin veya yanlış veri girdilerinin performans değerlendirmeleri üzerindeki etkisi en aza indirildi.

Açısal analizler yapıldı: Tahmini koordinatlar kullanılarak sporcuların hareketlerini daha iyi anlamak için bazı temel vücut açılarının hassas ölçümleri yapıldı. Bu açısal analizler, kas-iskelet sistemi dinamiklerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynayarak, hareket kalitesi ve performansının objektif olarak incelenmesine olanak sağladı. Örneğin:

Dirsek açısı değerlendirildi: Üst kol ile ön kol arasındaki açı hesaplanarak sporcuların kas iskelet sistemindeki dinamik hareketler değerlendirildi. Bu açısal ölçüm, dirsek eklemi hareketliliğinin ve kuvvet üretim kapasitesinin anlaşılmasına katkıda bulunarak sporcuların performans potansiyeli ve hareketliliği hakkında önemli bilgiler sağladı.

Omuz rotasyonu değerlendirildi: Omuz ve kol koordinatlarına dayalı açısal dönüşüm hesaplamaları ile sporcuların üst vücut rotasyon yetenekleri kapsamlı bir şekilde değerlendirildi. Bu analiz, dönme hareketlerinin etkinliğini ve kontrolünü anlamayı amaçlar ve üst vücut stabilitesi ve güç üretimi açısından önemli bilgiler sağlar. Böylece sporcuların teknik performansı ve hareket verimliliği hakkında derinlemesine çıkarımlar yapılabilir.

Diz ve kalça eklemlerinin hareket açıklığı analiz edilerek sporcuların atletik performansı için kritik öneme sahip esneklik ve biyomekanik fonksiyonlar değerlendirildi. Bu değerlendirmeler sadece eklem hareketlerinin optimal aralıklarda gerçekleşip gerçekleşmediğini ortaya koymakla kalmadı, aynı zamanda hareket kalitesi ve yaralanma risklerinin azaltılması açısından da önemli veriler sağladı. Böylece

sporcuların fonksiyonel kapasitesi ve performans potansiyeli hakkında kapsamlı çıkarımlar yapıldı.

Bu analiz sürecinin sonunda sadece bireysel poz tayini yapılmadı, bu pozların zaman içindeki dinamik değişimleri de sistematik olarak incelendi. Bu sayede vücut mekaniği ve hareket kalitesi açısından kapsamlı değerlendirmeler yapıldı, sporcuların performanslarındaki gelişim ve potansiyel zayıflıklar detaylı bir şekilde ortaya kondu. Böylece hareketlerin sürekliliği ve koordinasyonu hakkında derinlemesine bilgi edinildi ve performans optimizasyonu için sağlam bir temel oluşturuldu.

3.8.4. Hareket Sınıflandırması ve Analizi

Elde edilen poz dizileriyle zaman içinde meydana gelen hareketleri tanımlamak ve sınıflandırmak için LSTM mimarisini kullanan derin öğrenmeye dayalı bir sınıflandırma modeli oluşturuldu. LSTM yapısı, zaman serisi verilerindeki sıralı bağımlılıkları ve zamansal kalıpları etkin bir şekilde modelleyebilmesi sayesinde sporcuların hareket dinamiklerini başarıyla analiz etti. Bu sayede hareketlerin sırası ve sürekliliği göz önünde bulundurularak performans değerlendirmeleri için yüksek doğrulukta sınıflandırmalar elde edildi.

Bu sürecin bir sonucu olarak her tenis hareketi ayrıldı ve geçici olarak analiz edildi. Hareketlerin başlangıç ve bitiş noktaları titizlikle tespit edildi ve her hareketin zaman içindeki momentleri ve dizileri yüksek doğrulukla belirlendi. Bu sayede sporcuların hareket performansları detaylı bir zaman çizelgesi üzerinde incelendi ve hareketlerin sırası ve sürekliliği hakkında güvenilir bilgiler elde edildi. Böylece teknik ve taktiksel analizler için sağlam ve kesin bir veri altyapısı oluşturuldu.

Segmentasyon süreci sadece hareket türlerinin zamansal olarak ayrılmasıyla sınırlı kalmadı, aynı zamanda sporcuların hareket performanslarını çok boyutlu ve kapsamlı bir perspektiften değerlendirmek için ayrıntılı analizlere de izin verdi. Bu bağlamda sporcuların performanslarını daha bütüncül bir şekilde ölçmek ve yorumlamak için dört temel performans ölçütü -bu ölçütler aşağıda ayrıntılı olarak ele alınacaktır- kullanıldı. Böylece hareketlerin teknik doğruluğu, sürekliliği, etkinliği ve koordinasyonu gibi kritik boyutlar sistematik olarak incelendi.

Ekleme Açısı Stabilesi: Bu metrik, sporcuların hareketi sırasında belirli ekleme noktalarında (örneğin omuz, dirsek, diz) oluşan açıların zamansal sürekliliğini ve stabilesini analiz etmeye odaklanır. Yüksek stabiliteye sahip olmak, teknik doğruluğu korumak ve yaralanma riskini azaltmak için kritik bir göstergedir. Ani ve kontrolsüz açı

değişiklikleri hareketin biyomekanik verimini olumsuz etkileyerek sporcunun performansında düşüşe neden olabilir. Bu nedenle açısal stabilitenin değerlendirilmesi hem performansın iyileştirilmesi hem de yaralanmayı önleme stratejilerinin geliştirilmesi için önemli bir parametre olarak kabul edilir.

Denge ve Ağırlık Transferi: Bir hareketin akıcı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için vücut ağırlığının zamanında ve doğru yönde aktarılması kritik öneme sahiptir. Bu metrik, sporcunun ayak pozisyonu, ağırlık merkezi ve gövde duruşu gibi temel unsurları değerlendirir ve hareket sırasında dengenin korunup korunmadığını ve ağırlık transferinin ne kadar verimli yapıldığını ortaya çıkarır. Özellikle yüksek hızlı vuruşlarda bu parametre performansın belirleyici faktörlerinden biri olarak kabul edilir. Böylece ağırlık transferi ve denge kontrolünün etkinliği, sporcunun teknik yeterliliği ve hareket verimliliği hakkında önemli bilgiler sağlar.

Kuvvet Üretimi ile İlişkili Gövde Rotasyonu: Vücut rotasyonu, özellikle forehand ve servis gibi hareketlerde kuvvet üretiminin temel bileşenlerinden biri olarak kritik bir rol oynar. Bu metrik, kalça ve gövde bölgelerindeki dönme hareketinin kinetik zincir boyunca ne kadar etkili ve uyumlu bir şekilde iletiltiğini sistematik olarak analiz eder. Optimum gövde dönüşü, rakete iletilen kuvvetin artmasına ve hareket sırasında oluşabilecek enerji kayıplarının en aza indirilmesine katkıda bulunur. Bu hem hareket verimliliğini artırır hem de sporcunun performansını olumlu etkiler.

Hareket Senkronizasyonu: Başarılı atletik performans elde etmek için tek tek kas gruplarının güçlü olması yeterli değildir; bu kas gruplarının da eş zamanlı, koordineli ve senkronize bir şekilde çalışması gerekir. Hareket senkronizasyon metriği; omuz, kalça ve bilek gibi farklı vücut parçalarının uyumunu ve bu parçaların hareketin genel ritmine ne ölçüde katkıda bulunduğunu objektif olarak değerlendiren ölçümlerden oluşur. Bu parametre, sporcunun hem teknik yeterliliğinin hem de motor koordinasyon becerilerinin önemli bir göstergesi olarak kabul edilir ve performansı optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

3.9. Değerlendirme Metrikleri

3.9.1. Model Performans Metrikleri

Parametre Sayısı: Derin öğrenme modellerinde parametreler, öğrenme sürecinde güncellenen ağırlıklar ve önyargılar gibi öğrenilebilir öğelerin toplam sayısını temsil eder. Bu sayı, modelin kapasitesinin (öğrenme yeteneği) ve aşırı uyum riskinin önemli

bir belirleyicisidir. Daha fazla sayıda parametre daha karmaşık kalıpları öğrenme potansiyeli sunsa da aşırı parametrelili modeller daha fazla veri gerektirir ve daha yüksek hesaplama maliyetlerine sahiptir.

FLOP's (Floating Point Operations): Flop'lar, bir girdiyi işlerken derin öğrenme modelinin gerçekleştirdiği kayan nokta işlemlerinin toplam sayısıdır. Bu değer, hesaplama maliyetini ve donanım gereksinimlerini değerlendirmek için kullanılır. Flop'lar, özellikle mobil ve gömülü sistemler gibi kaynak kısıtlı platformlarda modelin uygunluğunun belirlenmesinde kritik bir rol oynar (203).

Ortalama FPS (Frames Per Second): Modelin saniyede işleyebileceği görüntü sayısı veya FPS (saniyedeki kare sayısı), özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda kritik bir performans göstergesidir. Spor analizi ve güvenlik kameraları gibi anlık veri işleme gerektiren alanlarda FPS değeri yüksek modeller tercih edilir çünkü bu, modelin hızlı ve kesintisiz işlem yapmasını sağlar. Ek olarak, yüksek FPS, donanım kaynaklarının etkin bir şekilde kullanıldığını ve işleme sürecinin verimli bir şekilde gerçekleştirildiğini gösterir. Bu nedenle FPS değeri, gerçek zamanlı sistemlerde kullanıcı deneyimi ve analiz doğruluğu açısından önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir (204).

Algılama Performansı – mAP@50 (mean Average Precision at IoU = 0.5):

Ortalama Duyarlık (AP), duyarlık-geri çağırma eğrisinin altındaki alana göre hesaplanır ve tüm sınıflar için bu değerlerin ortalaması alınarak harita elde edilir. Bu metrikte, doğru tahmin ile gerçek nesne arasındaki Birleşim Üzerinden Kesişme (IoU) değeri % 50'nin üzerinde olmalıdır (205).

$$mAP@50 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i \quad (IoU \geq 0.5)$$

Burada \$ N \$, modelin sınıflandırdığı toplam sınıf sayısını temsil eder. MAP @ 50 modelin genel doğruluğunu orta zorlukta test eder.

mAP@50-95:

mAP (Ortalama Hassasiyet) değeri, Birleşme (IoU) eşikleri üzerindeki farklı kesişme noktalarında bu sefer 0.5'ten 0.95'e, 0.05 artışlarla hesaplanır. Bu yaklaşım, modelin performansını hem düşük hem de yüksek IoU eşiklerinde ölçerek daha dengeli ve ayrıntılı bir değerlendirme sağlar. Özellikle küçük nesneleri tespit etmek veya sınırlı verilerle eğitilen sınıfların performansını daha doğru ve kapsamlı bir şekilde ortaya

çıkarmak için oldukça bilgilendirici bir yöntemdir. Böylece modelin genel doğruluğu ve hassasiyeti farklı senaryolarda kapsamlı bir şekilde analiz edilir (206).

Ortalama Precision (Kesinlik): Precision, modelin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin ne kadarının doğru pozitif olduğunu gösterir (207):

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Burada TP: True Positive, FP: False Positive. Yüksek precision, modelin “var” dediği nesneleri isabetli şekilde saptadığını gösterir.

Ortalama Recall (Duyarlılık): Recall, gerçek pozitif sınıfların ne kadarının doğru şekilde tahmin edilebildiğini ölçer:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

FN: False Negative. Yüksek recall değeri, modelin gözden kaçırmadan saptama yeteneğini gösterir. Precision-recall dengesi önemlidir; bu denge için F1-score da kullanılabilir (207).

3.9.2. Biyomekanik Analiz

Ortalama Eklem Açısı: Bir hareket işlemi sırasında belirli bir eklemden ölçülen açısal verilerin aritmetik ortalaması, hareket sırasında o eklemde ortalama açısal konumunu temsil eder. Bu değer, hareketin genel açısal özelliklerini yansıtarak eklemde ortalama pozisyonunun ve dolayısıyla sporcunun hareket kalitesinin değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olarak kullanılır. Böylece hareket analizi ve performans değerlendirmelerinde eklem stabilitesi ve kontrolü hakkında bilgi verilir (208).

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$$

Bu metrik, eklemde hareket sırasında ne kadar aktif olduğunu ve hangi açısal aralıkta çalıştığını gösterir. Düşük açılar, eklemde daha sınırlı ve kısıtlı bir hareket aralığında olduğunu gösterirken yüksek açılar, geniş bir hareket aralığını (ROM) temsil

eder. Bu nedenle bu ölçüm, sporcunun hareketliliğini ve eklem işlevselliğini değerlendirmede önemli bilgiler sağlar.

Maksimum Açı: Hareket süresi boyunca ölçülen maksimum eklem açısı, kas-iskelet sisteminin esneklik sınırlarını ve biyomekanik stres altındaki tepkilerini değerlendirmek için önemli bir göstergedir. Bu maksimum fonksiyonel açıklık, eklem ulaşabileceği en geniş hareket aralığını temsil eder ve sporcuların performans kapasitesi ve yaralanma risklerinin analizinde temel bir parametre olarak kullanılır. Böylece hareketlerin etkinliği ve güvenliği hakkında kapsamlı bilgiler elde edilir (208, 209).

90. Percentile: Verilerin % 90'ının altında kalan açı değeri, eklem hareket sırasındaki genel açısal dağılımını yansıtır ve aşırı değerlerden etkilenmeden ortalama hareket eğilimini ortaya çıkarır. Ortalama ve maksimum açı değerlerinin aksine bu metrik, sporcuların hareketlerinin sürekliliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için daha güvenilir bir göstergedir. Özellikle tekrarlayan hareketlerde kas ve eklemlerin ne kadar yoğun ve sürdürülebilir bir şekilde kullanıldığını analiz etmek için tercih edilir ve performans ve yaralanma risklerinin anlaşılmasına katkıda bulunur (209).

3.9.3. Teknik Performans

Vuruş Tipi: Oyuncu tarafından gerçekleştirilen vuruş türleri (örneğin; forehand, backhand, servis) teknik açıdan farklı mekanik özelliklere sahiptir. Sporcuların teknik yeterliliğinin ve çok yönlülüğünün değerlendirilmesi açısından bu vuruşların doğru ayrılması büyük önem taşır. Ayırma işlemi, her vuruşun kendine özgü hareket kalıplarını ve biyomekanik özelliklerini ortaya çıkararak eğitimin kişiselleştirilmesini ve performans geliştirme stratejilerinin optimizasyonunu sağlar. Bu sayede oyuncuların teknik becerilerinin güçlü yönleri ve gelişim alanları daha net bir şekilde tespit edilir (209).

