Editör
Doç. Dr. Yunus ŞAHİNLER

NEUROSPORT -1

Beyin, Yapay Zekâ ve İnsan Performansı



NEUROSPORT-1

Beyin, Yapay Zekâ ve İnsan Performansı

Editör
Doç. Dr. Yunus ŞAHİNLER



Red and River Publications

NEUROSPORT-1

Beyin, Yapay Zekâ ve İnsan Performansı

Editör: Doç. Dr. Yunus ŞAHİNLER
Yazarlar: Alperen PEPE, Buşra ÖZCAN, Görkem AÇAR, İrfan KARA, Kadir PEPE, Mahmut ULUKAN, Mehmet AYDOĞAN, Mehmet BEYAZ, Sezer TAŞTAN, Sinan SEYHAN, Yunus ŞAHİNLER

E-ISBN: 978-625-91737-6-4

Atıf: Şahinler, Y. (Ed.). (2026). *Neurosport-1: Beyin, yapay zekâ ve insan performansı.* Red and River Dijital Yayıncılık.

Yayın Tasarımcısı / Koordinatörü: Levent CEYLAN Kapak Tasarımı & Mizanpaj: Red and River Grafik Tasarım

Baskı: Rize | 1. Baskı: Eylül, 2026
Yayıncı: Red and River Djital Yayıncılık | 83920 Çiftekavak Mahallesi Düzyalı Sokak No:19/2 Merkez / Rize

Copyright © Red and River Publications
Bu kitabın basım, yayım ve satış hakları Red and River Dijital Yayıncılık'a aittir. Red and River Dijital Yayıncılık'ın izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri, kapak tasarımı, elektronik, mekanik, fotokopi, manyetik, kayıt ya da başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Bu kitap, elektronik (e-kitap) formatında yayımlanmaktadır.
Kitap içeriğinin tüm sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.

NEUROSPORT-1

Beyin, Yapay Zekâ ve İnsan Performansı

Editör

Doç. Dr. Yunus ŞAHİNLER

Rize, 2026

ÖNSÖZ

Spor bilimleri, günümüzde yalnızca fiziksel performansın ölçülmesi ve geliştirilmesiyle sınırlı olmayan; nörobilim, yapay zekâ, biyomekanik, dijital sağlık ve giyilebilir teknolojilerle giderek daha fazla bütünleşen disiplinlerarası bir yapıya dönüşmektedir. Bu dönüşüm, insan performansının anlaşılmasında beynin ve teknolojinin birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

NEUROSPORT-1: Beyin, Yapay Zekâ ve İnsan Performansı, spor bilimlerindeki bu dönüşümü farklı disiplinlerin bakış açılarıyla ele almak amacıyla hazırlanmıştır. Kitap; beyin sağlığı ve fiziksel aktiviteden yapay zekâ destekli hareket analizine, dijital sağlık sistemlerinden performans teknolojilerine, yaralanmaların önlenmesi ve rehabilitasyondan paralimpik sporlardaki teknolojik uygulamalara kadar geniş bir bilimsel çerçeve sunmaktadır.

Eserde yapay zekâ yalnızca teknolojik bir yenilik olarak değil; insan hareketinin analiz edilmesi, performansın değerlendirilmesi, sporcu sağlığının izlenmesi ve karar süreçlerinin desteklenmesinde kullanılan önemli bir araç olarak ele alınmaktadır. Benzer şekilde nörobilim ve beyin sağlığı, insan performansının fizyolojik, bilişsel ve psikolojik boyutlarını anlamada temel bileşenler olarak değerlendirilmektedir.

NEUROSPORT-1, teknoloji ile insan performansı arasındaki ilişkinin merkezine insanı yerleştiren bir yaklaşımı benimsemektedir. Amaç, teknolojinin insanın yerini alması değil; bilimsel ölçümü güçlendiren, karar süreçlerini destekleyen ve performansın daha kapsamlı anlaşılmasına katkı sağlayan bir araç olarak değerlendirilmesidir.

Bu kitabın spor bilimleri alanında çalışan akademisyenlere, araştırmacılara, lisans ve lisansüstü öğrencilere, antrenörlere ve spor profesyonellerine güncel bir bilimsel kaynak sunmasını; aynı zamanda nörobilim, yapay zekâ ve spor teknolojilerinin geleceğine yönelik yeni araştırma fikirlerine katkı

sağlamasını diliyorum. Kitabın hazırlanmasına bilimsel bilgi ve deneyimleriyle katkıda bulunan tüm bölüm yazarlarına teşekkür eder, ***NEUROSPORT-1: Beyin, Yapay Zekâ ve İnsan Performansı*** adlı eserin spor bilimleri literatürüne yararlı olmasını temenni ederim.

Doç. Dr. Yunus ŞAHİNLER
Editör

1. BÖLÜM

Yapay Zekâ Destekli Yaralanma Önleme, Rehabilitasyon ve Performansa Dönüş Süreçleri: Spor Bilimleri İçin Uygulamalı Bir Çerçeve

Görkem AÇAR[1], Sinan SEYHAN[2]

1 İstanbul Gelişim Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, gacar@gelisim.edu.tr ORCID: 0000-0002-0970-8625

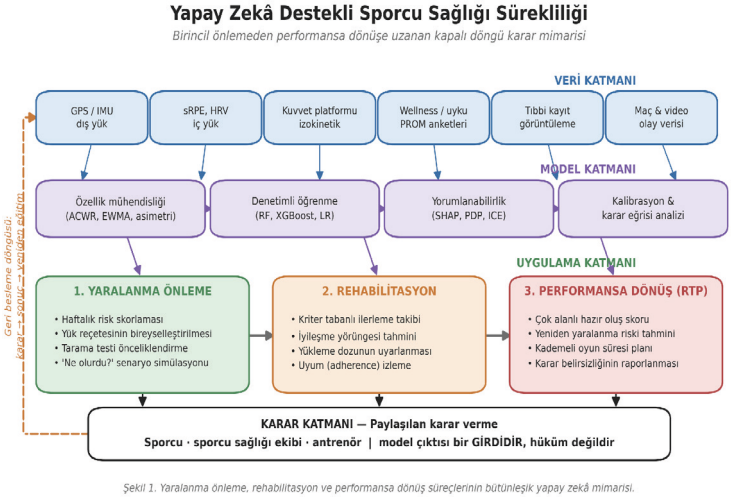
2 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, sinan.seyhan@cbu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-4979-7992

1. Giriş

Elit spor ortamında bir sporcunun tek bir haftası, yirmi yıl önce bütün bir sezonun ürettiğinden daha fazla veri üretmektedir: GPS ve IMU tabanlı dış yük, sRPE ve kalp atım hızı değişkenliği temelli iç yük, kuvvet platformu ve izokinetik ölçümler, wellness anketleri ve tıbbi kayıtlar. Ancak veri bolluğu kendiliğinden daha iyi kararlara dönüşmemektedir. Sporcu sağlığı ekibinin sorusu değişmemiştir: Bu sporcu bu hafta antrenmana tam katılmalı mı? Bu soruların her biri çok sayıda gösterge arasından bir hüküm üretmeyi gerektirmekte; insan bilişi ise ikiden fazla değişkeni eşzamanlı ağırlıklandırmada sistematik olarak sınırlı kalmaktadır. Yapay zekânın (YZ) asıl katkısı gizli bilgiyi "keşfetmek" değil, bu ağırlıklandırmayı açık, tekrarlanabilir ve denetlenebilir kılmaktır. Bölümün tamamına yön veren önerme şudur: yapay zekâ karar verici değil, karar destekleyicidir.

Bu bölüm, sporcu sağlığı sürekliliğinin üç evresini — birincil önleme, rehabilitasyon ve performansa dönüş (return to performance, RTP) — tek bir analitik çerçevede ele almaktadır (Şekil 1). Kuramsal tartışma, simüle edilmiş ancak fizyolojik olarak gerçekçi bir prospektif kohort üzerinde kurulan tam bir modelleme hattıyla iç içe yürütülmekte; ağaç tabanlı topluluk

yöntemleri lojistik regresyon referansıyla karşılaştırılmakta, ayrım gücü, kalibrasyon ve klinik yararlılık ayrı ayrı değerlendirilmekte ve SHAP (SHapley Additive exPlanations) ile model çıktısı yorumlanmaktadır.



Şekil 1. Yaralanma önleme, rehabilitasyon ve performansa dönüş süreçlerinin bütünleşik yapay zekâ mimarisi.

Şekil 1. Yaralanma önleme, rehabilitasyon ve performansa dönüş süreçlerinin bütünleşik yapay zekâ mimarisi. Karar katmanı, model çıktısının klinik hükmü ikame etmediğini vurgulamaktadır.

2. Kuramsal Temeller

Meeuwisse ve arkadaşlarının (2007) döngüsel modelinde sporcu, sabit bir risk profiline sahip durağan bir varlık değil, her maruziyet döngüsünden değişmiş çıkan dinamik bir sistemdir; risk, sezon boyunca yeniden yapılanan bir durum değişkenidir. Bittencourt ve arkadaşları (2016) bunu karmaşık sistemler yaklaşımıyla ileri taşımıştır: yaralanma, tek tek risk faktörlerinin toplamından değil, aralarındaki etkileşim ağının ortaya çıkardığı örüntüden doğmaktadır. Bir sporcuda zararsız olan yüksek haftalık yük artışı, eksantrik hamstring kuvveti düşük ve yaralanma öyküsü olan bir başkasında kritik hâle gelebilmektedir. Ağaç tabanlı topluluk yöntemlerinin gerekçesi

buradadır: yüksek dereceli etkileşimleri ve eşik etkilerini önceden belirtmeye gerek kalmadan modelleyebilmektedirler.

Tahmin etmek ile açıklamak aynı şey değildir. Shmueli'nin (2010) ayrımına göre açıklayıcı modelleme nedensel bir yapıyı sınar, tahmine yönelik modelleme gözlenmemiş bir sonucu öngörür. "Geçen hafta fizyoterapi seansı sayısı" yaralanmayı güçlü biçimde öngörebilir; ancak seans sayısını azaltmak yaralanmayı önlemez — değişken, henüz teşhis edilmemiş bir sorunun belirtisidir, nedeni değil. Yüksek tahmin performansı, müdahale önerisi üretmek için yeterli değildir ve SHAP dâhil hiçbir yorumlanabilirlik yöntemi bu boşluğu tek başına dolduramaz.