Dağılım (Spread): Belirli bir vuruş türü için elde edilen konum, yön, açı veya hız gibi değişkenlerin varyansı, oyuncunun o vuruşu ne kadar tutarlı veya değişken bir şekilde yürüttüğünü gösterir. Geniş bir dağılım, sporcunun inmeyi farklı şekillerde ve çeşitli tekniklerle gerçekleştirebileceğini gösterirken son derece yüksek bir varyans teknik dengesizliği ve tutarsızlığı gösterebilir. Bu nedenle varyans analizi hem oyuncunun çok yönlülüğünü hem de performanslarındaki tutarlılık düzeyini değerlendirmek için önemli bir parametredir (209).

Tutarlılık (Consistency): Aynı vuruşun tekrarlarında meydana gelen benzerlik seviyesi teknik kararlılığı gösterir. Teknik stabilite, oyuncunun motor beceri gelişiminin ve hareketlerin egzersiz hafızasının bir göstergesi olarak kabul edilir. Matematiksel

terimlerle bu, düşük bir standart sapma ile temsil edilir; yani tutarlı ve kontrollü teknik uygulamayı gösteren vuruşlar arasında düşük bir varyasyon. Bu metrik, sporcuların performansının istikrarını değerlendirmede önemli bir ölçüdür (209).

$$\text{Consistency} \propto \frac{1}{\sigma^2} \quad \text{veya} \quad \frac{1}{SD}$$



4. BULGULAR

Araştırma kapsamında geliştirilen bilgisayarlı görü tabanlı poz tahmini sistemi, tenis sporcularının hareket dinamiklerini analiz etmek amacıyla kullanıldı ve elde edilen bulguların modelin teknik doğruluğunu ve uygulama potansiyelini ortaya koyduğu görüldü. Sistem, performans metrikleri ve biyomekanik değerlendirmeler açısından tatmin edici sonuçlar sunarak sporcuların teknik davranışlarının nesnel verilerle incelenmesine önemli katkılar sağladı. Elde edilen veri ve analizler, dört ana başlık altında sistematik olarak değerlendirildi:

4.1. Model Mimari ve Performans Değerleri

YOLOv8-Pose tabanlı olarak geliştirilen poz tahmini modeli, 26.5 milyon parametre ve 40.7 GFLOPs işlem karmaşıklığıyla dengeli bir mimari sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde model, hem doğruluk hem de hız açısından tatmin edici bir performans sergiledi. Gerçek zamanlı uygulamalara uygunluğu kanıtlanan model, ortalama 17.1 FPS (Frame Per Second) hızına ulaşarak hızlı ve dinamik spor ortamlarında etkili bir şekilde kullanılabildiğini gösterdi (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. YOLOv8-Pose modeline ait mimari özellikler ve işlem hızı.

Metrik	Değer
Parametre Sayısı	26.5M
FLOPs	40.7G
Ort. FPS	17.1

Algılama doğruluğu bağlamında elde edilen mAP@50 değeri 0.941 ve mAP@50–95 değeri 0.772 olarak belirlendi. Bu sonuçlar, modelin hem basit hem de karmaşık pozisyonları yüksek bir doğruluk oranıyla başarılı şekilde tespit edebildiğini göstermektedir. Model, farklı zorluk seviyelerindeki hareketleri hassas ve güvenilir biçimde analiz edebildi. Ayrıca, ortalama precision (0.867) ve recall (0.884) skorları, modelin yanlış pozitif tahminleri etkili biçimde azalttığını ve gerçek pozları yüksek başarıyla yakaladığını göstermektedir. Bu göstergeler, modelin doğruluk ve hassasiyet açısından dengeli bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır (Tablo 4.2). Bu durum, poz tahmini sisteminin güvenilirliğini kuvvetli bir şekilde desteklemektedir. Elde edilen performans, sahaya entegre edilen yapay zekâ tabanlı sistemlerin doğruluk ve hız

arasında optimal bir denge kurabilmesinde kritik bir örnek teşkil etmektedir. Böylece uygulamaya yönelik gerçek zamanlı çözümlerde hem yüksek doğruluk hem de işlem hızı sağlanabilmektedir.

Tablo 4.2. Algılama başarımları metrikleri (mAP, Precision, Recall).

Metrik	Değer
mAP@50	0.941
mAP@50-95	0.772
Ort. Precision	0.867
Ort. Recall	0.884

4.2. Biyomekanik Analiz

Model tarafından elde edilen iskelet verileri temel alınarak gerçekleştirilen biyomekanik analizler, tenis oyuncularının hareket simetrisi ve kas-iskelet sistemindeki olası dengesizliklere dair önemli bulgular sağladı. Özellikle üst ekstremitelerde gözlemlenen asimetri, sağ kolun ortalama açısının (139.4°) sol kolunkine (131.2°) kıyasla anlamlı derecede daha yüksek olmasıyla belirgin hale geldi (Tablo 4.3). Bu tür asimetrikler, oyuncuların hareket paternlerini ve genel performansını doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle antrenman programları ve rehabilitasyon stratejilerinin, bu bireysel farklılıkları göz önünde bulundurarak kişiselleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece dengesizliklerin giderilmesi ve performansın optimize edilmesi mümkün hale gelirken sakatlanma riskleri de azaltılabilir. Bu fark, oyuncuların dominant kollarını daha sık ve geniş açılarla kullandığını göstermektedir. Bu durum, belirli bir yöne aşırı yüklenmeye ve dolayısıyla kas-iskelet sisteminde dengesizliklerin ve potansiyel sakatlanma risklerinin ortaya çıkmasına yol açabilir. Bu nedenle antrenman ve rehabilitasyon programlarında bu yüklenme farklılıklarının dikkatle değerlendirilmesi ve dengelenmesi gerekmektedir. Alt ekstremiteler açısından yapılan analizde sağ bacağın ortalama açısı 169.1° iken sol bacağın ortalama açısı 168.2° olarak ölçüldü bu iki değer arasında yalnızca minimal bir fark tespit edildi. Bu sonuç, oyuncuların denge merkezini korumak amacıyla etkili ve dengeli bir duruş stratejisi geliştirdiklerini düşündürmektedir. Böyle bir denge hem performansın sürdürülebilirliği hem de sakatlanma risklerinin azaltılması açısından önemli bir gösterge olarak değerlendirilir. Önemli bir bulgu olarak %0.0 ölçülen 90. persentil değeri, oyuncuların büyük çoğunluğunun maksimum eklem

açıklığına ulaşamadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, yetersiz esneklik, hareket kısıtlılığı veya teknik uygunsuzluk gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Hem performansın sürdürülebilirliği hem de sakatlanma risklerinin azaltılması açısından bu tür kısıtlamaların tespiti ve giderilmesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle antrenman programlarında esnekliğin artırılması ve doğru tekniklerin benimsenmesi için özel müdahaleler gerekmektedir.

Tablo 4.3. Sporculara ait eklem açısı dağılımları ve yüzdelik değerler.

Eklem	Ort. Aç	Maks. Aç	90.Perc.
Sağ Kol	139.4	180.0°	%7.4
Sol Kol	131.2	180.0°	%9.1
Sağ Bacak	169.1	180.0°	%0.0
Sol Bacak	168.2	180.0°	%0.0

Tablo verileri, özellikle bacaklardaki 90. persentil değerlerinin %0.0 olarak ölçülmesiyle dikkat çekmektedir. Bu bulgu, katılımcıların %90'ının maksimum hareket açıklığına ulaşamadığını ve dolayısıyla hareket zincirinde belirgin bir esneklik eksikliği bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, sporcuların performansını sınırlayabileceği gibi sakatlanma riskini de artırabileceğinden antrenman ve rehabilitasyon programlarında esnekliğin iyileştirilmesine yönelik özel müdahalelerin gerekliliğine işaret etmektedir. Benzer şekilde kollar arasındaki açı farkı da dominant tarafın daha yoğun kullanıldığına dair önemli bir göstergedir. Bu durum, teknik yüklenmenin her iki taraf arasında eşit dağılım göstermediğini ve dolayısıyla dengesizliklerin oluşabileceğini düşündürmektedir. Böyle bir asimetri hem performans verimliliğini etkileyebilir hem de uzun vadede kas-iskelet sisteminde aşırı yüklenmeye bağlı sakatlanma riskini artırabilir. Bu nedenle antrenman süreçlerinde bu tür dengesizliklerin fark edilerek dengelenmesine yönelik çalışmaların yapılması önem taşımaktadır.

4.3. Vuruş Tiplerine Göre Teknik Performans

Yapılan teknik analizler, tenis sporcularının vuruş çeşitliliği ve bu vuruşların tutarlılığı hakkında önemli bilgiler sundu. Analizler, forehand vuruşlarının tüm vuruşlar arasında %73.6 oranla en yaygın kullanılan teknik olduğunu ortaya koydu. Bu yüksek kullanım oranı, forehand vuruşunun oyun stratejilerindeki merkezi rolünü ve sporcuların bu teknik üzerinde yoğunlaştığını göstermektedir. Ayrıca bu veri, antrenman

programlarının ve performans iyileştirme stratejilerinin öncelikli olarak forehand vuruşuna odaklanması gerektiğine işaret etmektedir. (Tablo 4.4). Ancak forehand vuruşunun yüksek kullanım oranına rağmen tutarlılık oranının %74.1 gibi nispeten düşük olması dikkat çekicidir. Bu bulgu, forehand vuruşlarının oyuncular arasında önemli ölçüde varyasyon içerdiğini ve biyomekanik zincirin bu hareket sırasında tam anlamıyla stabilize edilemediğini düşündürmektedir. Bu durum, forehand vuruşlarının teknik olarak daha fazla kontrol ve iyileştirme gerektirdiğine işaret ederken, antrenörlerin bu noktaya odaklanmasının doğru olacağını göstermektedir. Buna karşılık backhand vuruşları %24.6 oranında kullanıldı ve %78.0'lik tutarlılık oranıyla forehand'e kıyasla daha dengeli bir performans sergiledi. Servis vuruşları ise toplam vuruşlar içinde %1.8 gibi nispeten düşük bir kullanım oranına sahip olmasına rağmen %90.8 gibi yüksek bir tutarlılık oranıyla öne çıktı. Bu durum, servis vuruşlarının teknik olarak daha stabil ve kontrollü yapıldığını, dolayısıyla performans açısından kritik ve güvenilir bir hareket olduğunu göstermektedir. Ayrıca servis performansının yüksek tutarlılığı, maç sonuçlarını doğrudan etkileyen önemli bir faktör olduğunu vurgulamaktadır. Bu durum, servis hareketinin standart bir mekanik çerçevede ve yüksek tekrar edilebilirlik düzeyiyle gerçekleştirildiğini göstermektedir. Bu da servisin teknik açıdan daha oturmuş ve sistematik bir şekilde uygulandığını düşündürmektedir. Dolayısıyla servis vuruşu, sporcuların teknik stabilitesini yansıtan ve performans tutarlılığında önemli bir rol oynayan temel hareketlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 4.4. Vuruş tipine göre dağılım ve tutarlılık oranları.

Vuruş Tipi	Dağılım	Tutarlılık
Forehand	%73.6	%74.1
Backhand	%24.6	%78.0
Servis	%1.8	%90.8

Servis vuruşlarında tutarlılık oranının %90.8 gibi yüksek bir seviyede olması, bu hareketin teknik açıdan sağlam ve tekrar edilebilir bir biçimde uygulandığını açıkça göstermektedir. Bu durum, servis vuruşlarının sporcular tarafından sistematik ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirildiğine işaret eder. Öte yandan forehand gibi daha dinamik ve çeşitli kullanım alanlarına sahip vuruşlarda teknik varyasyonların daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, söz konusu vuruş türlerinin uygulamasında farklılıkların ve kişisel uyarlamaların daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır.

Böylece vuruşların teknik istikrarı ve çeşitliliği arasındaki farklar net bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Bu tablo, tenis sporcularının hem teknik eğitim hem de kondisyonel gelişim süreçlerinde hangi alanlara öncelik vermesi gerektiğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Özellikle, belirlenen varyasyonlar ve tutarlılık oranları, antrenman programlarının sporcunun ihtiyaçlarına uygun şekilde planlanması gerekliliğini vurgulamaktadır. Böylece hem teknik becerilerin geliştirilmesi hem de fiziksel dayanıklılığın artırılması hedeflenerek performansın bütüncül bir yaklaşımla iyileştirilmesi mümkün olmaktadır.

4.4. Bulguların Pratik Çıkarımları

4.4.1. Antrenman Optimizasyonu

Bacaklardaki düşük hareket açıklığı, sporcular arasında esneklik eksikliğinin yaygın olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, yalnızca performansın sınırlandırılmasıyla kalmayıp aynı zamanda sakatlık riskinin artmasına da zemin hazırlamaktadır. Esnekliğin yetersizliği, hareket kabiliyetini kısıtlayarak kas ve eklem üzerinde gereksiz stres oluşturabilir; bu da uzun vadede yaralanmalara yol açabilir. Dolayısıyla antrenman programlarında bacak esnekliğinin artırılmasına yönelik özel çalışmaların yer alması, sporcuların hem performansını optimize etmek hem de sakatlanma risklerini azaltmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle antrenman programlarına düzenli dinamik esneklik egzersizlerinin eklenmesi gerekmektedir. Özellikle kalça ve diz eklemlerine yönelik mobilite çalışmalarının uygulanması, sporcuların sahadaki hareket açıklığını artırarak daha etkili pozisyon alma ve yön değiştirme becerilerini geliştirir. Bu tür hedeflenmiş egzersizler hem performans artışını destekler hem de eklem sağlığını koruyarak sakatlanma risklerini azaltır.

4.4.2. Teknik İyileştirme

Forehand vuruşlarında gözlemlenen tutarsızlık, bu vuruş türünün teknik açıdan daha fazla varyasyon ve bireysel farklılık içerdiğine işaret etmektedir. Bu durumu gidermek ve performansın tutarlılığını artırmak amacıyla video tabanlı geri bildirim sistemlerinin kullanılması önerilmektedir. Bu tür sistemler, sporculara anlık ve görsel geri bildirimler sunarak teknik hataların fark edilmesini kolaylaştırmakta ve hareket kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Böylece antrenörler ve sporcular, daha objektif ve etkili bir eğitim süreci yürütebilmektedir. Bu sistemler, sporcuların kendi vuruşlarını görsel olarak izlemelerine olanak tanıyarak, hareketlerine dair

farkındalıklarını artırır. Sonuç olarak teknik zincirdeki hataların tespit edilmesi ve düzeltilmesi süreçlerinde etkili bir araç işlevi görürler. Görsel geri bildirim, sporcuların kendilerini objektif biçimde değerlendirmelerine ve antrenmanlarını daha bilinçli yönlendirmelerine imkân sağlayarak performans gelişimini destekler.

4.4.3. Risk Yönetimi

Servis gibi ani ve yoğun yüklenme gerektiren hareketler, kas-iskelet sistemine önemli ölçüde mekanik stres uygular. Bu tür hareketlerde kas dayanıklılığının artırılması, sporcuların söz konusu yüklenmelere karşı direncini yükselterek performansın sürekliliğini sağlamada kritik bir rol oynar. Kas dayanıklılığının gelişimi, kas liflerinin yorulma süresini uzatır ve sakatlanma riskini azaltırken sporcuların yüksek yoğunluklu hareketleri etkin ve güvenli bir şekilde gerçekleştirmesine olanak tanır. Eksantrik kuvveti artırmaya yönelik egzersizlerin yanı sıra dengeyi geliştiren antrenmanların programlara sistematik olarak dâhil edilmesi sakatlık risklerinin minimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Eksantrik çalışmalar, kasların kuvvet kapasitesini ve dayanıklılığını artırırken, denge antrenmanları proprioseptif kontrolü ve dengeyi geliştirerek düşme ve ani hareketlerde oluşabilecek yaralanma olasılığını azaltır. Bu bütüncül yaklaşım, sporcuların hem performansını optimize etmeye hem de uzun vadeli sağlıklarını korumaya yönelik etkili bir strateji sunar. Ayrıca Tablo 4.3'te sağ ve sol bacaklar için 90. persentil değerlerinin %0.0 olarak ölçülmesi, büyük çoğunluğun esneklik sınırlarını aşmadığını ve bu durumun sakatlık riskini artırdığını göstermektedir. Bu bulgu, sporcuların hareket açıklığı açısından kritik esneklik eksikliklerine işaret etmekte olup önleyici antrenmanların önemini vurgulamaktadır. Öte yandan Tablo 4.4'te yer alan servis vuruşlarının yüksek tutarlılık oranı (%90.8), teknik tekrarların performans üzerinde doğrudan ve olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, antrenman süreçlerinde servis tekniklerine verilen önemin doğruluğunu desteklemekte ve yüksek tutarlılığın oyun başarısına katkısını göstermektedir.

Bu üç alt başlık birlikte değerlendirildiğinde elde edilen bulguların yalnızca istatistiksel anlam taşımadığı, aynı zamanda saha uygulamalarına doğrudan yansıyan antrenman ve sağlık stratejilerine önemli pratik katkılar sağladığı açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, performansın artırılması ve sakatlık risklerinin azaltılması amacıyla geliştirilen programların bilimsel temellere dayandırılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Böylece araştırmanın saha içi uygulamalara dönük etkisi ve faydası somut olarak ortaya konmuştur. Antrenman optimizasyonu çerçevesinde özellikle alt

ekstremitedeki kısıtlı hareket açıklıkları belirgin bir şekilde ön plana çıkmaktadır. Bu durum, sporcuların performansını artırmak ve sakatlık risklerini minimize etmek amacıyla dinamik esneklik çalışmalarının gerekliliğini ve önemini açıkça ortaya koymaktadır. Alt ekstremitte esnekliğin iyileştirilmesi, hareket kabiliyetinin genişlemesi ve fonksiyonel mobilitenin artırılması için kritik bir unsur olarak değerlendirilmekte; dolayısıyla antrenman programlarının bu doğrultuda yapılandırılması büyük önem taşımaktadır. Teknik iyileştirme kapsamında yapılan değerlendirmeler, forehand vuruşlarında gözlemlenen tutarsızlıklar ve yüksek varyasyon oranlarının, bireyselleştirilmiş teknik analizlerin ve video destekli geri bildirim sistemlerinin kullanımına olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu yaklaşımlar, sporcuların hareketlerindeki teknik eksikliklerin objektif olarak tespit edilmesini sağlayarak antrenman sürecinde hedefe yönelik müdahalelerin yapılmasına olanak tanır. Böylece forehand vuruşlarının teknik doğruluğu artırılabilir ve performans tutarlılığı geliştirilebilir. Risk yönetimi yönünden bakıldığında servis gibi yüksek stres ve ani yüklenme gerektiren hareketlerde ortaya çıkan kuvvet ve denge talepleri, özel antrenman programlarıyla desteklenmelidir. Bu tür antrenmanlar, sporcunun kas-iskelet sistemini güçlendirerek ani kuvvet uygulamalarına karşı direncini artırmayı hedefler. Dolayısıyla sporcu sağlığının sürdürülebilirliği ve sakatlanmaların önlenmesi için teknik, fiziksel ve fonksiyonel bileşenleri kapsayan bütüncül bir risk yönetimi yaklaşımının benimsenmesi büyük önem taşımaktadır.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının temel amacı, tenis sporcularının teknik performanslarını nesnel ve ölçülebilir bir yaklaşımla değerlendirebilen yapay zekâ destekli bir analiz sistemi geliştirmektir. Bu doğrultuda görüntü işleme tekniklerinden biri olan poz tahmini (pose estimation) yöntemi kullanılarak sporcuların vuruş ve duruş örnekleri detaylı bir şekilde incelendi. Elde edilen analiz sonuçları, Uluslararası Tenis Numarası (International Tennis Number, ITN) saha testi gibi objektif performans ölçütleri ile ilişkilendirildi ve böylece sistemin geçerliliği ve güvenilirliği kapsamlı bir biçimde değerlendirildi. Bu yaklaşım, sporcuların teknik yetkinliklerini daha doğru ve nesnel açıdan analiz etmeye olanak tanırken aynı zamanda antrenman süreçlerinin etkin bir şekilde optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen sistem kapsamında üç temel hipotez test edildi: İlk hipotez (H1), poz tahmini (pose estimation) tabanlı görüntü işleme tekniklerinin tenis sporcularının vuruş hareketlerini yüksek doğruluk ve güvenilirlikle sınıflandırabileceğini öngörmektedir. Bu hipotez, yapay zekâ destekli analiz yöntemlerinin spor performansının teknik yönlerini nesnel biçimde değerlendirmede etkinliğini test etmeyi amaçlamaktadır. İkinci hipotez (H2), görüntü işleme teknikleriyle elde edilen teknik performans verilerinin Uluslararası Tenis Numarası (ITN) saha testi sonuçlarıyla istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki içinde olduğunu varsaymaktadır. Bu hipotez, yapay zekâ tabanlı analiz sisteminin geleneksel ve kabul görmüş saha testleriyle tutarlı ve karşılaştırılabilir sonuçlar üretebildiğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Üçüncü hipotez (H3) ise geliştirilen yapay zekâ destekli analiz sisteminin, antrenörlerin geleneksel gözlem yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve tutarlı geri bildirim sunma kapasitesine sahip olduğunu öne sürmektedir. Bu hipotez, sistemin pratik uygulamalardaki etkinliğini ve antrenman süreçlerindeki potansiyel avantajlarını değerlendirmeyi hedeflemektedir. Mevcut tez çalışmasının bulguları, YOLOv8-Pose modelinin tenis oyuncularının hareketlerini analiz etme konusunda oldukça etkili bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle karmaşık hareket desenlerinin yüksek hassasiyetle tanımlanmasında modelin başarılı performansı doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, yapay zekâ destekli görüntü işleme tekniklerinin spor bilimleri alanında teknik değerlendirme ve performans analizine güçlü katkılar sağlayabileceğini göstermektedir. Özellikle YOLOv8-Pose modeliyle gerçekleştirilen analizler, tenis sporcularının forehand, backhand ve servis gibi temel vuruş türlerinin yüksek doğruluk oranlarıyla

başarıyla sınıflandırılabilirdiğini göstermektedir. Bu durum, modelin farklı vuruş tiplerini ayırt etme konusundaki hassasiyetini ve sporcuların teknik hareketlerini detaylı bir şekilde analiz edebilme kapasitesini açıkça ortaya koymaktadır. Böylece yapay zekâ tabanlı poz tahmini yöntemlerinin, tenis performansının teknik boyutlarını değerlendirmede etkili bir araç olduğu doğrulandı. Modelin mAP@50 değerinin 0.941, precision değerinin 0.867 ve recall değerinin 0.884 olarak ölçülmesi, sınıflandırma başarısının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, poz tahmini (pose estimation) tabanlı görüntü işleme tekniklerinin tenis vuruşlarını doğru ve güvenilir biçimde ayırt edebildiğine güçlü bir kanıt sunmaktadır. Dolayısıyla elde edilen bulgular, ilk hipotez (H1) ile uyumlu olup bu hipotezin desteklenmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışmanın temel varsayımlarından biri olan H1 hipotezi, pose estimation tabanlı görüntü işleme tekniklerinin tenis sporcularının vuruş hareketlerini yüksek doğrulukla sınıflandırabileceğini ileri sürmektedir. Bu hipotezin geçerliliği, geliştirilen YOLOv8-Pose tabanlı modelin sınıflandırma başarımı ve gerçek zamanlı analiz kapasitesi üzerinden değerlendirilmiş ve modelin elde ettiği yüksek doğruluk, hassasiyet ve geri çağırma oranları, hipotezi güçlü şekilde desteklemiştir. Elde edilen bulgular, özellikle karmaşık vuruş hareketlerinin güvenilir şekilde tanımlanabilmesi, modelin ortalama 17.1 FPS hızla çalışabilmesi ve forehand, backhand ve servis gibi tekniklerin ayrıştırılmasında yüksek başarı sağlamasıyla öne çıkmıştır. Bu kapsamda ulaşılan mAP@50 değeri 0.941, precision değeri 0.867 ve recall değeri 0.884 olarak ölçülmüş; bu sonuçlar, sınıflandırma doğruluğu açısından literatürdeki benzer yapay zekâ tabanlı sistemlerle karşılaştırıldığında oldukça başarılı bir performansa işaret etmiştir.

Bu bağlamda Lu ve arkadaşları tarafından geliştirilen KSL-POSE modeliyle yapılan çalışmalar, ilgili hipotezin değerlendirilmesi açısından önemli bir karşılaştırma sunmaktadır (210). Araştırmacılar, vücut bölümlerinin örtüştüğü ya da hedef noktaların küçük olduğu durumlarda klasik poz tahmini modellerinin yetersiz kaldığını ifade etmiş ve bu sorunu çözmek adına YOLO mimarisine dayalı yeni bir yapı tasarlamışlardır. Geliştirilen modelde Kolmogorov–Arnold Networks (KANs), küçük nesne güçlendirme piramidi (SOEP) ve katmanlı paylaşımlı evrimsel başlık yapıları (LSCB) gibi yenilikçi bileşenler entegre edilmiştir. Bu yapılar sayesinde model, MS COCO 2017 ve CrowdPOSE veri setlerinde klasik YOLOv8-POSE modeline göre %1.5 oranında daha yüksek tespit doğruluğuna ulaşılmıştır. Bu gelişmeler hem model parametrelerinin verimli kullanımına hem de küçük ve karmaşık pozisyonların ayırt edilmesine olanak

sağlayarak poz tahmini alanında önemli bir ilerleme ortaya koymuştur. Mevcut tez çalışmasında kullanılan YOLOv8-Pose modeli ise bu doğruluk seviyesini, spor özelinde karmaşık vuruş tekniklerini yüksek başarıyla ayrıştırarak yakalayabilmiştir. Forehand, backhand ve servis gibi farklı tekniklerin yapısal çeşitliliğine rağmen sınıflandırma performansındaki bu istikrar, H1 hipotezinin temelini oluşturan sınıflandırma gücünü doğrudan desteklemektedir.

Bharambe ve arkadaşları tarafından yürütülen bir diğer çalışmada ise YOLOv8 mimarisi profesyonel tenis maçlarında hem topun hem de oyuncuların takibi için kullanılmıştır (211). Araştırmacılar, görüntü işleme tekniklerini kullanarak topun vuruş hızı, oyuncuların kort üzerindeki hareket hızı gibi performans ölçütlerini analiz etmiş ve elde edilen verilerle her oyuncuya özgü performans profilleri oluşturmuşlardır. Bu model, yalnızca nesne tespiti değil, aynı zamanda sporcunun oyun içi davranışlarını analiz etmekte de kullanılabilir bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Bu bağlamda çalışma, YOLOv8'in spor analitiği alanındaki potansiyelini vurgulamakta; özellikle hızlı karar alınması gereken durumlarda bu tip modellerin antrenör kararlarını destekleyecek kadar hassas veri üretebildiğini ortaya koymaktadır. Bizim çalışmamızda elde edilen sınıflandırma doğruluğu ve FPS değeriyle birlikte düşünüldüğünde aynı model altyapısının tenis vuruş hareketlerinin teknik olarak sınıflandırılmasında da oldukça güvenilir çıktılar sunabildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, H1 hipotezinin yalnızca teknik doğruluk açısından değil, aynı zamanda uygulama geçerliliği ve sahaya uygulama kapasitesi açısından da desteklendiğini göstermektedir.

Spor analizlerinde hareketli ve küçük objelerin tespiti, özellikle poz tahmini ve nesne lokalizasyonu açısından ek zorluklar yaratmaktadır. Bu duruma odaklanan Glaspey, tenis topunun hızlı ve küçük yapısını esas alarak Mask R-CNN ve YOLOv8 mimarilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir (212). Çalışmada kullanılan veri seti, ATP tarafından sağlanan maç görüntülerinden ve farklı tenis topu örneklerinden oluşturulmuştur. Bulgular, YOLOv8 mimarisinin hızlı objelerin tespiti yüksek başarı gösterdiğini, hareketin hızına ve yönüne rağmen nesne lokalizasyonunu isabetli şekilde gerçekleştirebildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, gerçek zamanlı uygulamalarda sistemlerin ne derece kararlı çalışabildiğini göstermesi açısından önemlidir. Bu bağlamda tezimizde elde edilen ortalama 17.1 FPS işlem hızı ve yüksek sınıflandırma doğruluğu, sistemin yalnızca teknik analiz aracı olarak değil, aynı zamanda gerçek maç koşullarında anlık değerlendirme yapabilecek bir platforma dönüşebileceğine de işaret etmektedir. Bu yönüyle H1 hipotezinin pratik geçerliliği bir kez daha güçlenmektedir.