Akut: kronik yük oranı (ACWR) ve "0,80–1,30 güvenli bölgesi", bir dönem birçok kulüpte fiilî standart hâline gelmiştir. Impellizzeri ve arkadaşları (2020) matematiksel eşleşme, iki farklı bilginin tek sayıya çökertilmesi ve keyfî kategorileştirme gerekçeleriyle kapsamlı bir eleştiri getirmiş; sonraki çalışmalarda "güvenli bölge" bulgusu yeniden üretilememiştir. Çıkarılacak ders yöntembilimseldir: yaygın benimsenmişlik geçerlik kanıtı değildir. Bu bölümde ACWR, kesme noktası uygulanmadan ve mutlak akut/kronik yükle birlikte kullanılmakta; fonksiyonel biçimi modelin kendisinin öğrenmesine izin verilmektedir.

Beklenti düzeyi gerçekçi tutulmalıdır. Van Eetvelde ve arkadaşları (2021) ile Leckey ve arkadaşları (2025), alandaki çalışmaların büyük çoğunluğunun küçük örneklem, dış geçerleme eksikliği ve heterojen sonuç tanımlarıyla malul olduğunu bildirmiştir. Bullock ve arkadaşları (2022) daha keskin bir dille, kalibre edilmemiş ve dışsal olarak geçerlenmemiş modellerin sahaya taşınmasının etik açıdan savunulamaz olduğunu ileri sürmüştür. Buna karşılık Rossi ve arkadaşları (2018), GPS verisiyle kurulan yorumlanabilir bir tahmin sisteminin uygulamadaki değerini göstermiştir. Gerçekçi konum şudur: makine öğrenmesi, çok değişkenli izleme verisinden risk sıralaması üretmede tek değişkenli yaklaşımlardan üstündür; ancak

bireysel düzeyde kesinlik iddiası taşıyamaz ve klinik hükmü ikame edemez.

3. Veri Mimarisi ve Değişken Mühendisliği

Sporcu izleme verisi, farklı örnekleme frekanslarına sahip kaynakların birleştirilmesini gerektirmektedir ve iki kural belirleyicidir. Birincisi, analiz birimi açıkça tanımlanmalıdır; bu bölümde birim sporcu-haftadır ve sonuç değişkeni, takip eden yedi gün içinde yaralanma olup olmadığını göstermektedir. İkincisi, zamansal nedensellik yönü korunmalıdır: bir haftanın tahmininde yalnızca o haftanın sonuna kadar erişilebilir olan bilgi kullanılabilir. Bu ilkenin ihlali veri sızıntısıdır (data leakage) ve tahmin modellerinde en sık rastlanan, en yıkıcı yöntemsel hatadır.

Model, tanımladığınız şeyi tahmin etmektedir. "Yaralanma" en az dört boyutta karara bağlanmalıdır: zaman kaybı ölçütü (tam zaman kaybı mı, tıbbi başvuru gerektiren tüm sağlık sorunları mı — bu tercih olay sayısını üç-dört kat değiştirebilmektedir), mekanizma (temaslı yaralanmalar büyük ölçüde rastlantısaldır; iki grubun birlikte modellenmesi sinyali zayıflatmaktadır), anatomik bölge ve doku tipi (hamstring zorlanması ile ön çapraz bağ yırtığının risk profilleri örtüşmemektedir) ve OSICS/OSIICS gibi standart kodlama. Burada sonuç değişkeni, takip eden yedi gün içinde en az bir gün antrenman/müsabaka kaybına yol açan temassız alt ekstremite yaralanmasıdır.

Ham izleme verisi doğrudan modele verildiğinde bilgi kaybı yaşanmakta; alan bilgisiyle türetilen değişkenler modele fizyolojik yapı kazandırmaktadır. Kronik yük, basit hareketli ortalama yerine üstel ağırlıklı hareketli ortalama (EWMA; $\lambda = 0{,}25$, yaklaşık dört haftalık etkin pencere) ile hesaplanmıştır; bu, fitness–yorgunluk kuramının üstel sönümlenme varsayımıyla daha tutarlıdır (Williams vd., 2017). Değişken seti; sRPE tabanlı akut ve kronik yük, ACWR, monotoni, zorlanma, yüksek hızlı koşu mesafesi, Nordic eksantrik kuvvet, dikey sıçrama, Y-denge testi, asimetri indeksleri, wellness ve uyku

skorları, yaralanma öyküsü ve antropometrik değişkenlerden oluşmaktadır.

Sporcu izleme verisinde eksiklik kuraldır ve çoğu zaman rastgele değildir: sporcu yorgun olduğu için antrenmanı atlamışsa, eksik veri bizzat riskin bir göstergesidir. Bu nedenle satır silme hem örneklemi daraltmakta hem de en riskli gözlemleri sistematik olarak dışarıda bırakarak yanlılık üretmektedir; çoklu atama ile birlikte bir "eksiklik göstergesi" değişkeninin modele eklenmesi önerilmektedir.

4. Uygulamalı Örnek: Modelleme Hattının Kurulması

Uygulamalı örnek için 600 sporcunun 24 haftalık sezonunu kapsayan bir prospektif kohort simüle edilmiştir. İlk olaydan sonra takip sonlandırıldığından toplam gözlem sayısı 9.275 sporcu-haftadır; bunların 353'ünde (%3,81) olay gerçekleşmiş, sınıf dengesizliği yaklaşık 1:25 düzeyinde kalmıştır. Üretim modelinde bilinçli olarak dört doğrusal olmayan yapı kurulmuştur: ACWR için U-biçimli doz–yanıt; yüksek ACWR ile yaralanma öyküsü arasında etkileşim; Nordic eksantrik kuvvette yaklaşık 290 N eşiği; monotonide yaklaşık 1,9 kırılma noktası. Bu yapılar, Bölüm 6'da SHAP'ın isabetliliğini sınamak için kullanılacaktır.

Sporcu düzeyinde bölünme kritik adımdır. Tahmin modellemesinde en yaygın ve en maliyetli hata, eğitim ve test kümelerinin satır düzeyinde rastgele ayrılmasıdır: aynı sporcunun farklı haftaları güçlü biçimde ilişkilidir ve sporcuya özgü sabit özellikler tüm satırlarında ortaktır. Rastgele satır ayrımı aynı sporcuyu hem eğitim hem test kümesine yerleştirmekte, model riski tahmin etmek yerine sporcuyu tanımayı öğrenmekte ve gerçek dışı biçimde yüksek performans değerleri ortaya çıkmaktadır. Doğru çözüm gruplandırılmış bölünmedir: GroupShuffleSplit ile eğitim/test ayrımı, StratifiedGroupKFold ile çapraz doğrulama; her ikisinde de gruplama değişkeni sporcu kimliğidir.

Sınıf dengesizliği ayrı bir karar gerektirmektedir. 1:25 düzeyinde tüm gözlemlere "yaralanma yok" diyen bir model %96,2 doğruluk elde eder; doğruluk bu nedenle kullanılmamalıdır. Sınıf ağırlıklandırma veriyi değiştirmediği için tercih edilen yaklaşımdır, ancak olasılıkları yukarı kaydırdığından mutlaka kalibrasyonla birlikte uygulanmalıdır. SMOTE gibi sentetik yeniden örnekleme yöntemleri sporcu düzeyindeki grup yapısını bozmakta ve kalibrasyonu ciddi biçimde zedelemektedir; van den Goorbergh ve arkadaşları (2022) dengesizlik düzeltmesinin ayrım gücünü artırmadığını, buna karşılık kalibrasyonu bozduğunu göstermiştir. Eşik ayarı ise dengesizliği modelde değil karar katmanında ele alan ve klinik olarak en savunulabilir yaklaşımdır. Bu bölümde sınıf ağırlıklandırma ile eşik ayarı birlikte kullanılmış, sentetik yeniden örnekleme bilinçli olarak tercih edilmemiştir.

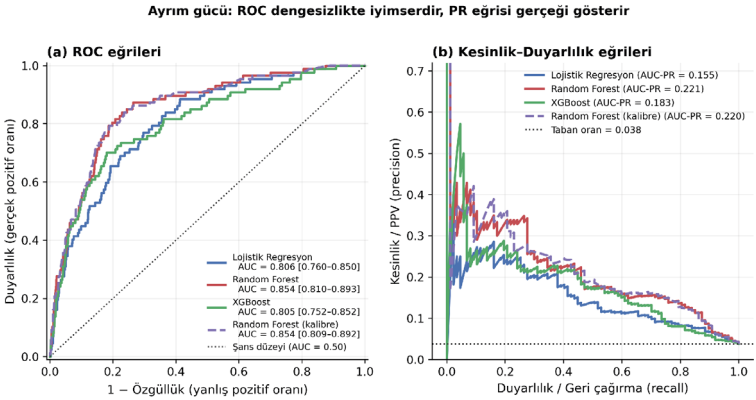
5. Model Değerlendirme: AUC-ROC'un Ötesinde

Bir tahmin modelinin performansı tek bir sayıyla özetlenemez. Değerlendirme üç ayrı soruya yanıt aramaktadır: Model, yaralanacak sporcuları yaralanmayacaklardan ayırt edebiliyor mu (ayrım gücü)? Ürettiği olasılıklar gerçek olay sıklıklarına karşılık geliyor mu (kalibrasyon)? Bu modeli kullanmak, kullanmamaya kıyasla net bir fayda sağlıyor mu (klinik yararlılık)?