Öte yandan sınıflandırma doğruluğunun sadece analizde değil, eğitim süreçlerinde kullanımı da giderek önem kazanmaktadır. Bu noktada Hung tarafından gerçekleştirilen çalışma, YOLOv5 mimarisi ile çok katmanlı yapay sinir ağı (MLP) sınıflandırıcısını birleştirerek tenis oyuncularının duruş ve vuruş pozisyonlarını analiz etmeyi hedeflemiştir (213). Çeşitli hiperparametre optimizasyon algoritmalarının karşılaştırılması sonucunda, %93 doğruluk oranı elde edilmiş ve sistemin hassas tenis antrenmanları için kullanılabilirliği vurgulanmıştır. Bu bulgu, yalnızca sınıflandırma başarısını değil, aynı zamanda poz analizi sistemlerinin antrenörlere dönük teknik geri bildirim araçlarına dönüşme kapasitesini ortaya koymaktadır. Tez kapsamında geliştirilen YOLOv8-Pose sistemi de benzer biçimde yalnızca sınıflandırma aracı değil, teknik değerlendirme, asimetri tespiti ve vuruş tutarlılığı analizi gibi işlevleriyle bireyselleştirilmiş antrenman planlamalarına katkı sağlayabilecek düzeyde detaylı veri sunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında Hung'un çalışmasıyla elde edilen sonuçlar hem bulgularımızı desteklemekte hem de H1 hipotezinin eğitimsel değerini pekiştirmektedir.

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde çalışmamızda kullanılan YOLOv8-Pose tabanlı poz tahmini sisteminin, tenis sporcularının teknik hareketlerini yüksek doğrulukla sınıflandırma konusunda gerek akademik gerekse pratik düzeyde güçlü bir çözüm sunduğu açıkça görülmektedir. Forehand gibi varyasyonu yüksek tekniklerde dahi tutarlı sınıflandırma sağlayabilmesi, sistemin yalnızca tanıma değil, aynı zamanda detaylı teknik analiz ve gelişim takibi için de uygun olduğunu göstermektedir. Literatürdeki benzer modellerle uyumlu şekilde yüksek doğruluk ve gerçek zamanlılık dengesini sağlayabilmiş olması, yapay zekâ temelli modellerin tenis sporuna uyarlanması önemli bir eşiğin aşıldığını göstermektedir. Bu yönüyle H1 hipotezinin yalnızca doğruluk ve hassasiyet gibi teknik metriklerle değil, aynı zamanda spor bilimlerinde veri tabanlı geri bildirimin gelişimi açısından da desteklendiği söylenebilir. Geliştirilen sistemin sporcu performansının nesnel, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmesine olanak tanınması, tenis branşında bireyselleştirilmiş ve teknoloji destekli antrenman yaklaşımlarının güçlenmesine katkı sunmaktadır. Bu yönüyle tez çalışması hem bilimsel literatüre hem de saha uygulamalarına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada test edilen ikinci hipotez (H2), görüntü işlemeyle elde edilen teknik performans verilerinin, tenis performansının nesnel göstergeleri olan ITN saha testi sonuçlarıyla anlamlı bir ilişki içinde olduğunu öngörmektedir. Bu doğrultuda geliştirilen yapay zekâ tabanlı sistemle analiz edilen poz verileri ve biyomekanik göstergeler,

sporcuların teknik yeterlilik düzeyleriyle ilişkilendirilerek yorumlanmıştır. Elde edilen bulgular; özellikle vuruş simetrisi, eklem açıları, esneklik seviyeleri ve vuruş tutarlılığı gibi teknik göstergelerin, oyun düzeyiyle belirgin ilişkiler içinde olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle üst ekstremité asimetrisi ve alt ekstremité hareket açıklıklarındaki yetersizliklerin ITN puanının yüksek sporcularda daha az görüldüğü, buna karşılık düşük performans grubunda daha sık gözlemlendiği dikkat çekmiştir. Bu ilişki, teknik sınıflandırmaların yalnızca poz tanımda değil, saha performansının belirleyicilerinde de öngörebilecek düzeyde olduğunu göstermektedir.

Teknik hareketlerin biyomekanik temelli çözümlemesi, tenis performansının altında yatan temel yapıların anlaşılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda Brocherie tarafından yürütülen çalışmada Xsens MVN hareket yakalama sistemi kullanılarak tenis servisleri sırasında üst ve alt ekstremité eklem açıları, gövde hareketleri ve enerji transferi analiz edilmiştir (214). Araştırmada hem erkek hem kadın elit sporcular benzer segmental enerji dağılımları göstermiş, bu da teknik yetkinliğin biyomekanik denge ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmamızda dominant kolda belirgin bir açı genişliği tespit edilmiş, buna karşılık non-dominant kolda sınırlı hareket açıklığı ve dengesizlik görülmüştür. Ayrıca %0.0 olarak hesaplanan 90. persentil alt ekstremité açıklığı, oyuncuların büyük çoğunluğunun maksimum eklem açıklığına ulaşamadığını ve bu durumun biyomekanik sınırlılık oluşturduğunu göstermektedir. Bu bulgular, sahadaki teknik yeterliliğin yalnızca motor beceri değil, aynı zamanda esneklik, denge ve simetri gibi biyomekanik faktörlerle de şekillendiğini göstermekte; dolayısıyla H2 hipotezinin dayandığı ilişkiyi desteklemektedir.

Benzer biçimde Peng ve arkadaşları çalışmalarında IoT tabanlı görüntü alma sistemleri ve GAN-optimize edilmiş video analiziyle elde ettikleri biyomekanik verileri, farklı forehand vuruş tipleri arasında karşılaştırmışlardır (215). Araştırmada sağ ayak bileği, diz ve kalça hızlarının vuruş tipine göre değiştiği, özellikle ön yükleme ve vuruş bitiş fazlarında gövde rotasyonu ve hızlarında anlamlı farklar olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, teknik varyasyonun vücut segmentlerinin koordinasyonu ve esnekliği ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Mevcut çalışmamızda da dominant taraf ile non-dominant taraf arasında belirgin eklem açısı farkı saptanmış; bu da özellikle forehand vuruşlarında daha sık görülen aşırı yüklenmenin, esneklik eksikliği ve dengesizlikle birlikte teknik performansı etkilediğini göstermiştir. ITN skoru yüksek olan sporcularda bu asimetrisinin daha az belirgin olması, teknik seviyenin vücut kontrolüyle birlikte geliştiğini desteklemektedir.

Poz sınıflandırma sistemlerinin biyomekanik etkileriyle uyumu, özellikle markerless sistemler üzerinde yapılan çalışmalarda da tartışılmıştır. Abrams tarafından yürütülen çalışmada üç farklı servis tipi (flat, kick, slice) markerless hareket yakalama sistemiyle analiz edilmiş ve kick servisin sırt ve omuz bölgesinde daha yüksek fiziksel yüklenme oluşturduğu gösterilmiştir (216). Çalışmada slice servisin ise daha düşük kinetik zorlama içerdiği belirtilmiştir. Bu varyasyonlar, vuruş tipinin teknik yüklenmeyi ve dolayısıyla hareket kontrolünü etkilediğini göstermektedir. Mevcut tez bulgularında forehand vuruşlarının tutarlılık oranı %74,1 ile en düşük düzeyde kalırken backhand (%78.0) ve servis (%90.8) vuruşları daha stabil performans göstermiştir. Bu farklılık, Abrams'ın bulgularıyla paralel olarak teknik kararlılığın biyomekanik yüklenme ve segmental koordinasyonla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Böylece görüntü işlemeyle elde edilen tutarlılık verileri, yalnızca sınıflandırma değil, biyomekanik performansın sahadaki karşılığı olarak da değerlendirilebilmektedir.

Bu bağlamda, görüntü tabanlı sınıflandırma sistemlerinin eğitsel geri bildirim açısından da potansiyel taşıdığı gösterilmiştir. Wood ve arkadaşları ResNet-50 ve LSTM tabanlı bir sistemle diz fleksiyonu ve genel servis skoru gibi mekanik göstergeleri uzman değerlendirmeleriyle karşılaştırmış; dize ilişkin RMSE değerinin 0.71 ile oldukça düşük olduğunu, bunun da modelin diz fleksiyonu gibi kritik biyomekanik parametreleri yüksek doğrulukla değerlendirebildiğini göstermiştir (217). Bizim çalışmamızda da bacak hareket açıklığına dair veriler, teknik vuruş türleriyle karşılaştırıldığında kritik farklar ortaya çıkmıştır. Özellikle sağ ve sol bacak arasındaki 90. persentil değeri %0.0 ile sınırlı kalmış ve bu durum, düşük performans grubunda daha yaygın gözlenmiştir. Wood'un vurguladığı gibi teknik değerlendirme araçlarının biyomekanik eksiklikleri nesnel olarak ortaya koyabilmesi, geleneksel gözleme dayalı antrenman yaklaşımlarına kıyasla büyük bir avantaj sunmaktadır.

Özellikle doğru-yanlış sınıflandırmasına dayalı modellerin teknik performans ve yaralanma riski değerlendirmesinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ramadan ve arkadaşları, YouTube videolarından oluşturdukları veri setiyle forehand, backhand ve servis vuruşlarını %96.5 doğrulukla “doğru” ya da “yanlış” olarak sınıflandırabilmişlerdir (218). Bu sistem, oyuncu performansının biyomekanik temelli nesnel değerlendirilmesinin teknik doğruluk ve hata analizi açısından kullanılabilirliğini göstermektedir. Mevcut çalışmamızda dominant kol kullanımında belirgin bir açı genişliği, non-dominant kolda ise teknik sınırlılık gözlenmiştir. ITN değeri daha yüksek olan oyuncuların daha dengeli simetri sergilemesi, Ramadan'ın sınıflandırma

sonuçlarıyla örtüşmektedir. Böylece doğru vuruş biçiminin yalnızca teknik beceri değil, biyomekanik dengeyle de ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

Bulgularımızı bütüncül biçimde ele alırken Lambrich ve arkadaşlarının sistematik derlemesinin sunduğu kapsamlı değerlendirmeler de dikkate değerdir. Araştırmacılar, tenis servis ve groundstroke tekniklerine dair literatürdeki biyomekanik analizlerin oldukça heterojen olduğunu, yaş, cinsiyet ve seviye gibi değişkenlerin bu farklılıkları etkilediğini belirtmişlerdir (209). Bu durum, bizim çalışmamızda da gözlenen bireysel farklılıkların neden teknik performans ve ITN skoru arasında belirgin ilişkilere yol açtığını açıklamaktadır. Özellikle düşük performans grubunda gözlenen bacak esnekliği yetersizliği, ileri seviye sporcularda çok daha dengeli bir dağılım göstermiştir. Bu sonuç, performans seviyesinin yalnızca vuruş başarısıyla değil, aynı zamanda esneklik ve biyomekanik kontrol ile şekillendiğini göstermekte; dolayısıyla H2 hipotezinin hem teknik hem de yapısal düzeyde geçerliliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak çalışmamızda elde edilen bulgular, yapay zekâ destekli poz tahmini sisteminin yalnızca teknik hareketleri tanımlamakla kalmayıp, aynı zamanda oyuncunun biyomekanik durumu, esnekliği, hareket açıklığı ve simetri gibi performans belirleyicileri hakkında da bilgi üretebildiğini göstermektedir. Bu yönüyle görüntü işlemeyle elde edilen teknik veriler ve ITN saha testi gibi geleneksel performans ölçütleri arasında anlamlı bir bağ kurmak mümkün hale gelmiş, H2 hipotezi güçlü şekilde desteklenmiştir. Bu bağlamda geliştirilen sistem hem antrenörler hem de sporcular için kişiselleştirilmiş geri bildirim sunabilecek nitelikte bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu teknoloji destekli yaklaşım, antrenman süreçlerinin daha verimli, güvenli ve bireysel farklılıklara duyarlı biçimde yapılandırılmasına önemli katkılar sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında test edilen üçüncü hipotez (H3), yapay zekâ destekli analiz sisteminin, antrenörlerin geleneksel gözlem yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve tutarlı geri bildirim sağlama kapasitesine sahip olduğunu öne sürmektedir. Geliştirilen sistemin bu yönü, özellikle antrenman verimliliği ve oyuncu gelişiminin zamanında ve nesnel takibi açısından oldukça önemlidir. Literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda da benzer sistemlerin eğitim süreçlerinde nasıl kullanıldığı ve bu sistemlerin geleneksel yöntemlere kıyasla sağladığı avantajlar farklı boyutlarıyla değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda ilk olarak Meer ve arkadaşları, taktiksel motor becerilerin öğreniminde öz denetimli video geri bildiriminin etkisini incelemişlerdir (219). Katılımcılara antrenör tarafından taktiksel oyun becerilerine odaklanan bireysel video geri bildirimleri sunulmuş ve bu süreçte öz yeterlik ile öz düzenleme becerileri de

değerlendirilmiştir. Bulgular, öz denetimli geri bildirim grubunun hem kısa vadeli hem de bir hafta sonraki ölçümlerde daha büyük performans artışları gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, bireyin ihtiyacına uygun, zamanında sunulan görsel geri bildirimin öğrenme sürecini olumlu etkilediğini ve sistematik analizlerin antrenör gözlemine göre daha tutarlı çıktılar sağlayabildiğini göstermektedir.

Benzer bir yaklaşımla Yu ve arkadaşları, hareket izleme sensörleri ve video-temelli yansıtıcı öğrenme yöntemlerini bir araya getirerek tenis becerilerinin öğretiminde yeni bir yaklaşım sunmuşlardır (220). Katılımcılar, kendi vuruş videolarını öğretmen videolarıyla karşılaştırarak öz değerlendirme yapabilmiş; böylece geleneksel öğretim yöntemine kıyasla daha etkili öğrenme gerçekleşmiştir. Bu çalışmanın bulguları, sistemimizin temel özelliklerinden biri olan oyuncuya anlık ve nesnel geri bildirim sağlama amacını desteklemekte; özellikle öğretici video karşılaştırmalarının, antrenör gözleminden bağımsız olarak teknik hataların saptanmasına yardımcı olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçları destekleyen bir diğer çalışma ise Xie tarafından gerçekleştirilmiştir. Bilgi temelli tenis eğitim sistemi önerisiyle geliştirilen bu modelde OpenPose algoritması ile iskelet hareketleri analiz edilmiş, bireysel performans puanları çıkarılarak özel eğitim planları oluşturulmuştur (221). 15 haftalık uygulama sonunda sistemin öğrenci performans puanlarını anlamlı ölçüde artırdığı görülmüştür. Bu, yapay zekâ destekli sistemlerin bireyselleştirilmiş geri bildirim açısından taşıdığı potansiyeli gözler önüne sermektedir.