5.1 Ayrım Gücü

Random Forest en yüksek ayrım gücüne ulaşmıştır (AUC = 0,854; %95 GA [0,810–0,893]); bu değer, spor yaralanması tahmini literatüründe bildirilen aralığın üst sınırındadır ve simülasyon tasarımının sonucudur — gerçek veride bu düzey beklenmemelidir. Asıl dikkat çekilmesi gereken nokta, ROC ile kesinlik–duyarlılık eğrileri arasındaki uçurumdur: AUC-ROC 0,854 iken AUC-PR yalnızca 0,221'dir (Şekil 2). ROC eğrisi, yanlış pozitif oranını çok büyük olan negatif sınıfa bölmekte; yüzlerce yanlış pozitif bile bu oranı çok az yükselttiğinden eğri

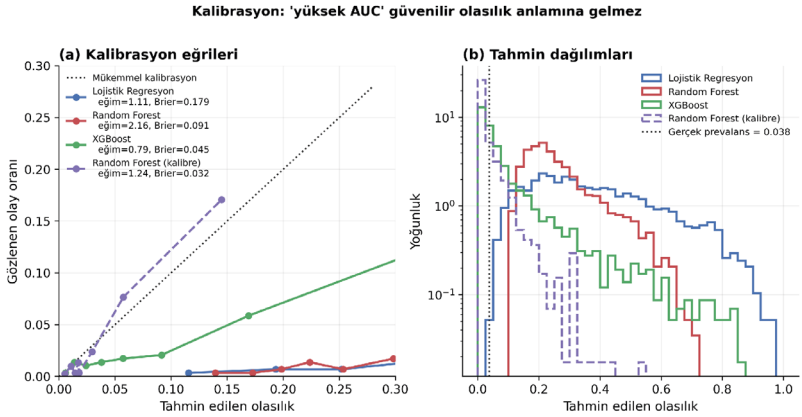
iyimser görünmektedir. Olay prevalansı %10'un altındaki her problemde AUC-ROC tek başına bildirilmemeli; AUC-PR ve taban oran mutlaka birlikte raporlanmalıdır.



Şekil 2. Ayrım gücünün iki yüzü. (a) ROC eğrileri; parantez içindeki değerler 2.000 yinelemeli bootstrap ile hesaplanmış %95 güven aralıklarıdır. (b) Kesinlik–duyarlılık eğrileri.

5.2 Kalibrasyon

Ayrım gücü modelin sıralama yeteneğini ölçmektedir; oysa uygulamada söylenen şey bir sıralama değil bir olasılıktır: "Bu sporcunun önümüzdeki hafta yaralanma olasılığı %12'dir." Bu ifadenin anlamlı olması için modelin kalibre olması gerekmektedir. Ham Random Forest modelinin kalibrasyon eğimi 2,16 (ideal değer 1,00) ve Brier skoru 0,091'dir; sınıf ağırlıklandırması nedeniyle olasılıklar sistematik olarak abartılmaktadır. Aynı model izotonik regresyonla kalibre edildiğinde ayrım gücü değişmemekte (AUC = 0,854), Brier skoru 0,032'ye düşmekte ve kalibrasyon eğimi 1,24'e yaklaşmaktadır (Şekil 3). Van Calster ve arkadaşlarının (2019) ifadesiyle kalibrasyon "kestirimsel analitiğin Aşil topuğudur"; klinik tahmin modelleri literatüründe raporlanması standart hâline gelmişken spor bilimleri yayınlarında hâlâ sistematik olarak ihmal edilmektedir.



Şekil 3. Kalibrasyon değerlendirmesi. (a) Kalibrasyon eğrileri; kesikli çizgi mükemmel kalibrasyonu temsil etmektedir. (b) Tahmin dağılımları (logaritmik ölçek).

5.3 Karar Eşiği ve Klinik Yararlılık

Sürekli olasılığın ikili karara çevrilmesi bir eşik seçimini zorunlu kılmakta ve bu seçim istatistiksel değil değer temelli bir karar olmaktadır: bir kaçırılmış yaralanmanın maliyeti, bir gereksiz uyarınınkine kıyasla kaç kat ağırdır? Youden-J ölçütünün önerdiği 0,050 eşiğinde duyarlılık %79,3 ve özgüllük %81,1'dir; ancak pozitif kestirim değeri (PPV) yalnızca %14,1'dir — model bir sporcuyu "yüksek riskli" işaretlediğinde yedi vakadan yalnızca birinde gerçekten yaralanma meydana gelmektedir. Ayrıca haftada kadronun yaklaşık %21'i uyarı almaktadır; 25 kişilik bir kadroda haftada beş oyuncu. Bu, modelin başarısızlığı değil taban oran etkisinin kaçınılmaz sonucudur ve sporcu sağlığı ekibine baştan açıklanmalıdır. Buna karşılık negatif kestirim değeri %99,0'dır: modelin asıl uygulamalı değeri, sınırlı kaynağın nereye ayrılmayacağını güvenilir biçimde belirlemesindedir.

Ayrım gücü ve kalibrasyon modelin istatistiksel niteliğini tanımlamakta, ancak "bu modeli kullanmak fayda sağlıyor mu?" sorusuna doğrudan yanıt vermemektedir. Vickers ve Elkin'in (2006) geliştirdiği karar eğrisi analizi bu soruyu net

fayda kavramıyla ele almaktadır: Net Fayda = (GP / N) − (YP / N) × [p_t / (1 − p_t)]. Burada p_t, klinisyenin müdahaleye değer bulduğu eşik olasılıktır ve zımnen zarar–fayda dengesini kodlamaktadır. Model eğrisi, yaklaşık %2–20 eşik aralığında hem "herkese müdahale et" hem de "kimseye müdahale etme" stratejilerinin üzerinde seyretmekte; bu aralık, modelin klinik olarak yararlı olduğu bölgeyi tanımlamaktadır.

6. SHAP ile Model Yorumlanabilirliği

Bir sporcu sağlığı ekibi, gerekçesini anlamadığı bir çıktıya dayanarak bir oyuncuyu kadro dışı bırakmayacaktır; dolayısıyla model, "bu sporcu riskli" kadar "neden riskli" sorusuna da yanıt vermelidir. SHAP, kooperatif oyun teorisindeki Shapley değerini makine öğrenmesine uyarlamaktadır (Lundberg ve Lee, 2017): bir gözlem için üretilen tahminin ortalama tahminden sapması, değişkenler arasında adil biçimde paylaştırılmaktadır. Sağladığı temel güvence yerel doğruluktur — $f(x) = \varphi_0 + \Sigma\varphi_i$. Yani tüm SHAP değerlerinin toplamı ile taban değer, modelin o gözlem için ürettiği tahmini tam olarak vermektedir; bu, permütasyon temelli değişken önem ölçütlerinin sunamadığı bir güvencedir. Ağaç tabanlı modellerde TreeSHAP bu değerleri yaklaşıklama yapmadan ve polinom zamanda hesaplamaktadır (Lundberg vd., 2020).

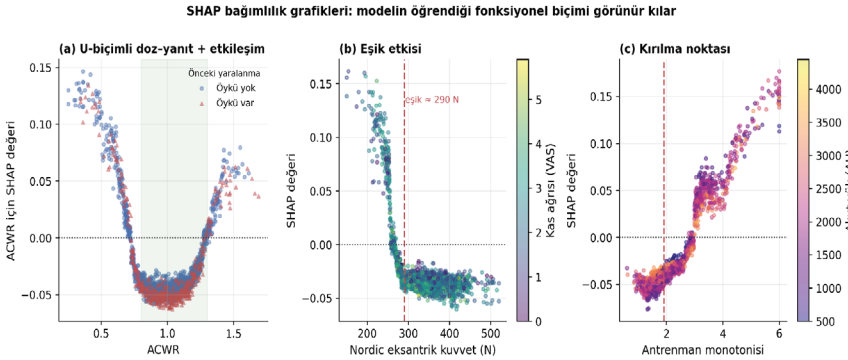
6.1 Küresel Yorumlama

Küresel önem sıralaması, üretim modelinde kurulan yapıyı büyük ölçüde geri kazanmıştır: ilk beş sırada monotoni, ACWR, Nordic eksantrik kuvvet, zorlanma ve önceki yaralanma öyküsü yer almakta; üretim modelinde etkisi tanımlanmamış değişkenler (BKİ, boy, H:Q oranı, mevki) sıralamanın altında kalmaktadır. Bu doğrulama önemlidir: gerçek veride "doğru cevap" bilinmediğinden bir yorumlanabilirlik yönteminin isabetliliği doğrudan sınanamaz; simülasyon tasarımı bu sınamayı mümkün kılmaktadır. Ancak ortalama mutlak SHAP değeri bir önem ölçütüdür, bir etki büyüklüğü değil;

yüksek değişkenliğe sahip bir değişken zayıf bir ilişkiye rağmen üst sıralara çıkabilmektedir. Sıralama, bağımlılık grafikleriyle birlikte yorumlanmalıdır.

6.2 Fonksiyonel Biçimin Ortaya Çıkarılması

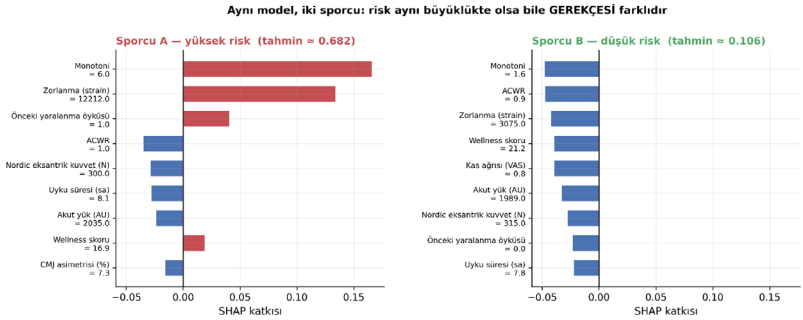
Şekil 4, bölümün en önemli metodolojik gösterimidir; üç panelin her biri, üretim modelinde kurulan bir yapının model tarafından bağımsız olarak öğrenildiğini kanıtlamaktadır. Panel (a): ACWR'nin SHAP değeri 0,80–1,30 aralığında negatif (koruyucu), her iki uçta pozitiftir. Bu, ham veride grup ortalaması karşılaştırmasıyla görünmeyen bir yapıdır — yaralanan ve yaralanmayan gruplarda ortalama ACWR neredeyse özdeştir (0,96'ya karşı 0,98); simetrik U-biçimli bir ilişkide grup ortalamaları birbirini götürdüğünden t-testi ya da doğrusal lojistik regresyon bu ilişkiyi tespit edememektedir. Ayrıca yüksek ACWR bölgesinde yaralanma öyküsü olan sporcular daha yüksek SHAP değerleri almakta; üretim modeline yerleştirilen etkileşim geri kazanılmaktadır. Panel (b): Nordic eksantrik kuvvetin SHAP değeri yaklaşık 290 N'a kadar keskin biçimde düşmekte, sonrasında düzleşmektedir — 290 N civarındaki bir sporcu için kuvvet artışı yüksek getirili bir müdahale iken, 400 N üzerindeki bir sporcuda marjinal etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Panel (c): monotoninin SHAP değeri yaklaşık 1,9'a kadar düz seyretmekte, sonrasında doğrusal olarak yükselmektedir. Aynı ilişkileri doğrusal bir modelle yakalamak, spline, karesel ve etkileşim terimlerinin önceden doğru biçimde tanımlanmasını gerektirirdi.