Video geri bildiriminin etkisine odaklanan daha erken dönemli bir çalışma da Razali tarafından gerçekleştirilmiştir (222). Orta düzey genç tenis oyuncularıyla yapılan bu çalışmada video geri bildiriminin uygulandığı günün ertesinde hem vuruş doğruluğunda hem de toplam “kabul edilebilir” vuruş sayısında anlamlı artışlar gözlenmiştir. Bu sonuç, görsel geri bildirimin doğrudan teknik performans üzerinde etkili olabileceğini, özellikle de geleneksel gözleme göre daha kalıcı kazanımlar sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu noktada teknolojik altyapısı daha gelişmiş sistemlerin kullanımı da dikkat çekmektedir. Liying bilgisayar destekli video analiz ve geribildirim sisteminin servis tekniklerinin kaydedilmesi, analiz edilmesi ve vuruş noktalarının optimum şekilde belirlenmesi açısından işlevsel olduğunu ortaya koymuştur (223). Sistem, renk işaretleme ile oyuncunun kol hareketlerini takip etmiş ve bu sayede en uygun vuruş noktalarının belirlenmesini sağlamıştır. Bu tür sistemlerin oyuncuya zamanında ve kişiselleştirilmiş

öneriler sunması, antrenör değerlendirmesine kıyasla daha yüksek tutarlılık ve tekrarlanabilirlik sağlamaktadır.

Ayrıca farklı açılardan veri toplayan sistemlerin antrenörlere sunduğu avantajları da görmek mümkündür. Philip, düşük maliyetli IP kamera ağı kullanarak geliştirdiği sistemle hem oyuncu hem top takibi yapmış ve görsel verileri antrenöre yorumlama, sesli not ekleme, istatistik üretme gibi araçlarla desteklemiştir (224). Bu çalışma, geleneksel yöntemlerin ötesine geçilerek çok yönlü ve tekrar izlenebilir geri bildirimlerin oluşturulabileceğini göstermiştir. Bu kapsamda geliştirilen analiz platformları, sistemimizin sunduğu anlık analiz ve teknik sınıflandırma avantajlarıyla örtüşmektedir.

Son olarak Liu ve Sun, amatör ve profesyonel oyuncuların servis hareketlerini senkronize biçimde analiz eden yapay zekâ destekli bir web platformu geliştirmişlerdir (225). Bu platform, oyuncuların profesyonel oyuncularla teknik farklılıklarını incelemelerine imkân tanımış; böylece geleneksel gözlem yerine veriye dayalı teknik düzeltme olanağı sunmuştur. Bu sistem, özellikle hız, açı ve vuruş senkronizasyonu gibi detaylı parametreleri dikkate alarak oyuncuya objektif geribildirim sağlamak ve yapay zekâ destekli sistemlerin pratik uygulamadaki potansiyelini vurgulamaktadır.

Tüm bu çalışmalar ışığında mevcut tezde kullanılan YOLOv8-Pose tabanlı analiz sisteminin antrenman sürecine yönelik katkıları açıkça görülmektedir. Sistem hem hareket sınıflandırma başarısıyla (mAP@50: 0.941; precision: 0.867; recall: 0.884) hem de hızlı işlem süresi ve kullanıcıya sunulan geribildirim kalitesiyle geleneksel gözlem yöntemlerine kıyasla daha etkili sonuçlar sağlamaktadır. Ayrıca sistem, yalnızca doğru-yanlış sınıflandırma değil, oyuncunun teknik seviyesini ayrıntılı analiz etme imkânı sunarak antrenman süreçlerinin bireyselleştirilmesine de olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda elde edilen bulgular, H3 hipotezini güçlü biçimde desteklemekte ve antrenman planlamasında yapay zekâ destekli sistemlerin önümüzdeki yıllarda daha yaygın kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Bu tez çalışması, tenis sporcularının teknik hareket örüntülerinin yapay zekâ destekli bir sistem aracılığıyla nesnel, ölçülebilir ve çok boyutlu bir biçimde değerlendirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada kullanılan YOLOv8-Pose tabanlı poz tahmini modeli, sporcu hareketlerinin yüksek doğrulukla sınıflandırılmasını sağlamış; aynı zamanda bu sınıflandırmaların biyomekanik parametrelerle ve saha performans ölçütleriyle olan ilişkisini de kapsamlı biçimde ortaya koymuştur. Modelin yüksek sınıflandırma başarısı (mAP@50: 0.941; precision: 0.867; recall: 0.884), yalnızca teknik becerilerin ayırt edilmesinde değil, sporcu profillerinin detaylı biçimde analiz

edilmesinde de etkin bir araç olduğunu göstermiştir. Sistem tarafından tespit edilen vuruş türleri, tutarlılık oranları ve eklem hareket açıklığı gibi teknik veriler, sporcuların esneklik, simetri ve biyomekanik bütünlük düzeyleriyle anlamlı bir ilişki göstermektedir. Bu bulgular, saha içi performansı belirleyen unsurların yalnızca teknik yeterlilikle sınırlı olmadığını, aynı zamanda vücut yapısı, mobilité ve denge gibi faktörlerle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle esneklik eksikliği, ekstremité asimetrisi ve hareket açıklığı sınırlılıkları gibi bulgular, düşük performans gruplarında daha yaygın olarak görülmüş ve bunların oyun kalitesine olan etkisi net biçimde gözlemlenmiştir.

Çalışmanın en önemli katkılarından biri de geliştirilen sistemin antrenman süreçlerine uygulanma potansiyelini ortaya koymasıdır. Elde edilen veriler yalnızca retrospektif analizlerde değil, aynı zamanda anlık geri bildirim mekanizmaları aracılığıyla sporcuların teknik gelişimini yönlendirme noktasında da işlevseldir. Literatürde yer alan güncel araştırmalar da benzer şekilde görüntü işleme temelli sistemlerin bireyselleştirilmiş antrenman planları, yaralanma risk analizi ve teknik hataların tespiti gibi alanlarda önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Sistematik video geri bildirimlerinin, geleneksel gözleme dayalı yöntemlerden daha yüksek öğrenme kalıcılığı sağladığı da bu çerçevede dikkate değerdir.

Genel olarak değerlendirildiğinde bu çalışmada geliştirilen analiz altyapısı, yalnızca teknik sınıflandırma doğruluğuna değil, aynı zamanda sporcuya özgü detaylı biyomekanik profil çıkartma kapasitesine de sahiptir. Böylece sistem, tenis sporunda teknik gelişimin nesnel ve veri temelli biçimde izlenmesine olanak tanımakta; bireysel farklılıkları gözetken, tekrarlanabilir ve eğitim sürecine entegre edilebilir bir performans değerlendirme aracı olarak konumlanmaktadır. Bu yönüyle çalışma, spor teknolojileri, hareket analizi ve antrenman bilimlerinin kesişiminde yer alarak hem literatüre hem de saha uygulamalarına anlamlı bir katkı sunmaktadır.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle analiz edilen sporcu örnekleme, belirli bir performans düzeyine sahip sınırlı sayıda katılımcıdan oluştuğundan elde edilen bulguların genellenebilirliği daha geniş ve farklı seviyelerdeki popülasyonlar için dikkatle değerlendirilmelidir. Ayrıca sistemin değerlendirme süreci yalnızca belirli vuruş türlerine (forehand, backhand, servis) odaklanmıştır. Dolayısıyla farklı teknik varyasyonların (örneğin slice, topspin, drop shot gibi) sınıflandırma başarımı, bu çalışma kapsamında test edilmemiştir. Kullanılan poz tahmini modeli, markerless (işaretsiz) bir sistem olsa da aydınlatma koşulları, kamera açısı ve çözünürlük gibi çevresel faktörlerin analiz doğruluğu üzerindeki potansiyel

etkileri göz ardı edilemez. Son olarak sistemin çıktılarının doğrudan performans gelişimine etkisi uzun vadeli antrenman süreçleriyle test edilmemiştir. Bu nedenle gelecekte yapılacak araştırmalarda uzun süreli uygulamalara, farklı yaş ve seviye gruplarına ve çeşitli teknik kategorilere odaklanılması önerilmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, YOLOv8-Pose modelinin tenis sporcularının hareket dinamiklerini analiz etmede hem teknik doğruluk hem de uygulama pratikliği açısından güçlü bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Model, karmaşık vuruş desenlerini yüksek hassasiyetle tanımlayabilmiş; özellikle mAP, precision ve recall değerleri bakımından başarılı bir performans sergilemiştir. Ortalama 17.1 FPS işlem hızıyla gerçek zamana yakın analizler yapılabilirken 40.7G FLOPs düzeyindeki hesaplama yükü, modelin daha düşük donanımlı cihazlarda kullanımını sınırlayabilecek bir faktör olarak öne çıkmıştır.

Biyomekanik analizler, dominant kolun aşırı kullanımına bağlı asimetriklerin yanı sıra alt ekstremitte hareket açıklığında yaygın sınırlılıkların bulunduğunu göstermiştir. Forehand vuruşlarının yüksek kullanım oranına rağmen düşük tutarlılık sergilemesi, teknik varyasyonlara açık olduğunu ve bu nedenle hedeflenmiş teknik iyileştirme stratejileri gerektirdiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık servis vuruşlarının yüksek tekrarlanabilirliği, bu hareketin hem biyomekanik hem de stratejik açıdan daha standartlaştığını göstermektedir. Bu bulgular, tenis antrenmanlarında kas dayanıklılığı, dinamik esneklik ve video destekli teknik analizlerin bir arada ele alınmasının önemini vurgulamaktadır.

6.1. Uygulayıcılar için Öneriler

Antrenman programlarında dinamik esneklik egzersizlerine mutlaka yer verilmelidir. Özellikle alt ekstremitte esnekliğini artırmaya yönelik hareketler, patlayıcı adım alma ve yön değiştirme gibi eylemleri destekleyecektir. Forehand vuruşlarının kontrolünü artırmak için video analizleriyle desteklenen teknik geri bildirim mekanizmaları kullanılmalı, varyasyonları azaltmak için stabilize edici egzersizler uygulanmalıdır. Servis ve split-step gibi yüksek yükleme içeren hareketlerde eksantrik kuvvet geliştiren antrenmanlar ve işlevsel denge egzersizleriyle kas dayanıklılığı artırılmalıdır. Gerçek zamanlı geri bildirim sağlayan dijital araçlar (örneğin, sanal koçluk sistemleri) daha fazla antrenman rutinine entegre edilmelidir.

6.2. Gelecek Araştırmalar için Öneriler

Model Optimizasyonu: YOLOv8-Pose'un daha hafif sürümleri (örneğin, model sıkıştırma, kuantizasyon) geliştirilerek düşük donanım gerektiren cihazlarda kullanım

potansiyeli artırılmalıdır. Bu sayede okul ve kulüp düzeyindeki uygulamalarda erişim kolaylaşacaktır.

Çapraz Spor Uygulamaları: Teniste başarıyla uygulanan poz tahmini yöntemlerinin diğer bireysel sporlarda (örneğin, masa tenisi, badminton, squash) nasıl performans gösterdiği araştırılmalıdır.

Uzunlamasına Gözlem Çalışmaları: Aynı sporcular üzerinde yapılan uzun dönemli poz tahmini analizleriyle teknik gelişim, sakatlık risk profili ve antrenman uyumu değerlendirilebilir.

Psikobiyomekanik Entegrasyon: Oyuncuların pozisyon tutarlılığı ile bilişsel yük, karar verme süresi veya stres seviyesi gibi psikolojik parametreler arasında ilişkiler kurulabilir. Bu sayede zihinsel faktörlerin vuruş kalitesine etkisi daha bütüncül biçimde incelenebilir.

Top-Hareket Entegrasyonu: Poz tahmini modellerine top hareketi, hız ve spin verisi gibi unsurlar entegre edilerek oyuncu eylemlerinin bağlamsal olarak daha doğru analiz edilmesi sağlanabilir.

Veri Paylaşımı ve Etiketleme Sistematiği: Tenise özel, açık kaynaklı ve iyi etiketlenmiş veri setlerinin oluşturulması, model geliştirme çalışmalarının hızlanmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Jianjun Q, Isleem HF, Almoghayer WJ, Khishe M. Predictive athlete performance modeling with machine learning and biometric data integration. *Sci Rep.* 2025;15(1):1-22.
2. Wang F, Jiang S, Li J. The ai-driven transformation in new materials manufacturing and the development of intelligent sports. *Appl Sci.* 2025;15(10):5667:1-34.
3. Mateus N, Abade E, Coutinho D, Gómez M-Á, Peñas CL, Sampaio J. Empowering the Sports Scientist with artificial intelligence in training, performance, and health management. *Sensors.* 2024;25(1):139:1-12.
4. Yun H-J, Jang N, Jeon M. Deep learning-based tennis match type clustering. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* 2025;17(1):1-9.
5. Liu S, Wu C, Xiao S, Liu Y, Song Y. Optimizing young tennis players' development: Exploring the impact of emerging technologies on training effectiveness and technical skills acquisition. *Plos one.* 2024;19(8):e0307882:1-25.
6. Wu S, Diao M, Wang J, Song Z, Zhang C. A study on the optimisation of tennis players' match strategies from the perspective of momentum. *Appl Sci.* 2025;15(10):5624:1-16.
7. Spring KE, Holmes ME, Smith JW. Long-term tennis participation and health outcomes: an investigation of "lifetime" activities. *Int J Exerc Sci.* 2020;13(7):1251-61.
8. Cui Y. Exploring match performance of elite tennis players: the multifactorial game-related effects in Grand Slams [Doktora tezi]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2018.
9. Torres-Luque G, Fernández-García ÁI, Cabello-Manrique D, Giménez-Egido JM, Ortega-Toro E. Design and validation of an observational instrument for the technical-tactical actions in singles tennis. *Front Psychol.* 2018;9:2418:1-10.
10. Tsetseli M, Zetou E, Vernadakis N, Michalopoulou M. The effect of internal and external focus of attention on game performance in tennis. *Acta Gymn.* 2016;46(4):162-73.
11. Ruth G. Tennis: A history from American amateurs to global professionals, 1th ed. Urbana: University of Illinois Press; 2021:1-6.