Şekil 4. SHAP bağımlılık grafikleri. (a) ACWR için U-biçimli doz–yanıt ve yaralanma öyküsüyle etkileşim. (b) Nordic eksantrik kuvvet için ≈290 N'da eşik etkisi. (c) Monotoni için ≈1,9'da kırılma noktası.

6.3 Bireysel Yorumlama ve Sınırlar

Şelale (waterfall) grafiği, tek bir sporcu-hafta gözlemi için tahminin taban değerden başlayarak nasıl oluştuğunu adım adım göstermekte ve sporcuyla yapılacak görüşmede doğrudan kullanılabilecek düzeyde şeffaflık sunmaktadır. Uygulamalı açıdan en öğretici gösterim ise iki sporcunun karşılaştırılmasıdır (Şekil 5): aynı model benzer büyüklükte risk üretebilmekte, ancak riskin bileşimi tümüyle farklı olabilmektedir — birinde belirleyici olan yük yapısı (yüksek monotoni, ACWR sapması), diğerinde nöromusküler kapasitedir (düşük Nordic kuvvet, yüksek asimetri). Bu iki sporcuya aynı müdahalenin uygulanması kaynak israfı anlamına gelmektedir. Yorumlanabilir yapay zekânın spor bilimlerine sunduğu asıl katkı buradadır: risk sıralaması değil, müdahalenin bireyselleştirilmesi.



Şekil 5. İki sporcunun karşılaştırmalı risk profili. Kırmızı çubuklar riski artıran, mavi çubuklar azaltan katkıları göstermektedir.

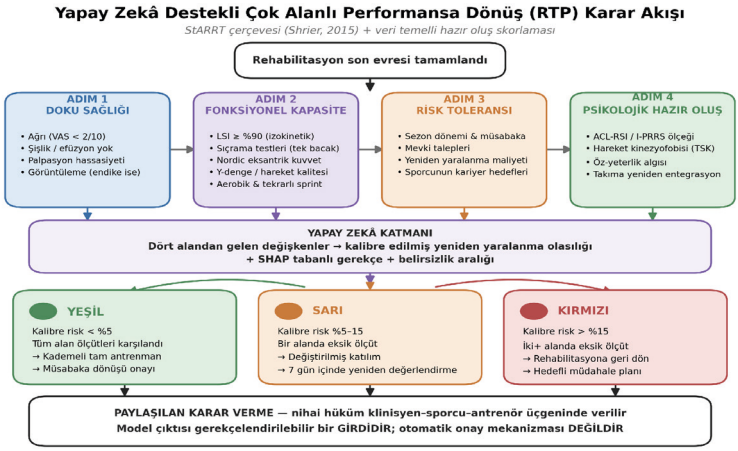
SHAP'ın sınırları açıkça bilinmelidir. SHAP nedensellik göstermez; modelin öğrendiği ilişki bir karıştırıcı değişken üzerinden kuruluyorsa, SHAP bu ilişkiyi sadakatle raporlayacaktır. Birbiriyle yüksek korelasyonlu değişkenler (akut yük, zorlanma, yüksek hızlı koşu mesafesi) ortak katkıyı paylaştığından bireysel önemleri düşük görünebilmekte; bu durumda değişken grupları düzeyinde yorumlama tercih edilmelidir. SHAP değerleri nokta tahminleridir ve kestirim aralığı sunmaz; belirsizlik için bootstrap ya da konformal tahmin gerekmektedir. Son olarak iki farklı model aynı veriye farklı SHAP profilleri üretebilir: SHAP modeli açıklar, olguyu değil.

7. Rehabilitasyon ve Performansa Dönüş Süreçleri

Zaman temelli protokollerden kriter temelli protokollere geçiş, son yirmi yılın en önemli kavramsal kazanımlarından biridir; Grindem ve arkadaşları (2016), ön çapraz bağ rekonstrüksiyonu sonrası dönüşün dokuzuncu aydan önce gerçekleşmesinin ve kuvvet simetrisi ölçütlerinin karşılanmamasının yeniden yaralanma riskini belirgin biçimde artırdığını göstermiştir. Yapay zekânın bu alandaki katkısı üç başlıkta toplanmaktadır: yörünge modellemesi (benzer profildeki sporcuların geçmiş yörüngeleriyle karşılaştırma yoluyla "beklenenden yavaş" seyreden vakaların erken tespiti), yük uyarlaması (rehabilitasyon dozunun günlük hazır oluş göstergelerine göre

ayarlanması) ve ev programına uyumun giyilebilir sensörlerle nesnel izlenmesi.

Performansa dönüş kararı tek bir teste indirgenemez. Ardern ve arkadaşlarının (2016) Bern uzlaşı bildirisi, dönüşün bir olay değil bir süreklilik olduğunu ve "spora dönüş", "performansa dönüş" ve "müsabakaya dönüş" aşamalarından oluştuğunu vurgulamış; Shrier'in (2015) StARRT çerçevesi ise kararı doku sağlığı, doku üzerindeki stresler ve risk toleransını belirleyen bağlamsal faktörler olmak üzere üç adımda yapılandırmıştır. Şekil 6, bu çerçeveye psikolojik hazır oluş alanını ekleyerek dört alanlı bir karar akışı önermektedir. Psikolojik hazır oluşun bağımsız bir alan olarak ele alınması gereklidir: Ardern ve arkadaşlarının (2013) meta-analizi, spora dönüşü fiziksel iyileşmeden bağımsız olarak hareket korkusu, öz-yeterlik ve dönüş motivasyonunun yordadığını göstermiştir. Bununla birlikte psikolojik hazır oluş yalnızca hareket korkusu ve dönüş motivasyonuyla sınırlı değerlendirilmemelidir. Mental dayanıklılık ve problem çözme becerileri de sporcunun zorlu koşullara uyum sağlama ve performansla ilişkili karar süreçlerini yönetme kapasitesinin önemli bileşenleridir. Fiziksel engelli sporcular üzerinde gerçekleştirilen bir araştırmada mental dayanıklılık ile problem çözme becerileri arasında pozitif bir ilişki belirlenmiş ve mental dayanıklılığın problem çözme becerileri üzerinde anlamlı bir yordayıcı role sahip olduğu gösterilmiştir (Şahinler & Ersoy, 2025).



Şekil 6. Yapay zekâ destekli çok alanlı performansa dönüş karar akışı. Karar yetkisi paylaşılan karar verme sürecinde kalmaktadır.

Yapay zekâ katmanının konumu bilinçli olarak seçilmiştir: dört alandan gelen bilgiyi birleştirmekte, ancak karar yetkisini üstlenmemektedir. Model çıktısı üç bileşenden oluşmalıdır: kalibre edilmiş yeniden yaralanma olasılığı, bu tahminin belirsizlik aralığı ve hangi alanın hangi yönde katkı yaptığını gösteren SHAP tabanlı gerekçe. Belirsizliğin raporlanması özellikle önemlidir; RTP örneklemleri küçük olduğundan tahminler geniş güven aralıklarına sahiptir ve "%12 risk" ile "%12 risk (%95 GA: %4–%31)" klinik karar açısından tümüyle farklı bilgiler taşımaktadır. Belirsizliğin gizlenmesi sahte kesinlik üretmekte ve klinik muhakemeyi zayıflatabilmektedir.

8. Yapay Zekâ Prompt Mühendisliği: Araştırma İş Akışında Büyük Dil Modelleri

Büyük dil modelleri (large language models, LLM) spor bilimleri araştırmacısının iş akışına hızla yerleşmiştir: kod yazımı, veri temizleme, istatistiksel analiz taslağı, literatür sentezi, metin düzenleme ve hakem yanıtı hazırlama. Bu araçların verimliliği büyük ölçüde kullanıcının talimat kurma becerisine bağlıdır. Kaya ve arkadaşları (2026), spor yaralanması

bakımına ilişkin standart klinik senaryolarda GPT-4o ve GPT-5 çıktılarını ortopedi uzmanlarına değerlendirtmiş; daha yeni modelin belirgin biçimde daha yüksek puan aldığını ve her iki modelin de yüksek tutarlılık gösterdiğini, ancak bu araçların uzman gözetiminde tamamlayıcı karar destek aracı olarak konumlandırılması gerektiğini bildirmiştir.

Akademik kullanımda tekrar tekrar sınanmış yapılandırılmış prompt mimarisi yedi katmandan oluşmaktadır: (1) rol ve uzmanlık tanımı; (2) bağlam ve veri tanımı; (3) görevin açık ve tek anlamlı ifadesi; (4) müzakereye kapalı yöntemsel kısıtlar (örneğin sporcu düzeyinde bölünme zorunluluğu); (5) çıktı biçimi; (6) doğrulama ve sınır talimatları; (7) yineleme. Katmanlar toplamsaldır ve akademik bağlamda altıncı ile yedinci katmanlar vazgeçilmezdir. Sık karşılaşılan hata örüntüleri muğlak görev tanımı, yöntemsel kararların modele bırakılması, nedensel dil talep edilmesi ve doğrulanmamış atıfların kabulüdür.

Büyük dil modellerinin en ciddi riski, güvenle sunulan hatalı bilgidir. Bu bölümün hazırlanmasında da uygulanan doğrulama protokolü şudur: (i) hiçbir atıf, DOI üzerinden yayıncı sitesinde ya da PubMed'de doğrulanmadan kullanılmaz; (ii) hiçbir sayı elle aktarılmaz, tüm değerler analiz kodunun çıktısından programatik olarak üretilir; (iii) hiçbir kod çalıştırılmadan yayımlanmaz; (iv) yöntemsel iddialar birincil kaynaktan doğrulanır; (v) son okuma insana aittir. Bir görevin yapay zekâya devredilip devredilemeyeceğini belirleyen ölçüt teknik değil etiktir: hatanın sporcu üzerindeki sonucunun geri döndürülebilirliği. Hatalı biçimlendirilmiş bir tablo düzeltilebilir; hatalı bir performansa dönüş onayıyla sakatlanan bir sporcunun kariyeri düzeltilemez. ICMJE ve büyük yayıncıların politikaları da büyük dil modellerinin yazar olarak gösterilemeyeceğini, kullanımlarının yöntem bölümünde açıkça bildirilmesi gerektiğini ve tüm sorumluluğun insan yazarlara ait olduğunu belirtmektedir.

9. Etik, Mahremiyet ve Yönetişim

Sporcu sağlığı verisi hem özel nitelikli kişisel veri hem de yüksek ticari değer taşıyan bir varlıktır ve bu ikili nitelik özgül gerilimler yaratmaktadır. İş sözleşmesinin bir parçası olarak verilen izleme onayı, reddetme hâlinde kadro dışı kalma riski varsa gerçek anlamda özgür bir rıza mıdır? Türkiye'de 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu ve Avrupa Birliği Genel Veri Koruma Tüzüğü (GDPR), sağlık verisini özel nitelikli veri kategorisinde ele almakta ve açık rıza ile amaçla sınırlılık ilkelerini zorunlu kılmaktadır. Sporcu kulüp değiştirdiğinde izleme verisi çoğunlukla kulüpte kalmakta ve sporcu kendi fizyolojik geçmişine erişememektedir; GDPR'ın veri taşınabilirliği hakkı bu konuda dayanak sunmaktadır. Yaralanma riski amacıyla toplanan verinin sözleşme görüşmelerinde, transfer değerlemesinde ya da sigorta primlerinin belirlenmesinde kullanılması, amaçla sınırlılık ilkesinin açık ihlalidir.

Algoritmik önyargı üç kaynaktan doğmaktadır. Temsil önyargısı: yaralanma tahmin modellerinin ezici çoğunluğu erkek, profesyonel ve Avrupa/Kuzey Amerika kökenli kohortlarda geliştirilmiştir; farklı anatomik ve hormonal profiller ile farklı yaralanma epidemiyolojisi göz önüne alındığında, erkek kohortunda geliştirilmiş bir modelin kadın sporculara doğrudan uygulanması yöntemsel olarak savunulamaz. Ölçüm önyargısı: sonuç değişkeni "tıbbi kayda geçmiş yaralanma"dır; kadro dışı kalma kaygısı taşıyan sporcular şikâyetlerini gizleyebildiğinden model, yaralanma riskini değil bildirim davranışını öğrenebilmektedir. Geri besleme döngüsü: model bir sporcuyu yüksek riskli işaretler, yükü azaltılır ve yaralanma gerçekleşmezse, gözlem sonraki eğitim verisine "negatif" olarak girmekte ve model kendi başarısını sistematik olarak kendi aleyhine kanıta dönüştürmektedir.

Collins ve arkadaşlarının (2024) TRIPOD+AI bildirisi, regresyon ya da makine öğrenmesi kullanan klinik tahmin modellerinin raporlanması için güncellenmiş bir kontrol listesi sunmaktadır. Asgari raporlama gereklilikleri şunlardır: veri kaynağı ve zaman aralığı; sonuç değişkeninin tam tanımı;

eksik veri stratejisi; grup yapısı dâhil bölünme yöntemi; tüm hiperparametreler; ayrım ve kalibrasyon ölçütlerinin birlikte bildirilmesi; belirsizlik tahminleri ve modele erişim koşulları.

10. Sınırlılıklar ve Gelecek Yönelimler

Bu bölümde sunulan uygulamalı örneğin sınırlılıkları açıkça belirtilmelidir. Veri simüle edilmiştir; performans değerleri hiçbir gerçek popülasyona genellenemez. Üretim modeli araştırmacı tarafından tanımlandığından, modelin bu yapıyı geri kazanması beklenen bir sonuçtur ve gerçek veride karşılaşılacak gürültü düzeyini yansıtmamaktadır. Olay/değişken oranı 11,6'dır; bu, tahmin modellemesi için önerilen alt sınırlara yakın ancak kararlı katsayı tahmini için ideal olmayan bir düzeydir (Riley vd., 2020). Dış geçerleme yapılmamıştır.

Alandaki gelecek yönelimler açısından dört başlık öne çıkmaktadır. Federatif öğrenme, ham veriyi paylaşmadan model parametrelerinin paylaşılmasına dayanarak kulüpler arası örneklem kısıtını aşma potansiyeli taşımaktadır. Nedensel makine öğrenmesi, "hangi sporcu risklidir" sorusundan "hangi müdahale bu sporcuda işe yarar" sorusuna geçişi mümkün kılmaktadır; alan için asıl dönüşüm buradadır. Zaman serisi derin öğrenme yöntemleri yükleme geçmişinin zamansal örüntüsünü özet istatistiklere indirgemeden modelleyebilmekte, ancak veri gereksinimleri mevcut kohort büyüklüklerinin üzerinde kalmaktadır. Etki çalışmaları ise alandaki en büyük boşluktur: yayımlanmış modellerin neredeyse hiçbiri, uygulamaya alındığında yaralanma insidansını gerçekten düşürüp düşürmediği açısından prospektif olarak sınanmamıştır. Bir modelin AUC değeri değil, sahadaki etkisi nihai geçerlik ölçütüdür.

11. Sonuç

Bu bölümde, yaralanma önleme, rehabilitasyon ve performansa dönüş süreçlerinin bütünleşik bir yapay zekâ çerçevesinde nasıl ele alınabileceği uygulamalı bir örnek üzerinden

gösterilmiştir. Beş temel çıkarım öne çıkmaktadır. Birincisi, ayrım gücü tek başına yeterli değildir; AUC-ROC 0,854 olan bir model %14 pozitif kestirim değeriyle çalışabilmektedir ve kalibrasyon ile klinik yararlılık ayrı ayrı değerlendirilmelidir. İkincisi, yöntemsel titizlik performanstan önce gelir: sporcu düzeyinde bölünme, sızıntı denetimi ve dengesizliğin kalibrasyonu bozmayacak biçimde yönetilmesi, model seçiminden daha belirleyicidir. Üçüncüsü, yorumlanabilirlik uygulamanın ön koşuludur; SHAP, modelin öğrendiği doğrusal olmayan yapıları görünür kılarak risk sıralamasından müdahalenin bireyselleştirilmesine geçişi mümkün kılmaktadır — ancak yorumlanabilirlik nedensellik değildir. Dördüncüsü, taban oran gerçekliği baştan paylaşılmalıdır: seyrek olayların tahmininde yüksek PPV matematiksel olarak mümkün değildir ve modelin değeri çoğunlukla yüksek NPV'sinde, yani kaynağın nereye ayrılmayacağını belirlemesindedir. Beşincisi, karar yetkisi devredilemez; yapay zekâ, sporcu sağlığı ekibinin muhakemesini yapılandıran, gerekçelendiren ve belgeleyen bir araçtır ve sporcuya ilişkin nihai hüküm, sorumluluğu üstlenebilecek olan insana aittir.

Kaynakça

Ardern, C. L., Glasgow, P., Schneiders, A., Witvrouw, E., Clarsen, B., Cools, A., Gojanovic, B., Griffin, S., Khan, K. M., Moksnes, H., Mutch, S. A., Phillips, N., Reurink, G., Sadler, R., Silbernagel, K. G., Thorborg, K., Wangensteen, A., Wilk, K. E., & Bizzini, M. (2016). 2016 consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *British Journal of Sports Medicine, 50*(14), 853–864. https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096278

Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (2013). A systematic review of the psychological factors associated with returning to sport following injury. *British Journal of Sports Medicine, 47*(17), 1120–1126. https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091203

Bittencourt, N. F. N., Meeuwisse, W. H., Mendonça, L. D., Nettel-Aguirre, A., Ocarino, J. M., & Fonseca, S. T. (2016). Complex systems approach for sports injuries: Moving from risk factor identification to injury pattern recognition—Narrative review and new concept. *British Journal of Sports Medicine, 50*(21), 1309–1314. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095850

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Bullock, G. S., Hughes, T., Arundale, A. H., Ward, P., Collins, G. S., & Kluzek, S. (2022). Black box prediction methods in sports medicine deserve a red card for reckless practice: A change of tactics is needed to advance athlete care. *Sports Medicine, 52*(8), 1729–1735. https://doi.org/10.1007/s40279-022-01655-6

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

Collins, G. S., Moons, K. G. M., Dhiman, P., Riley, R. D., Beam, A. L., Van Calster, B., Ghassemi, M., Liu, X., Reitsma, J. B., van Smeden, M., Boulesteix, A.-L., Camaradou, J. C., Celi, L. A., Denaxas, S., Denniston, A. K., Glocker, B., Golub, R. M., Harvey, H., Heinze, G., ... Logullo, P. (2024). TRIPOD+AI statement: Updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning metho-

ds. *BMJ, 385,* e078378. https://doi.org/10.1136/bmj-2023-078378

Grindem, H., Snyder-Mackler, L., Moksnes, H., Engebretsen, L., & Risberg, M. A. (2016). Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: The Delaware-Oslo ACL cohort study. *British Journal of Sports Medicine, 50*(13), 804–808. https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096031

Impellizzeri, F. M., Tenan, M. S., Kempton, T., Novak, A., & Coutts, A. J. (2020). Acute:Chronic workload ratio: Conceptual issues and fundamental pitfalls. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 15*(6), 907–913. https://doi.org/10.1123/ijspp.2019-0864

Kaya, O., Huri, G., Özbek, E. A., Gönder, N., Demir, İ. H., & Dalkır, K. A. (2026). Large language models in sports injury care: A comparative expert evaluation of GPT-4o and GPT-5. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 18*, 232. https://doi.org/10.1186/s13102-026-01675-z

Leckey, C., van Dyk, N., Doherty, C., Lawlor, A., & Delahunt, E. (2025). Machine learning approaches to injury risk prediction in sport: A scoping review with evidence synthesis. *British Journal of Sports Medicine, 59*(7), 491–500. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108576

Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems, 30* (pp. 4765–4774).