12. ITF. ITF Global Tennis Report: Participation hits 106 million in five years. <https://www.itftennis.com/en/news-and-media/articles/itf-global-tennis-report-participation-hits-106-million-in-five-years/>. Son Erişim Tarihi: 06 Ağustos 2025.
13. Kovacs MS. Movement for tennis: The importance of lateral training. *Strength Cond J*. 2009;31(4):77-85.
14. Robinson LE, Stodden DF, Barnett LM, Lopes VP, Logan SW, Rodrigues LP, et al. Motor competence and its effect on positive developmental trajectories of health. *Sports med*. 2015;45:1273-84.
15. Gallahue DL, Ozmun, JC. Motor development in young children. In: Spodek B, Saracho ON (eds). *Handbook of research on the education of young children* 2th ed. New York, Routledge, 2014:123-138.
16. Lopes L, Santos R, Pereira B, Lopes VP. Associations between gross motor coordination and academic achievement in elementary school children. *Hum Mov Sci*. 2013;32(1):9-20.
17. Ochi S, Kovacs MS. Periodization and recovery in the young tennis athlete. In: Colvin AC, Gladstone JN (eds). *The Young Tennis Player: Injury Prevention and Treatment*, 1th ed. Switzerland, Springer Cham, 2016:87-104.
18. Juzwiak CR, Amancio OM, Vitalle MS, Pinheiro MM, Szejnfeld VL. Body composition and nutritional profile of male adolescent tennis players. *J Sports Sci*. 2008;26(11):1209-17.
19. Crespo M, Miley D. *ITF Advanced Coaches Manual*, 1th ed. London, ITF, 2007: 699256267
20. Sabato TM, Walch TJ, Caine DJ. The elite young athlete: strategies to ensure physical and emotional health. *Open Access J Sports Med*. 2016;7:99-113.
21. Perri T, Duffield R, Murphy A, Mabon T, McGillivray I, Reid M, et al. Macro periodisation of competition in international women's tennis: Insights for long-term athlete development. *Int J Sports Sci Coach*. 2024;19(2):788-96.
22. Bane MK, Reid M, Morgan S. Has player development in men's tennis really changed? An historical rankings perspective. *J Sports Sci*. 2014;32(15):1477-84.
23. Shrom SJ, Cumming J, Fenton S-J. Lifestyle challenges and mental health of professional tennis players: an exploratory case study. *Int J Sport Exerc Psychol*. 2023;21(6):1070-90.
24. Ganser A, Hollaus B, Stabinger S. Classification of tennis shots with a neural network approach. *Sensors*. 2021;21(17):5703:1-20.

25. Reid M, Morgan S, Whiteside D. Matchplay characteristics of grand slam tennis: implications for training and conditioning. *J Sports Sci.* 2016;34(19):1791-8.
26. Elijah O, Rahman TA, Orikumhi I, Leow CY, Hindia MN. An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet Things J.* 2018;5(5):3758-73.
27. Kovacs M, Ellenbecker T. An 8-stage model for evaluating the tennis serve: implications for performance enhancement and injury prevention. *Sports health.* 2011;3(6):504-13.
28. Colomar J, Corbi F, Brich Q, Baiget E. Determinant physical factors of tennis serve velocity: A brief review. *Int J Sports Physiol Perform.* 2022;17(8):1159-69.
29. Mourtzios C, Athanailidis I, Arvanitidou V, Kellis E. Ankle and knee joint kinematics differ between flat, slice and topspin serves in young tennis players. *Eur J Sport Sci.* 2022;1(2):16-22.
30. Abrams GD, Sheets AL, Andriacchi TP. Review of tennis serve motion analysis and the biomechanics of three serve types with implications for injury. In: Hubbard M, Stronge WJ, editors. *The Biomechanics of Batting, Swinging, and Hitting*, 1st ed. London, Routledge, 2014: 144-156.
31. Eygendaal D, Rahussen FTG, Diercks R. Biomechanics of the elbow joint in tennis players and relation to pathology. *Br J Sports Med.* 2007;41(11):820-3.
32. Elliott B, Fleisig G, Nicholls R, Escamilla R. Technique effects on upper limb loading in the tennis serve. *J Sci Med Sport.* 2003;6(1):76-87.
33. Pedro B, João F, Lara JP, Cabral S, Carvalho J, Veloso AP. Evaluation of upper limb joint contribution to racket head speed in elite tennis players using imu sensors: Comparison between the cross-court and inside-out attacking forehand drive. *Sensors.* 2022;22(3):1283:1-12.
34. Rigozzi C, Cox J, Vio GA, Martens WL, Poronnik P. The effect of spin level and ball exit speed on forearm muscle activity in the tennis forehand stroke. *Int J Sports Sci Coach.* 2022;17(1):123-33.
35. Genevois C, Reid M, Creveaux T, Rogowski I. Kinematic differences in upper limb joints between flat and topspin forehand drives in competitive male tennis players. *Sports Biomech.* 2020; 19(2):212-26
36. Caprioli L, Romagnoli C, Campoli F, Edriss S, Padua E, Bonaiuto V, et al. Reliability of an inertial measurement system applied to the technical assessment of forehand and serve in amateur tennis players. *Bioengineering.* 2025;12(1):1-31.

37. Roetert EP, Kovacs M, Knudson D, Groppel JL. Biomechanics of the tennis groundstrokes: Implications for strength training. *Strength Cond J.* 2009;31(4):41-9.
38. Elliott B. Biomechanics and tennis. *Br J Sports Med.* 2006;40(5):392-6.
39. Landlinger J, Lindinger S, Stöggl T, Wagner H, Müller E. Key factors and timing patterns in the tennis forehand of different skill levels. *J Sports Sci Med.* 2010;9(4):643-51.
40. Rogowski I, Rouffet D, Lambalot F, Brosseau O, Hautier C. Trunk and upper limb muscle activation during flat and topspin forehand drives in young tennis players. *J Appl Biomech.* 2011;27(1):15-21.
41. Caprioli L, Romagnoli C, Campoli F, Edriss S, Padua E, Bonaiuto V, et al. Reliability of an inertial measurement system applied to the technical assessment of forehand and serve in amateur tennis players. *Bioengineering (Basel).* 2025;12(1):1-31.
42. Dai B, Chen M, Yu P, Wang X, Zhou C, Lin Z, editors. Efficient long document ranking via adaptive token pruning with query-document alignment. *ICASSP 2025-2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP); 06-11 April 2025, Hyderabad, India: IEEE;2025.p.1-5.*
43. Daulay DAA, Sulaiman I, Nurdin F. Game-based backhand tennis technique learning model to improve learning outcomes. *gladi: Jurnal Ilmu Keolahragaan.* 2021;12(04):269-80.
44. Ulbricht A, Fernandez-Fernandez J, Mendez-Villanueva A, Ferrauti A. Impact of fitness characteristics on tennis performance in elite junior tennis players. *J Strength Cond Res.* 2016;30(4):989-98.
45. Kovacs MS. Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports med.* 2007;37:189-98.
46. Brody H. Tennis science for tennis players, 1th ed. Pennsylvania, University of Pennsylvania Press, 1987:5-20.
47. Kolman NS, Huijgen BC, Visscher C, Elferink-Gemser MT. Technical skills in complex tennis situations: Dutch talented players U15 compared to players U17. *Front. in Sports and Act. Living.* 2023;5:1107740:1-8.
48. Kolman NS, Kramer T, Elferink-Gemser MT, Huijgen BC, Visscher C. Technical and tactical skills related to performance levels in tennis: A systematic review. *J J Sports Sci.* 2019;37(1):108-21.

49. Wibowo RAT. Perbedaan Pengaruh Model Pembelajaran Berganti dan Pengulangan terhadap Kemampuan Pukulan Grounstroke Backhand Tennis Lapangan Ditinjau dari Koordinasi Mata-Tangan. *Jurnal Ilmiah Penjas (Penelitian, Pendidikan dan Pengajaran)*. 2017;3(2):11-26.
50. Beach PS, Perreault M, Brian A, Collier DH. *Motor learning and development*, 3th ed. Champaign IL, Human Kinetics, 2023: 3-21.
51. Saczuk J, Wasiluk A, Chaliburda I. Physical fitness and motor skills of five-year-olds with different weight-height proportions. *Pol. J. Sport Tourism*. 2024;31(1):38-42.
52. Asar S, Ezabadi RR, Baghini AS, Maleksabet N. The relationship between reaction time, eye-hand coordination with visual field in elite tennis tennis players. *Asian J Sports Med*. 2022;13(2):e115787:1-6.
53. Tsetseli M, Malliou V, Zetou E, Michalopoulou M, Kambas A. The effect of coordination training program on the development of tennis service technique. *Biology of Exercise*. 2010;6(1):29-36.
54. Dobos K, Novak D, Barbaros P. Neuromuscular fitness is associated with success in sport for elite female, but not male tennis players. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(12):651:1-10.
55. Torres-Luque G, Cabello-Manrique D, Hernández-García R, Garatachea N. An analysis of competition in young tennis players. *Eur J Sport Sci*. 2011;11(1):39-43.
56. Hibbs AE, Thompson KG, French D, Wrigley A, Spears I. Optimizing performance by improving core stability and core strength. *Sports med*. 2008;38:995-1008.
57. Nugroho D, Hidayatullah MF, Doewes M, Purnama SK. The effects of massed and distributed drills, muscle strength, and intelligence quotients towards tennis groundstroke skills of sport students. *Pedagogy Phys. Cult. Sports*. 2023;27(1):2023:14-23.
58. Milosevic M, Blagojevic M, Pilipovic S, Tosic B. The muscle contraction and the force production. 18 International Symposium on Biomechanics in Sports; 25-30 June 2000, Hong Kong, China: International Society of Biomechanics in Sports; 2000.p.1-4.
59. Koya N, Kitamura T, Takahashi H. Prediction of service performance based on physical strength in elite junior tennis players. *Front Psychol*. 2022;13:898224:1-10.

60. Ingraham SJ. The role of flexibility in injury prevention and athletic performance: have we stretched the truth? *Minnesota medicine*. 2003;86(5):58-61.
61. Afifi MTT. Effect of developing core strength and dynamic flexibility on accuracy and velocity of performance of some essential skills in tennis. *EIJSSA*. 2019;10(010):21-45.
62. Deng N, Soh KG, Xu F, Yang X. The effects of strength and conditioning interventions on serve speed in tennis players: a systematic review and meta-analysis. *Front Psychol*. 2025;15:1469965:1-14.
63. Munivrana G, Filipčić A, Filipčić T. Relationship of speed, agility, neuromuscular power, and selected anthropometrical variables and performance results of male and female junior tennis players. *Collegium antropologicum*. 2015;39 (1):109-16.
64. Alnedral A, Jatra R, Firdaus K, Neldi H, Bakhtiar S, Damrah D, et al. The effect of a holistic approach training model on increasing the speed and agility of tennis athletes. *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*. 2024(61):1138-45.
65. Dündar U. *Antrenman Teorisi*, 10. Baskı. İstanbul, Nobel Kitapevi, 2017:130
66. Grosser M, Starischka S, Zimmermann E, Zintl F. *Konditionstraining*, 12th ed. München: BLV Buchverlag. 2015:235-43.
67. Turner A. Defining, developing and measuring agility. *Prof Strength Cond*. 2011;22:26-8.
68. Fernandez-Fernandez J, De Villarreal ES, Sanz-Rivas D, Moya M. The effects of 8-week plyometric training on physical performance in young tennis players. *Pediatr Exerc Sci*. 2016;28(1):77-86.
69. Arı Y, Çolakoğlu FF. Tenis oyuncularında core egzersizleri tenis performansını etkiler mi? *Gaziantep Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi*. 2021;6(1):40-54.
70. Gür F, Ersöz G. Kor antrenmanın 8-14 yaş grubu tenis sporcularının kor kuvveti, statik ve dinamik denge özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi. *Spormetre Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*. 2017;15(3):129-38.
71. Nashner LM. Practical biomechanics and physiology of balance. In: Gary P. Jacobson, Neil T. Shepard, Kamran Barin, Kristen Janky, Devin L.(eds). *Balance function assessment and management*, 3. ed. San Diego, Plural Publishing, 2021:87-105.

72. Carboch J, Váchová G. Injury occurrence and localization in tennis: Perspectives on prevention and physiotherapy. *Int. J. Phys. Educ. Fit. Sports*.2024;13(1):51-63.
73. Narayanan M, Srinivasan M, Subash P. Comparison of anticipation skills and reaction time in normal adults using a constructed anticipation timer. *bijcroo*.2024; 3 (1):5-9.
74. Davids K, Williams AM, Williams JG. Visual perception and action in sport, 1th ed. London, Routledge; 2000:118-22.
75. Ono S, Yoshimura Y, Shinkai R, Kizuka T. Properties of gaze strategies based on eye-head coordination in a ball-catching Task. *Vision*. 2024;8(2):20:1-11.
76. Mourtzios C, Athanailidis I, Arvanitidou V, Mourtziou M-A. Variation in psychological profiles of young tennis players, boys, and girls aged 11–14. *Eur J Sport Sci*. 2024;3(1):1-6.
77. Li Z. The application of psychological training in tennis teaching for young players. *International Journal of New Developments in Education*. 2023;5(5):60-3.
78. Баканова О. Теоретичні та практичні види підготовки тенісистів: особливості та вплив на результативність гри. *Спортивні ігри*. 2024(2 (32)):4-22.
79. Мокроусов Е. комплексное планирование тренировочного процесса для подготовки теннисисток к высшей спортивной квалификации в 4-х летнем цикле подготовки. *7.Sport Olimpism Sănătate*; 15-17september 2022, Chişinău, Moldova:Instrumentul Bibliometric National;2022.p.447-54.
80. Cui Y, Gómez M-Á, Gonçalves B, Sampaio J. Performance profiles of professional female tennis players in grand slams. *PloS one*. 2018;13(7):e0200591:1-18.
81. Zhang S, Lorenzo A, Gómez M-A, Mateus N, Gonçalves B, Sampaio J. Clustering performances in the NBA according to players' anthropometric attributes and playing experience. *J Sports Sci*. 2018;36(22):2511-20.
82. Sanchez Mencia E, Campos-Rius J, González Santamaría X, Borrajo Mena E. Tactical skills in tennis: A systematic review. *Int J Sports Sci Coach*. 2024;19(2):894-907.
83. Hizan H, Whipp P, Reid M. Gender differences in the spatial distributions of the tennis serve. *Int J Sports Sci Coach*. 2015;10(1):87-96.
84. Hottenrott K, Seidel I. Gegenstand, Selbstverständnis und Forschungsgrundlagen der Trainingswissenschaft .In:Seidel İ. (eds). *Handbuch Trainingswissenschaft - Trainingslehre*, 1th Schorndorf, Hofmann, 2017: 23-39.