Lundberg, S. M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J. M., Nair, B., Katz, R., Himmelfarb, J., Bansal, N., & Lee, S.-I. (2020). From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature Machine Intelligence, 2*(1), 56–67. https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9

Meeuwisse, W. H., Tyreman, H., Hagel, B., & Emery, C. (2007). A dynamic model of etiology in sport injury: The recursive nature of risk and causation. *Clinical Journal of Sport Medicine, 17*(3), 215–219. https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3180592a48

Riley, R. D., Ensor, J., Snell, K. I. E., Harrell, F. E., Martin, G. P., Reitsma, J. B., Moons, K. G. M., Collins, G., & van Smeden, M. (2020). Calculating the sample size required for developing a clinical prediction model. *BMJ, 368*, m441. https://doi.org/10.1136/bmj.m441

Rossi, A., Pappalardo, L., Cintia, P., Iaia, F. M., Fernández, J., & Medina, D. (2018). Effective injury forecasting in soccer with GPS training data and machine learning. *PLOS ONE, 13*(7), e0201264. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201264

Shahinler, Y., & Ersoy, A. (2025). Mental toughness and problem-solving skills from a psychological perspective: A study on physically disabled athletes. *Palaestra, 39*(3).

Shmueli, G. (2010). To explain or to predict? *Statistical Science, 25*(3), 289–310. https://doi.org/10.1214/10-STS330

Shrier, I. (2015). Strategic assessment of risk and risk tolerance (StAR-RT) framework for return-to-play decision-making. *British Journal of Sports Medicine, 49*(20), 1311–1315. https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094569

Van Calster, B., McLernon, D. J., van Smeden, M., Wynants, L., & Steyerberg, E. W. (2019). Calibration: The Achilles heel of predictive analytics. *BMC Medicine, 17*, 230. https://doi.org/10.1186/s12916-019-1466-7

van den Goorbergh, R., van Smeden, M., Timmerman, D., & Van Calster, B. (2022). The harm of class imbalance corrections for risk prediction models: Illustration and simulation using logistic regression. *Journal of the American Medical Informatics Association, 29*(9), 1525–1534. https://doi.org/10.1093/jamia/ocac093

Van Eetvelde, H., Mendonça, L. D., Ley, C., Seil, R., & Tischer, T. (2021). Machine learning methods in sport injury prediction and prevention: A systematic review. *Journal of Experimental Orthopaedics, 8*, 27. https://doi.org/10.1186/s40634-021-00346-x

Vickers, A. J., & Elkin, E. B. (2006). Decision curve analysis: A novel method for evaluating prediction models. *Medical Decision Making, 26*(6), 565–574. https://doi.org/10.1177/0272989X06295361

Williams, S., West, S., Cross, M. J., & Stokes, K. A. (2017). Better way to determine the acute:Chronic workload ratio? *British Journal of Sports Medicine, 51*(3), 209–210. https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096589

2. BÖLÜM

Dijital Sağlık ve Akıllı Spor Sistemleri

Kavramsal Çerçeve, Uygulama Alanları Ve Eleştirel Değerlendirme

İrfan KARA[1], Mehmet BEYAZ[2]

1 İstanbul Gelişim Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, , irkara@gelisim.edu.tr ORCID: 0009-0002-0667-763X

2 İstanbul Gelişim Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, mbeyaz@gelisim.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6778-6253

1. Giriş

Spor bilimleri, kuruluşundan bu yana ölçmeye dayalı bir alan olmuştur; ancak ölçümün yeri, sıklığı ve kapsamı son yirmi yılda köklü biçimde değişmiştir. Laboratuvar koşullarında, yılda birkaç kez ve sınırlı sayıda sporcu üzerinde yapılan testlerin yerini, sahada, her antrenman biriminde ve tüm kadro genelinde kesintisiz veri üreten sistemler almıştır. Bu dönüşümün arkasında üç eşzamanlı gelişme bulunmaktadır: sensör teknolojilerinin küçülmesi ve ucuzlaması, kablosuz iletişim ile bulut altyapılarının yaygınlaşması ve büyük veri kümelerinden örüntü çıkarabilen istatistiksel öğrenme yöntemlerinin erişilebilir hâle gelmesi.

Bu gelişmeler spor bilimlerine özgü değildir. Aynı teknolojik altyapı, sağlık hizmetlerinin sunumunda da benzer bir dönüşüm yaratmış ve "dijital sağlık" kavramı altında kurumsallaşmıştır. Dünya Sağlık Örgütü, 2020–2025 Küresel Dijital Sağlık Stratejisi ile dijital sağlığı bir teknoloji koleksiyonu olarak değil, sağlık sistemlerinin bütünsel bir dönüşüm alanı olarak tanımlamış ve üye ülkeleri ulusal dijital sağlık stratejileri geliştirmeye çağırmıştır (World Health Organization [WHO], 2025). Bu tanım, sporcu izleme sistemlerini, egzersiz

uygulamalarını ve telerehabilitasyon hizmetlerini aynı kavramsal çatı altında düşünmeyi mümkün kılar.

Bununla birlikte, alanyazında sıkça gözlenen bir yanılgı, veri üretme kapasitesi ile karar üretme kapasitesinin özdeşleştirilmesidir. Bir kulüp, kadrosundaki her sporcudan günde milyonlarca veri noktası toplayabilir; ancak bu verinin hangi kısmının geçerli olduğu, hangi göstergenin hangi kararı desteklediği ve o kararın sporcu sağlığı üzerinde ölçülebilir bir fark yaratıp yaratmadığı ayrı sorulardır. Nitekim yaralanma riskinin kestirimine yönelik makine öğrenmesi çalışmalarının sistematik değerlendirmeleri, istatistiksel başarımın yüksek olduğu durumlarda dahi klinik yararın çoğunlukla gösterilemediğini ortaya koymaktadır (Leckey vd., 2025).

Bu bölümün amacı, dijital sağlık ile akıllı spor sistemlerini ortak bir kavramsal çerçevede ele almak, bu sistemlerin bileşenlerini katmanlı bir mimari üzerinden çözümlemek ve her katmanın sunduğu olanaklarla birlikte sınırlılıklarını güncel kanıtlar ışığında tartışmaktır. Bölüm, teknolojiyi ne yücelten ne de reddeden; ölçüm geçerliğini, karar bağlamını ve etik yönetişimi merkeze alan eleştirel bir bakış açısı benimsemektedir.

2. Kavramsal Çerçeve: Dijital Sağlıktan Akıllı Spor Sistemlerine

2.1. Dijital Sağlığın Kapsamı

Dijital sağlık, elektronik sağlık kayıtlarından telesağlık hizmetlerine, mobil sağlık (mHealth) uygulamalarından yapay zekâ temelli karar destek sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesini kapsar. Kavramın ayırt edici özelliği, teknolojiyi bir araç olarak değil, sağlık hizmetinin sunum biçimini yeniden yapılandıran bir bileşen olarak konumlandırmasıdır (WHO, 2021). Bu bakış açısı spor bilimleri açısından üç açıdan önemlidir. Birincisi, sporcu izleme verilerinin bir tür sağlık verisi olduğunu ve buna uygun hukuki korumayı gerektirdiğini görünür kılar. İkincisi, elit spordaki uygulamalar ile toplum

sağlığına yönelik fiziksel aktivite müdahalelerini aynı yöntemsel standartlara tabi tutar. Üçüncüsü, sürdürülebilirlik ve ölçeklenebilirlik gibi sağlık sistemi ölçütlerini spor teknolojilerinin değerlendirilmesine dâhil eder.

2.2. Akıllı Spor Sistemi: Tanım ve Katmanlı Mimari

Akıllı spor sistemi, sporcu ya da katılımcıdan elde edilen çok kaynaklı veriyi toplayan, ileten, işleyen ve bir karara bağlayan; ürettiği kararın etkisini yeniden ölçerek kendini güncelleyen bütünleşik bir yapıdır. Bu tanımdaki kritik unsur "geri bildirim döngüsü"dür: veri toplamayan bir karar mekanizması gibi, karara bağlanmayan bir veri akışı da sistemi akıllı kılmaz. Akıllı spor teknolojilerinin etkili biçimde kullanılabilmesi, yalnızca teknolojik altyapının gelişmişliğine değil, sporcuların bu sistemlere yönelik tutumlarına da bağlıdır. Kara ve arkadaşları (2026), sporcuların akıllı spor teknolojileri ve yapay zekâya yönelik tutumlarını bilişsel, duyuşsal ve davranışsal boyutlarda incelemiş ve bu teknolojilerin benimsenmesinin çok boyutlu bir yapı gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda akıllı spor sistemlerinin tasarım ve uygulama süreçlerinde teknik performansın yanı sıra kullanıcıların teknolojiye ilişkin algı, duygu ve davranışsal eğilimlerinin de dikkate alınması önem taşımaktadır (Kara et al., 2026). Şekil 1, bu yapıyı beş katmanlı bir mimari üzerinden özetlemektedir.



Şekil 1. Akıllı spor sisteminin beş katmanlı mimarisi ve katmanlar arası geri bildirim döngüsü.

Katmanlı yaklaşımın uygulamadaki değeri, bir sistemin nerede aksadığını tanımlamayı kolaylaştırmasıdır. Örneğin sahaya dönüş kararlarının tutarsız olduğu bir kulüpte sorun, çoğu zaman sensör kalitesinde (Katman 1) değil, ölçümlerin karara nasıl tercüme edildiğinde (Katman 4) ya da farklı birimlerin verilerinin birbiriyle konuşamamasında (Katman 2) yatmaktadır. Tablo 1, her katmanın işlevini, tipik bileşenlerini ve o katmana özgü başarısızlık biçimlerini özetlemektedir.

Tablo 1. Akıllı spor sistemi katmanlarının işlevleri ve tipik başarısızlık biçimleri

Katman	Temel işlev	Tipik bileşenler	Tipik başarısızlık biçimi
1. Algılama	Sporcudan ham verinin elde edilmesi	GNSS–IMU, kalp hızı bandı, kuvvet platformu, kamera, ölçek	Ölçüm geçerliğinin bağlama uygun doğrulanmaması
2. İletim ve depolama	Verinin güvenli biçimde taşınması ve saklanması	Bluetooth, 5G, bulut, veri gölü, API	Sistemler arası birlikte çalışamama, veri siloları
3. Analitik	Verinin göstergeye ve kestirime dönüştürülmesi	Tanımlayıcı istatistik, makine öğrenmesi, açıklanabilirlik yöntemleri	Aşırı uyum, dış geçerlik testinin yapılmaması
4. Karar	Göstergenin uygulamaya bağlanması	Yük ayarlama, toparlanma, rehabilitasyon protokolleri	Çıktının klinik ya da antrenman kararına tercüme edilememesi
5. Yönetişim	Hukuki ve etik uygunluğun sağlanması	Onam, veri sahipliği, saklama süresi, risk sınıflandırması	Sporcunun veri üzerindeki denetiminin kaybolması

3. Algılama Katmanı: Sporcu İzleme Teknolojileri

3.1. Dış Yükün İzlenmesi

Takım sporlarında dış yük izleme, küresel navigasyon uydu sistemleri (GNSS) ile ataletsel ölçüm birimlerini (IMU) birleştiren giyilebilir mikroteknoloji cihazlarına dayanır. Bu cihazlar toplam mesafe, hız bölgelerinde kat edilen mesafe, ivmelenme–yavaşlama sayısı ve çarpışma gibi değişkenleri üretir. Ancak geçerlik ve güvenirlik, cihazın markası ve modeli, örnekleme frekansı, hareketin türü ve şiddeti gibi çok sayıda etkene bağlı olarak değişmektedir; kısa mesafeli ve yüksek şiddetli hareketlerde hata payı belirgin biçimde artmaktadır (Crang vd., 2021). Bu nedenle farklı markalardaki cihazlarla toplanan verilerin doğrudan karşılaştırılması ya da sezon içinde cihaz değiştirilmesi, yöntemsel açıdan ciddi bir kısıtlılık oluşturur.

3.2. İç Yük ve Otonom Sinir Sistemi Göstergeleri

Dış yükün organizmada yarattığı fizyolojik ve algısal karşılık iç yük olarak adlandırılır. Algılanan zorluk derecesine dayalı seans-RPE yöntemi, düşük maliyeti ve uygulanabilirliği nedeniyle hâlâ en yaygın kullanılan araçtır (Foster vd., 2001; Halson, 2014). Nesnel göstergeler arasında ise kalp hızı değişkenliği (KHD) öne çıkmaktadır. KHD temelli antrenman yönetimi, günlük ölçümlere göre yüklenmenin bireyselleştirilmesini öngörür. Meta-analitik kanıtlar, KHD rehberliğinde planlanan programların önceden belirlenmiş programlara kıyasla aerobik uygunluk ve dayanıklılık performansında küçük ancak anlamlı üstünlük sağlayabileceğini; buna karşılık bu üstünlüğün ölçüm protokolüne, kullanılan indekse ve karar kurallarına önemli ölçüde bağımlı olduğunu göstermektedir (Manresa-Rocamora vd., 2021).

3.3. Uyku ve Toparlanma İzleme

Uyku, sporcu toparlanmasının en güçlü belirleyicilerinden biridir ve tüketici sınıfı giyilebilir cihazların en çok pazarlanan işlevlerinden birini oluşturur. Polisomnografi ile karşılaştırmalı doğrulama çalışmaları, bu cihazların uyku–uyanıklık ayrımında araştırma amaçlı aktigrafi ile karşılaştırılabilir, hatta bazı modellerde daha iyi bir başarım gösterdiğini; buna karşılık uyku evrelerinin belirlenmesinde tutarsız kaldığını ve bozulmuş uyku gecelerinde başarımın belirgin biçimde düştüğünü ortaya koymaktadır (Chinoy vd., 2021). Uygulamaya yönelik çıkarım nettir: bu cihazlar toplam uyku süresindeki eğilimleri izlemek için kullanılabilir, ancak "derin uyku yüzdesi" gibi evre temelli çıktılar üzerinden bireysel müdahale kararı verilmesi kanıt temelinden yoksundur.

3.4. Biyomekanik Değerlendirme ve Markersız Hareket Analizi

Bilgisayarlı görü ve derin öğrenme temelli markersız hareket analizi, laboratuvara bağımlılığı azaltarak biyomekanik değerlendirmeyi saha koşullarına taşımaktadır. Sistematik derleme bulguları, markersız sistemlerin özellikle sagittal düzlemdeki alt ekstremite kinematiği ve sıçrama–iniş görevlerinde orta ile yüksek düzeyde geçerlik sergilediğini; buna karşılık frontal düzlem ölçümlerinde ve tek bacak üzerindeki karmaşık görevlerde doğruluğun azaldığını göstermektedir (Chougule vd., 2026). Kuvvet platformları ise sıçrama testleri aracılığıyla nöromusküler yorgunluğun izlenmesinde ve rehabilitasyon sürecinin nesnelleştirilmesinde giderek daha merkezî bir rol üstlenmektedir (Rebelo vd., 2023). Tablo 2, izleme alanlarına göre başlıca teknolojileri ve geçerlik durumlarını özetlemektedir.

Tablo 2. İzleme alanlarına göre teknolojiler, başlıca göstergeler ve geçerlik durumu

İzleme alanı	Teknoloji	Başlıca göstergeler	Geçerlik durumu ve uyarı
Dış yük	GNSS + IMU mikroteknoloji	Toplam mesafe, hız bölgeleri, ivmelenme sayısı	Değişkene ve şiddete bağlı; markalar arası karşılaştırma önerilmez
İç yük	Öz-bildirim ölçekleri, kalp hızı bandı	Seans-RPE, antrenman itkisi (TRIMP)	Uygulanabilirliği yüksek; öznel bileşen bağlamdan etkilenir
Otonom düzenleme	KHD ölçüm uygulamaları	RMSSD, Ln rMSSD haftalık ortalaması	Standart protokol gerektirir; tekil ölçümler yanıltıcıdır
Uyku	Bileğe takılan tüketici cihazları	Toplam uyku süresi, uyku verimliliği	Süre eğilimleri kabul edilebilir; evre çıktıları güvenilmez
Biyomekanik	Markersız hareket analizi, kuvvet platformu	Diz–kalça açıları, sıçrama yüksekliği, asimetri	Sagittal düzlemde iyi; frontal düzlemde sınırlı

4. Analitik ve Karar Destek Katmanları

4.1. Göstergeden Karara: Akut: Kronik Yük Oranı Örneği

Akut:kronik yük oranı (AKYO), son on yılda antrenman yükü yönetiminin fiilî standardı hâline gelmiş; "tatlı nokta" ve "tehlike bölgesi" gibi kavramlarla uygulamaya yerleşmiştir. Ancak kavramın kuramsal ve istatistiksel temelleri ciddi biçimde eleştirilmiştir. İki ölçümün oranlanmasından kaynaklanan matematiksel bağlaşıklık, oranın pay ve paydasındaki farklı değişim örüntülerinin aynı değere karşılık gelebilmesi ve nedensel bir ilişkinin gösterilememiş olması, AKYO›nun yük yönetimi sistemlerinde kullanımını destekleyen kanıt bulunmadığı sonucuna götürmüştür (Impellizzeri vd., 2020). Bu örnek, akıllı spor sistemlerinin analitik katmanında yinelenen bir sorunu görünür kılmaktadır: yaygın kullanım, geçerlik kanıtının yerine geçmemektedir.

4.2. Makine Öğrenmesi ile Yaralanma Riskinin Kestirimi

Yaralanma riskinin öngörülmesi, akıllı spor sistemlerinin en çok ilgi çeken uygulama alanıdır. Rastgele orman ve gradyan artırma gibi ağaç temelli yöntemler, çalışmaların önemli bir bölümünde en yüksek istatistiksel başarımı sağlamıştır. Buna karşılık kapsamlı bir sistematik tarama, bu modellerin klinik yararının sınırlı kaldığını; geniş kestirim pencereleri, yaralanmanın çok genel tanımlanması, küçük örneklem büyüklükleri ve yöntemsel heterojenliğin temel kısıtlılıkları oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Dahası, doğrudan karşılaştırma yapılan çalışmaların üçte birinde lojistik regresyon makine öğrenmesi yöntemlerinden daha iyi başarım göstermiştir (Leckey vd., 2025).

Bu bulgular, yaralanmanın doğası hakkındaki kuramsal tartışmayla da uyumludur. Karmaşık sistemler yaklaşımı, yaralanmanın tekil risk etmenlerinin doğrusal toplamı değil, çok sayıda etmenin zaman içinde etkileşiminden doğan bir örüntü olduğunu savunur (Bittencourt vd., 2016). Bu çerçevede

modelin görevi "kim sakatlanacak?" sorusuna kesin yanıt vermek değil, riskli örüntüleri erken tanımlayarak uzman kararını desteklemektir. Model çıktılarının SHAP gibi açıklanabilirlik yöntemleriyle bireysel düzeyde yorumlanabilir hâle getirilmesi, bu destekleyici işlevin ön koşuludur; aksi hâlde antrenör ya da fizyoterapist, gerekçesini denetleyemediği bir çıktıya güvenmek zorunda kalır.

4.3. Dijital İkizler ve Senaryo Temelli Planlama

Dijital ikiz, fiziksel bir varlığın davranışını yansıtan ve sürekli veri akışıyla güncellenen sanal bir modelidir; spor bağlamında sporcunun kendisi bu modelin merkezine yerleştirilir (Hliš vd., 2024). Bu yaklaşımın vaadi, bir antrenman planının ya da rehabilitasyon protokolünün sporcuya uygulanmadan önce sanal ortamda sınanabilmesidir. Ancak alanyazın, dijital ikiz uygulamalarının spor alanında hâlen kavramsal ve öncül aşamada olduğunu; veri kalitesi, model doğrulama ve hesaplama maliyeti bakımından önemli engellerle karşılaşıldığını göstermektedir. Kısa vadede bu teknolojinin en gerçekçi katkısı, tam bir sanal sporcu modeli değil, belirli alt sistemlere odaklanan senaryo analizleri olacaktır.

5. Uygulama Alanları

5.1. Elit Performans ve Sahaya Dönüş Süreçleri

Elit sporda dijital sistemlerin en olgun uygulaması, yüklenmenin bireyselleştirilmesi ve sahaya dönüş kararlarının nesnelleştirilmesidir. Sahaya dönüş, tek bir testin eşik değerine indirgenebilecek bir olay değil; sağlık durumu, katılım riski ve karara ilişkin bağlamsal etmenlerin birlikte değerlendirildiği kademeli bir süreçtir (Ardern vd., 2016). Akıllı sistemlerin buradaki katkısı, kuvvet platformu asimetri değerleri, hız–güç profilleri ve saha içi yük verilerini ortak bir zaman ekseninde birleştirerek karar kuruluna nesnel bir kanıt tabanı sunmasıdır. Sistemin karar verici olması değil, kararı belgelemesi ve tutarlı kılması beklenir.