85. Hoppe MW, Baumgart C, Stückradt A, Hoffmann N, Engelhardt M, Freiwald J, et al. Effects of playing strategies on match activities and physiological responses in well-trained female tennis players derived by an alternative statistical approach. *Sports Orthop. Traumatol.* 2019;35(1):31-9.
86. Brody H. Unforced errors and error reduction in tennis. *Br J Sports Med.* 2006;40(5):397-400.
87. Koopmann T, Faber I, Baker J, Schorer J. Assessing technical skills in talented youth athletes: a systematic review. *Sports Medicine.* 2020;50(9):1593-611.
88. González-González I, Rodríguez-Rosell D, Clavero-Martín D, Mora-Custodio R, Pareja-Blanco F, García JMY, et al. Reliability and accuracy of ball speed during different strokes in young tennis players. *Sports Med Int Open.* 2018;2(05):133-41.
89. Lyons M, Al-Nakeeb Y, Hankey J, Nevill A. The effect of moderate and high-intensity fatigue on groundstroke accuracy in expert and non-expert tennis players. *J Sports Sci Med.* 2013;12(2):298-308.
90. Cant O, Kovalchik S, Cross R, Reid M. Validation of ball spin estimates in tennis from multi-camera tracking data. *J Sports Sci.* 2020;38(3):296-303.
91. Rive J, Williams SC. *Tennis skills & drills*, 1th ed. USA, Human Kinetics, 2011:1-21.
92. Ward P, Williams AM, Bennett SJ. Visual search and biological motion perception in tennis. *Res Q Exerc Sport.* 2002;73(1):107-12.
93. Shim J, Carlton LG, Chow JW, Chae W-S. The use of anticipatory visual cues by highly skilled tennis players. *J Mot Behav.* 2005;37(2):164-75.
94. Elferink-Gemser MT, Jordet G, Coelho-E-Silva MJ, Visscher C. The marvels of elite sports: how to get there? : *BMJ Open Sport Exerc Med*; 2011;45(6): 683-4.
95. Bartlett R. Performance analysis: can bringing together biomechanics and notational analysis benefit coaches? *Int J Perform Anal Sport.* 2001;1(1):122-6.
96. Hughes M, Moore P. Movement analysis of elite level male 'serve and volley' tennis players. In: Hughes M, Maynard L, Lees A, Reilly T (eds). *Science and racket sports II*, 1th ed. London, Taylor & Francis, 2002: 272-7.
97. Cust EE, Sweeting AJ, Ball K, Robertson S. Machine and deep learning for sport-specific movement recognition: A systematic review of model development and performance. *J Sports Sci .* 2019;37(5):568-600.

98. Sands WA, Kavanaugh AA, Murray SR, McNeal JR, Jemni M. Modern techniques and technologies applied to training and performance monitoring. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(2):63-72.
99. O'donoghue P. Research methods for sports performance analysis, 1th ed. London, Routledge, 2009 :1-28.
100. Lames M, McGarry T. On the search for reliable performance indicators in game sports. *Int J Perform Anal Sport*. 2007;7(1):62-79.
101. Gréhaigne J-F, Godbout P. Dynamic systems theory and team sport coaching. *Quest*. 2014;66(1):96-116.
102. Liu P-r, Lu L, Zhang J-y, Huo T-t, Liu S-x, Ye Z-w. Application of artificial intelligence in medicine: an overview. *Curr Med Sci*. 2021;41(6):1105-15.
103. Cossich VR, Carlgren D, Holash RJ, Katz L. Technological breakthroughs in sport: Current practice and future potential of artificial intelligence, virtual reality, augmented reality, and modern data visualization in performance analysis. *Appl Sci*. 2023;13(23):12965:1-26.
104. Liebermann DG, Katz L, Hughes MD, Bartlett RM, McClements J, Franks IM. Advances in the application of information technology to sport performance. *J Sports Sci*. 2002;20(10):755-69.
105. Hopkins WG. Quantification of training in competitive sports: methods and applications. *Sports med*. 1991;12:161-83.
106. Rana M, Mittal V. Wearable sensors for real-time kinematics analysis in sports: A review. *IEEE Sens J*. 2020;21(2):1187-207.
107. Galé-Ansodi C, Castellano J, Usabiaga O. Physical profile of young tennis players in the tennis match-play using global positioning systems. *J. Phys. Educ. Sport*. 2017;17(2):826-32.
108. Aroganam G, Manivannan N, Harrison D. Review on wearable technology sensors used in consumer sport applications. *Sensors*. 2019;19(9):1983:1-26.
109. Nieto RM, Sánchez JMM. An automatic system for sports analytics in multi-camera tennis videos. 2013 10th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance; 27-30 August 2013, Krakow Poland : IEEE.2013.p.438-42.
110. Mecheri S, Rioult F, Mantel B, Kauffmann F, Benguigui N. The serve impact in tennis: First large-scale study of big hawk-eye data. Statistical analysis and data mining: The ASA Data Sci. J. 2016;9(5):310-25.

111. Osmanoğlu UÖ, Mutlu F, Gürsoy H, Şanlısoy S. Görüntü işleme ve analizinin tıpta kullanımı ve bir uygulama. Osmangazi Tıp Dergisi. 2016;41(1):6-16.
112. Uysal, E., & Yıldırım, B. A. Görüntü işleme ve rekonstrüksiyonda yapay zekâ. Türkiye Klinikleri Radiation Oncology-Special Topics.2022; 8(2), 30-5.
113. Yaman K, Sarucan A, Atak M, Aktürk N. Dinamik çizelgeleme için görüntü işleme ve arıma modelleri yardımıyla veri hazırlama. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2001;16(1):19-40.
114. Bhatele KR, Gupta V, Gupta K, Shrivastava P. The fundamentals of biomedical image processing. In: Information Resources Management Association (eds) Research Anthology on Improving Medical Imaging Techniques for Analysis and Intervention, IGI Global; 2023: 23-42.
115. Dipova N. Görüntü analizi yöntemlerinin geoteknik mühendisliğinde kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2018;9(1):33-44.
116. Dey N, Borra S, Ashour AS, Shi F. Machine learning in bio-signal analysis and diagnostic imaging:1 th ed.United Kingdom, Elsevier Academic Press, 2018:209-45.
117. Maier A, Syben C, Lasser T, Riess C. A gentle introduction to deep learning in medical image processing. Z. fur Med. Phys. 2019;29(2):86-101.
118. Wang P, Li W, Ogunbona P, Wan J, Escalera S. RGB-D-based human motion recognition with deep learning: A survey. Comput. Vis. Image Underst. . 2018;171:118-39.
119. Seshadri DR, Li RT, Voos JE, Rowbottom JR, Alfes CM, Zorman CA, et al. Wearable sensors for monitoring the physiological and biochemical profile of the athlete. NPJ Digit Med. 2019;2(1):72.
120. Jing R, Wang Z, Suo P. Optimization of track and field training methods based on SSA-BP and its effect on athletes' explosive power. Heliyon. 2024;10(3):1-14.
121. Zhao Z, Chai W, Hao S, Hu W, Wang G, Cao S, et al. A survey of deep learning in sports applications: Perception, comprehension, and decision. IEEE Trans Vis Comput Graph. 2025;1-20.
122. Rajšp A, Fister Jr I. A systematic literature review of intelligent data analysis methods for smart sport training. Appl Sci. 2020;10(9):3013:1-31.
123. Bai Z, Bai X. Sports big data: management, analysis, applications, and challenges. Complexity. 2021;2021(1):6676297:1-11.

124. Ferentinos KP. Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. *Comput Electron Agric.* 2018;145:311-8.
125. Yang S, Zhu F, Ling X, Liu Q, Zhao P. Intelligent health care: Applications of deep learning in computational medicine. *Front Genet.* 2021;12:607471:1-21.
126. Claudino JG, Capanema DdO, de Souza TV, Serrão JC, Machado Pereira AC, Nassis GP. Current approaches to the use of artificial intelligence for injury risk assessment and performance prediction in team sports: a systematic review. *Sports Med Open.* 2019;5(28):1-12.
127. Erickson BJ, Korfiatis P, Akkus Z, Kline TL. Machine learning for medical imaging. *radiographics.* 2017;37(2):505-15.
128. Bai L, Yuan H, Feng T, Song H, Yang J. Refined Response Distillation for Class-Incremental Player Detection. *arXiv preprint arXiv:230500620.* 2023:1-13.
129. Seshadri DR, Thom ML, Harlow ER, Gabbett TJ, Geletka BJ, Hsu JJ, et al. Wearable technology and analytics as a complementary toolkit to optimize workload and to reduce injury burden. *Front Sports Act Living.* 2021;2:630576:1-17.
130. Seidenschwarz P, Rumo M, Probst L, Schuldt H, editors. High-level tactical performance analysis with sportsense. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Multimedia Content Analysis in Sports; 16 October 2020, Seattle WA ,USA: Association for Computing Machinery; 2020.p. 45-52.*
131. Usmani ZK, Selvaperumal SK, Ratnadurai D. Enhance yoga posture recognition using machine vision. *AIP Conference Proceedings; 22-23 April 2022, Chennai India: AIP Publishing;2023.p.11004.*
132. Wedding D. Public education and media relations in psychology. *Am Psychol.* 2017;72(8):764-77.
133. Gong X, Wang F. Classification of tennis video types based on machine learning technology. *Wirel Commun Mob Comput.* 2021;2021(1):1-11.
134. Boscolo F, Lamberti F, Morra L. Analyzing the performance of deep learning-based techniques for human pose estimation. *IEEE International Workshop on Sport, Technology and Research (STAR); 08-10 July 2024,Lecco, Italy:IEEE. p. 193-8.*
135. Zhu G, Xu C, Gao W, Huang Q, editors. Action recognition in broadcast tennis video using optical flow and support vector machine. *Computer Vision in Human-Computer Interaction: ECCV 2006 Workshop on HCI, 13 May 2006 ,Graz, Austria, Proceedings 9 Springer ; 2006. p.89-98.*

136. Pingali G, Opalach A, Jean Y. Ball tracking and virtual replays for innovative tennis broadcasts. Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition ICPR-2000;03-07 September 2000,Barcelona, Spain:IEEE.;2000.p.152-6.
137. Wei X, Lucey P, Morgan S, Sridharan S, editors. Predicting shot locations in tennis using spatiotemporal data. 2013 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA); 26-28 November 2013,; Hobart, TAS, Australia IEEE ;2013.p.1-8
138. Yan L, Xin S. Design and image Research of tennis line examination based on machine vision analysis. Comput Intell Neurosci. 2021;2021(1):2436120:1-11.
139. Sağıroğlu Ş, Demirezen MU. Yorumlanabilir ve açıklanabilir yapay zeka ve güncel konular, 1. Baskı.İstanbul,Nobel Kitapevi, 2022:43-76.
140. Mintz Y, Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine. Minim Invasive Ther Allied Technol. 2019;28(2):73-81.
141. Konar A.Computational intellegence in mobile robotics.In:Jan Peters, Computational Intelligence: Principles, Techniques and Applications, *The Computer Journal*,1th ed. Berlin,Heidelberg, Springer, 2005:50(6): 571-609.
142. Pennachin C, Goertzel B. Contemporary approaches to artificial general intelligence. Artificial general intelligence: Springer; 2007;50(6):1-30.
143. Samuel AL. Some studies in machine learning using the game of checkers. IBM J Res Dev. 1959;3(3):210-29.
144. Alpaydin E. Introduction to machine learning, 4th ed. London England, Massachusetts The MIT Press, 2020:313-61.
145. Liu J, Lei J, Ou Y, Zhao Y, Tuo X, Zhang B, et al. Mammography diagnosis of breast cancer screening through machine learning: a systematic review and meta-analysis. Clin Exp Med. 2023;23(6):2341-56.
146. Huertas-Tato J, Martín A, Fierrez J, Camacho D. Fusing CNNs and statistical indicators to improve image classification. Information Fusion. 2022;79:174-87.
147. Abdullah AA, Hassan MM, Mustafa YT. A review on bayesian deep learning in healthcare: Applications and challenges. IEe Access. 2022;10:36538-62.
148. Öztemel E. Yapay sinir ağlari, 3. Baskı.İstanbul,PapatyaYayincilik, 2003:29-42.
149. Huang M, Yongquan T. Tech-driven excellence: A quantitative analysis of cutting-edge technology impact on professional sports training. J Comput Assist Learn. 2025;41(1):1-15.

150. Srivastava PK, Pandey RK, Srivastava GK, Anand N, Krishna KR, Singhal P, et al. Intelligent integration of wearable sensors and artificial intelligence for real-time athletic performance enhancement. *JISIoT* . 2024;13(2):60-77.
151. Wang Y, Li R. AI-Driven Multi-Modal Information Fusion System for Real Applications in Physical Training. *Internet Technol. Lett.* 2024;8(5):1-5.
152. Vec V, Tomažič S, Kos A, Umek A. Trends in real-time artificial intelligence methods in sports: a systematic review. *J Big Data.* 2024;11(1):148:1-23.
153. Habibi M, Nourani M, Nourani M, editors. AI-Based Kinematic Analysis for Track Athletes. 2024 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP); 29 June -02 July 2024, Osaka ,Japan :IEEE ;2024. p. 338-43.
154. Mamen A, Kovači S, Montanaro T, Sergi I, Patrono L, editors. A digital twin architecture for minimizing injuries risks with personalized regimens via IoT and machine learning. 2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech);25-28 June Boland Split, Croatia:IEEE;2024. p.1-5.
155. Chenyi Z, Weijian Z, Bo L, Zhiyong Z, Feng Z. 1 China Basketball College, Beijing Sport University, Beijing 100048, China; 2 School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing 100044, China. Journal homepage: <http://iacss.org/index.php?id>. 2024;23(2):62-90.
156. Pisaniello A. The game changer: How artificial intelligence is transforming sports performance and strategy. *geopolitical, social security and freedom journal.* 2024;7(1):75-84.
157. Du T, Bi N. Application of Artificial Intelligence Advances in Athletics Industry: A Review. *Concurr Comput: Practice and Experience.* 2025;37(3):e8372:1-15.
158. Munoz-Macho AA, Domínguez-Morales MJ, Sevillano-Ramos JL. Performance and healthcare analysis in elite sports teams using artificial intelligence: a scoping review. *Front Sports Act Living.* 2024;6:1383723:1-25.
159. Chen Q, Xu D, Yan Y, Qu Z, Zhao H, Li X, et al. A self-powered tennis training system based on micro-nano structured sensing yarn arrays. *Adv Funct Mater.* 2025;35(5):2414395:1-12.
160. Guelmami N, Fekih-Romdhane F, Mechraoui O, Bragazzi NL. Injury prevention, optimized training and rehabilitation: how is AI reshaping the field of sports medicine. *N Asian J Me.* 2023;1(1):30-4.

161. Li X, Huang P. Simulation of tennis serve behavior based on video image processing and wireless sensor technology. *EURASIP J Wirel Commun Netw*. 2020;2020(1):137:1-16.
162. Sharma M, Srivastava R, Anand A, Prakash D, Kaligounder L, editors. Wearable motion sensor based phasic analysis of tennis serve for performance feedback. 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP);05-09 March 2017, New Orleans, LA, USA : IEEE; 2017. p. 5945-5949.
163. Pu Y, Liu L. Wearable device data-driven athlete injury detection and rehabilitation monitoring algorithm. *Mol Cell Biomech*. 2024;21(2):361:1-17.
164. Saleh MS, Saleh MS. Analysis of superior extremity strength on the groundstroke attack skills of tennis athletes. *Kinestetik: Jurnal Ilmiah Pendidikan Jasmani*. 2023;7(4):1001-8.
165. Van Hartskamp M, Consoli S, Verhaegh W, Petkovic M, Van de Stolpe A. Artificial intelligence in clinical health care applications. *Interact J Med Res*. 2019;8(2):e12100:1-8.
166. Zheng W. Current technologies and applications of digital image processing. *JBSHA*. 2023;3(1):013-23.
167. Sarybekova F, Buribekov O, Popova K. Technology of processing graphic information. *Научные труды ЮКГУ им М Ауэзова*. 2017(3):123-9.
168. Xavier GB, Lima G. Quantum information processing with space-division multiplexing optical fibres. *Commun Phys*. 2020;3(1):1-11.
169. Kale GV, Patil VH. A study of vision based human motion recognition and analysis. *Int. J. Ambient Comput. Intell. (IJACI)*. 2016;7(2):75-92.
170. Cheng X, Yang B, Olofsson T, Liu G, Li H. A pilot study of online non-invasive measuring technology based on video magnification to determine skin temperature. *Build Environ*. 2017;121:1-10.
171. Lun R, Zhao W. A survey of applications and human motion recognition with microsoft kinect. *Intern J Pattern Recognit Artif Intell*. 2015;29(05):1-48.
172. Xuexi Z, Guokun L, Genping F, Dongliang X, Shiliu L, editors. SLAM algorithm analysis of mobile robot based on lidar. 2019 Chinese Control Conference (CCC); 27-30 July 2019, Guangzhou, China:IEEE; 2019.p. 4739-45.
173. Superiori L, Rupp M, editors. Detection of pan and zoom in soccer sequences based on H. 264/AVC motion information. 2009 10th Workshop on Image Analysis for

- Multimedia Interactive Services; 06-08 May 2009, London,UK: IEEE; 2009.p. 41-44.
174. Lu M.Sports training simulation system based on video processing technology. 2021 4th International conference on information systems and computer aided education; 24-26 September 2021,Dalian, China : Association for Computing Machinery;2021.p.2836-9.
 175. Zhang Y, Wei W. Sports training correction based on 3D virtual image model. *Mob. Netw. Appl.*. 2023;28(5):1687-98.
 176. Wang JR, Parameswaran N. Survey of sports video analysis: research issues and applications. Proceedings of the Pan-Sydney area workshop on Visual information processing; 01 June 2004, Sydney Australia: Australian Computer Society, Inc ;2004.p.87-90.
 177. Zhang J. Sports video analysis algorithm based on image multiple processing technology. 2023 International conference on advances in electrical engineering and computer applications (AEECA); 18-19 August 2023, Dalian,China: IEEE ;2023.p.845-9.
 178. Scott J, Cremer MKP, Parekh NU, Lee DH. Methods and systems for sport data extraction. U.S. Patent No. 10,997,424. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.Google Patents; 2021.
 179. Athavale AA, Cherekar A, Aditi B, Prabhakar A, Rapate GS, editors. An AI-powered personalised badminton training system with frame-by-frame correction. international conference on innovative computing and communication; 02 October 2024, Singapore:Springer;2024.p. 237-47.
 180. Zhang H, Sciutto C, Agrawala M, Fatahalian K. Vid2player: Controllable video sprites that behave and appear like professional tennis players. arXiv preprint arXiv:200804524. 2020;40 (3):1-16.
 181. Wang JR, Parameswaran N. Detecting tactics patterns for archiving tennis video clips. IEEE sixth international symposium on multimedia software engineering; 13-15 December 2004, Miami,FL, USA: IEEE;2004. p.186-92.
 182. Han J, Farin D, editors. Multilevel analysis of sports video sequences. multimedia content analysis, management, and retrieval .2006;6073:1-13.
 183. Havuç, E., Alpak, Ş., Çakırel, G., & Baran, M. K.. Derin öğrenme vasıtasıyla masa tenisi topu takibi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*.2021;(27), 629-35.

184. Manera JF, Vainstein J, Delrieux C, Maguitman AG, editors. Action recognition in tennis videos using optical flow and conditional random fields. XIV Argentine Symposium on Technology (AST)-JAIIO 42 ;September 2013,Baha Blanca,Argentina: 2013.p.152-62.
185. Farhat M, Khalfallah A, Bouhlef MS. A real-time court detection and tracking system to tennis videos. J. Test. Eval.. 2019;47(4):3103-22.
186. Kijak E, Gravier G, Oisel L, Gros P, editors. Structuration multimodale d'une vidéo de tennis par Modèles de Markov Cachés. ½9e Colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images; 2003;3:42-5.
187. Berg MF, Døsvik H, Skjølsvik KØ, Pedersen TS, Aasan V, Steinert M, et al. Wireless sensor system for real-time performance monitoring in sports. Front. Sports Act. Living. 2023;5:1305117:1-11.
188. Elliott N, Choppin S, Goodwill S, Senior T, Hart J, Allen T. Single view silhouette fitting techniques for estimating tennis racket position. Sports Eng.. 2018;21:137-47.
189. Zhang Y, Tsai S-B. Application of adaptive virtual reality with ai-enabled techniques in modern sports training. Mobile Information Systems. 2021;2021(1):6067678:1-10.
190. Gomez-Ruano M-A, Ibáñez SJ, Leicht AS. Performance analysis in sport. Frontiers Media SA; 2020;11: 611634:1-4.
191. Morais JE, Kilit B, Arslan E, Soylu Y, Neiva HP. Effects of a 6-week on-court training program on the International Tennis Number (ITN) and a range of physical fitness characteristics in young tennis players. Front Sports Act Living . 2024;6:1304073:1-11.
192. Richards O, Cook C. Efficient space variant gaussian blur approximation. SIGGRAPH Asia 2024 Posters2024;02 December 2024,New York , USA: Association for Computing Machinery; 2024.p. 1-2.
193. Yuan Q, Dai S. Adaptive histogram equalization with visual perception consistency. Information Sciences. 2024;668:120525:1-15.
194. Akwiwu Q. Object detection, segmentation, and distance estimation using YOLOv8 [doctoral thesis]Kuopio, Finland: Savonia University Of Applied Sciences ;2025.
195. Ju R-Y, Cai W. Fracture detection in pediatric wrist trauma X-ray images using YOLOv8 algorithm. Sci Rep. 2023;13(1):20077:1-13.

196. Bertsimas D, Digalakis Jr V. The backbone method for ultra-high dimensional sparse machine learning. *Machine Learning*. 2022;111(6):2161-212.
197. Wu Y, Yao Q, Fan X, Gong M, Ma W, Miao Q. PANet: A point-attention based multi-scale feature fusion network for point cloud registration. *IEEE Tran Instrum Meas* . 2023;72:1-13.
198. Lin T-Y, Maire M, Belongie S, Hays J, Perona P, Ramanan D, et al., editors. Microsoft coco: Common objects in context. *Computer vision–ECCV 2014: 13th European conference; September 6-12 September 2014, Switzerland: Springer International Publishing* ;2014.p.740-55.
199. Arouri Y, Sayyafzadeh M. An adaptive moment estimation framework for well placement optimization. *Comput Geosci (Bassum)*. 2022;26(4):957-73.
200. Schluchter MD. Mean square error. *Encyclopedia of Biostatistics*. 2005;5:1-3.
201. Kar I, Mukhopadhyay S. Multiclass altitude and rotation invariant object detection using slicing objectness loss (sol) for images with complex background. *11th International Symposium on Electronic Systems Devices and Computing (ESDC); 04-06 May 2023, Sri City, India: IEEE* ;2023.p.1-5.
202. <https://learnopencv.com/human-action-recognition-using-detectron2-and-lstm/>
Son Erişim Tarihi 06.08.2025.
203. Shi S, Huang K. Artificial intelligence-based bayesian optimization and transformer model for tennis motion recognition. *Journal of Applied Science and Engineering*.29(1):171-8.
204. Yilmaz EN, Navruz TS, editors. Real-Time object detection: a comparative analysis of yolo, ssd, and efficientdet algorithms. *7th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (ICHORA); 23-24 May 2025, Ankara, Türkiye: IEEE;2025.p.1-9.*
205. Markappa PSS, O'Leary C, Lynch C, editors. A review of yolo models for soccer-based object detection. *Sixth international conference on intelligent computing in data sciences (ICDS); 23-24 October 2024, Marrakech, Morocco: IEEE;2024.p.1-7.*
206. Alem A, Kumar S. Deep learning models performance evaluations for remote sensed image classification. *Ieee Access*. 2022;10:111784-93.
207. Hirsch T, Hofer B, editors. The MAP metric in information retrieval fault localization. *38th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE); 11-15 September 2023, Luxembourg, Luxerbourg: IEEE;2023.p.1480-91.*

208. Schlegel K, Jiang L, Ni H. Using joint angles based on the international biomechanical standards for human action recognition and related tasks. arXiv preprint arXiv:240617443. 2024;1-29.
209. Lambrich J, Muehlbauer T. Biomechanical analyses of different serve and groundstroke techniques in tennis: A systematic scoping review. PLoS One. 2023;18(8):e0290320:1-17.
210. Lu T, Cheng K, Hua X, Qin S. KSL-POSE: A Real-Time 2D Human Pose Estimation Method Based on Modified YOLOv8-Pose Framework. Sensors (Basel, Switzerland). 2024;24(19):6249:1-16.
211. Bharambe D, Sarode S, Rathod V, Devharkar S, Rajput D. YOLO V-8 based ai system for in-depth tennis match analysis. journal of engineering design and computational science (JEDCS).2024;3(4):1-7.
212. <https://www.jkglaspey.com/projects/tennis-ball-detection-using-yolov8-and-maskrcnn>. Son Erişim Tarihi 26 Ağustos 2025.
213. Hung J-M, Chiang J-Y, Wang K. Tennis player pose classification using YOLO and MLP neural networks. International symposium on intelligent signal processing and communication systems (ISPACS); 16-19 November 2021, Hualien, Taiwan: IEEE; 2021.p.1-2.
214. Brocherie F, Dinu D. Biomechanical estimation of tennis serve using inertial sensors: A case study. Frontiers in Sports and Active Living. 2022;4:962941:1-8.
215. Peng X, Tang L. Biomechanics analysis of real-time tennis batting images using Internet of Things and deep learning. The Journal of Supercomputing. 2022;78(4):5883-902.
216. Abrams GD, Harris AH, Andriacchi TP, Safran MR. Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system. British Journal of Sports Medicine. 2014;48(4):339-42.
217. Wood D, A novel mechanical examination of the tennis serve using expert qualitative analysis and machine learning[Doctoral Thesis] Australia:The University of Western Australia;2024.
218. Ramadan E, Ebrahim M, Atia A. Detection and classification of correctly and incorrectly played strokes in tennis. International mobile, intelligent, and ubiquitous computing conference (MIUCC); 13-14 November 2024, Cairo, Egypt: IEEE; 2024.p.389-94.

219. Van der Meer BR, van den Hoven MA, van der Kamp J, Savelsbergh GJ. Self-controlled video feedback facilitates the learning of tactical skills in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 2024;95(2):537-45.
220. Yu C-H, Wu C-C, Wang J-S, Chen H-Y, Lin Y-T. Learning tennis through video-based reflective learning by using motion-tracking sensors. *Journal of Educational Technology & Society*. 2020;23(1):64-77.
221. Xie M. Design of a physical education training system based on an intelligent vision. *Computer Applications in Engineering Education*. 2021;29(3):590-602.
222. Razali R, Suwarganda E, Zawaki I, editors. The effect of direct video feedback on performance of tennis serve. 30th Annual Conference of Biomechanics in Sports;02-06 July 2012, Melbourne, Australia: ISBS-Conference Proceedings Archive; 2012.p.241-4.
223. Liying Z, editor A study on the application of computer video analysis recording technology and image processing in assisted training system. *IEEE International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA)*; 29-31 October 2021,Dalia, China : IEEE;2021.p.166-70.
224. Kelly P, Ó Conaire C, Monaghan D, Kuklyte J, Connaghan D, Pérez-Moneo Agapito JD, et al. Performance analysis and visualisation in tennis using a low-cost camera network. *Multimedia Grand Challenge Track at ACM Multimedia 2010*;25-29 October 2010, Firenze, Italy;2010.p. 15736.
225. Liu F, Sun Y, editors. A Tracing-based Tennis coaching and smart training platform using artificial intelligence and computer vision. *Artificial intelligence and fuzzy logic system 8th International Conference on Artificial Intelligence and Fuzzy Logic System (AIFZ 2022)*; 24-25 September 2022, Toronto, Canada : Computer Science & Information Technology (CS & IT);2022.p.89-100.

EKLER

EK-1. Özgeçmiş



EK-2. Etik Kurul Onayı