5.2. Telerehabilitasyon

Kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarında uzaktan sunulan rehabilitasyon hizmetleri, dijital sağlığın spor bilimleriyle en doğrudan kesiştiği alandır. Şemsiye derleme düzeyindeki kanıtlar, telesağlık temelli uygulamaların ağrı ve işlevsellik çıktılarında yüz yüze bakıma benzer sonuçlar üretebildiğini; ancak kanıt kesinliğinin genellikle düşük ile orta düzeyde kaldığını göstermektedir (Bargeri vd., 2024). Bu tablo, telerehabilitasyonun yüz yüze bakımın yerine geçen bir seçenek olmaktan çok, erişimi genişleten ve sürekliliği artıran tamamlayıcı bir sunum biçimi olarak konumlandırılması gerektiğine işaret etmektedir.

5.3. Toplum Sağlığı ve Fiziksel Aktivitenin Artırılması

Akıllı spor sistemlerinin toplum sağlığına yansıması, akıllı telefon uygulamaları ve adım sayarlar aracılığıyla fiziksel aktivitenin artırılmasıdır. Meta-analitik kanıtlar, uygulama temelli müdahalelerin fiziksel aktivite düzeyinde küçük ancak istatistiksel olarak anlamlı artışlar sağladığını; etkinin özellikle kısa süreli izlemlerde belirgin olduğunu ve uzun dönemde sürdürülebilirliğinin belirsiz kaldığını göstermektedir (Romeo vd., 2019). Etkinin büyüklüğünden bağımsız olarak, bu araçların ölçeklenebilirliği ve düşük birim maliyeti, toplum düzeyinde önemli bir halk sağlığı potansiyeli taşımaktadır. Bu potansiyelin gerçekleşmesi ise davranış değişikliği tekniklerinin uygulamaya kuramsal bir temelle yerleştirilmesine bağlıdır; yalnızca adım sayısı gösteren bir arayüz, hedef belirleme, geri bildirim ve sosyal destek bileşenlerini içeren bir tasarımdan belirgin biçimde daha zayıf sonuç üretmektedir.

5.4. Beden Eğitimi, Okul Sporu ve Engelli Bireylerde Kullanım

Dijital izleme araçlarının eğitim ortamlarındaki kullanımı, elit spordan farklı bir gerekçeye dayanır: buradaki amaç

performansın optimize edilmesi değil, hareket okuryazarlığının ve içsel motivasyonun geliştirilmesidir. Sınıf içinde etkinlik verisinin görünür kılınması katılımı artırabilir; ancak aynı verinin öğrenciler arasında karşılaştırmalı biçimde sunulması, düşük uygunluk düzeyindeki öğrencilerde kaçınma davranışını güçlendirme riski taşır. Bu nedenle okul ortamında ölçüm, bireysel ilerlemeye odaklı ve sıralama üretmeyen bir çerçevede tasarlanmalıdır. Engelli bireylerin spora katılımında ise uyarlanmış sensör çözümleri ve uzaktan izleme, ulaşım engelini ortadan kaldırarak düzenli katılımın sürdürülmesine katkı sağlamaktadır. Buna karşılık mevcut cihazların algoritmaları büyük ölçüde tipik yürüyüş ve koşu örüntüleri üzerinden kalibre edildiğinden, tekerlekli sandalye kullanımı ya da atipik hareket örüntülerinde ölçüm geçerliği önemli ölçüde düşmektedir. Bu grupta cihazların doğrulanması, alanyazının en belirgin boşluklarından birini oluşturmaktadır.

6. Etik, Hukuki ve Yönetişim Boyutu

Sporcu izleme verileri, sağlık verisi niteliği taşıdıkları ölçüde özel nitelikli kişisel veri kategorisine girer. Türkiye'de 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu, Avrupa Birliği'nde ise Genel Veri Koruma Tüzüğü bu verilerin işlenmesini açık rıza ve amaçla sınırlılık ilkelerine bağlamaktadır (EU, 2016). Spor bağlamında rızanın gerçekten özgür iradeye dayanıp dayanmadığı ise ayrı bir sorundur: kadroya seçilme kaygısı taşıyan bir sporcunun izleme sisteminden çekilme hakkını kullanabilmesi çoğu zaman kuramsal kalmaktadır.

Yapay zekâ temelli karar destek sistemleri açısından ise Avrupa Birliği'nin 2024/1689 sayılı Yapay Zekâ Tüzüğü, risk temelli bir sınıflandırma getirmekte ve sağlık alanındaki uygulamaların önemli bir bölümünü yüksek riskli sistemler kategorisine yerleştirerek şeffaflık, insan gözetimi ve teknik dokümantasyon yükümlülükleri öngörmektedir (Lognoul, 2025). Spor kuruluşlarının bu düzenlemeleri bir uyum yükü olarak değil, sistem tasarımının başlangıç ölçütü olarak ele alması

gerekmektedir. Tablo 3, başlıca riskleri ve önerilen önlemleri özetlemektedir.

Tablo 3. Akıllı spor sistemlerinde başlıca etik-hukuki riskler ve önerilen önlemler

Risk alanı	Somut görünümü	Önerilen önlem
Rızanın gerçekliği	Sporcunun izlemeden çekilmesinin fiilen mümkün olmaması	Katmanlı onam; performans dışı verilerde ayrı rıza
Veri sahipliği	Transfer sonrasında geçmiş verilerin sporcuyla birlikte taşınmaması	Sözleşmede veri taşınabilirliğinin açıkça düzenlenmesi
Amaç dışı kullanım	Sağlık verisinin sözleşme görüşmelerinde kullanılması	Erişim yetkilerinin rol temelli sınırlandırılması
Algoritmik şeffaflık	Gerekçesi denetlenemeyen risk skorlarına dayalı kararlar	Açıklanabilirlik yöntemleri ve insan gözetiminin zorunlu kılınması
Aşırı izleme	Sürekli ölçümün kaygı ve bağımlılık yaratması	Ölçüm sıklığının gerekçelendirilmesi; veri detoksu dönemleri

Tablodaki risklerin ortak paydası, verinin sporcuyla kurduğu ilişkinin niteliğidir. Sürekli izleme, sporcunun kendi bedenine ilişkin içsel farkındalığının yerini dışsal göstergelere bırakması sonucunu doğurabilir; toparlanma skorunun düşük olduğu bir sabahta kendini iyi hisseden sporcunun yine de yorgun olduğunu düşünmeye başlaması bunun tipik bir örneğidir. Bu nedenle akıllı sistemlerin tasarımında, ölçümün sporcunun özerkliğini artırıp artırmadığı ayrı bir değerlendirme ölçütü olarak ele alınmalıdır.

7. Sınırlılıklar ve Eleştirel Değerlendirme

Mevcut alanyazının değerlendirilmesi, akıllı spor sistemlerine ilişkin dört yapısal sınırlılığa işaret etmektedir. Birincisi geçerlik açığıdır: cihazların üretici tarafından bildirilen doğruluk değerleri, çoğunlukla laboratuvar koşullarında ve sporun gerçek hareket örüntülerinden farklı görevlerle elde edilmektedir. İkincisi, kestirim modellerinin dış geçerliğinin sınanmamasıdır; bir kulüpte geliştirilen modelin başka bir kulüpte,

başka bir ligde ya da başka bir sezonda benzer başarım göstereceği varsayımı nadiren test edilmektedir. Üçüncüsü, ölçülebilir olanın önemli olanla karıştırılmasıdır; kolay ölçülen değişkenler karar süreçlerinde orantısız ağırlık kazanırken, motivasyon, takım içi ilişkiler ve yaşam koşulları gibi ölçülmesi güç etmenler sistem dışında kalmaktadır. Dördüncüsü, teknolojiye erişimdeki eşitsizliktir; kaynakları sınırlı kulüpler, okullar ve kadın sporcu ligleri bu sistemlerin dışında kalarak mevcut performans ve sağlık farklarının derinleşmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu sınırlılıklar teknolojinin reddini değil, beklentilerin yeniden ayarlanmasını gerektirir. Akıllı sistemlerin gerçekçi katkısı, kararı uzmanın elinden almak değil; kararı belgelemek, tutarlılığını artırmak ve zaman içinde denetlenebilir kılmaktır.

8. Sonuç ve Gelecek Yönelimler

Dijital sağlık ve akıllı spor sistemleri, spor bilimlerinde ölçümün kapsamını genişletmiş; sporcu izleme, rehabilitasyon ve toplum sağlığı uygulamalarını ortak bir teknolojik altyapıda buluşturmuştur. Bununla birlikte bu bölümde ele alınan kanıtlar, alanın olgunluk düzeyinin katmanlar arasında dengesiz olduğunu göstermektedir: algılama ve iletim katmanları görece olgunlaşmışken, analitik katmanının dış geçerliği ve karar katmanının klinik yararı büyük ölçüde gösterilmeyi beklemektedir.

Gelecek araştırmalar için üç öncelik öne çıkmaktadır. Birincisi, kestirim modellerinin farklı kulüp, lig ve cinsiyet gruplarında dış doğrulamasının yapılması ve raporlama standartlarının benimsenmesidir. İkincisi, çıktı ölçütünün model başarımından sporcu düzeyindeki sonuçlara — yaralanma insidansı, kaçırılan antrenman günü, sahaya dönüş süresi — kaydırılmasıdır. Üçüncüsü, sporcunun veri üzerindeki denetimini güçlendiren yönetişim modellerinin geliştirilmesidir. Akıllı spor sistemlerinin başarısı, ürettikleri veri hacmiyle değil, bu verinin sporcu sağlığı ve performansı üzerinde yarattığı ölçülebilir farkla değerlendirilmelidir.

Kaynakça

Ardern, C. L., Glasgow, P., Schneiders, A., Witvrouw, E., Clarsen, B., Cools, A., Gojanovic, B., Griffin, S., Khan, K. M., Moksnes, H., Mutch, S. A., Phillips, N., Reurink, G., Sadler, R., Silbernagel, K. G., Thorborg, K., Wangensteen, A., Wilk, K. E., & Bizzini, M. (2016). 2016 consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *British Journal of Sports Medicine, 50*(14), 853–864. https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096278

Bargeri, S., Castellini, G., Vitale, J. A., Guida, S., Banfi, G., Gianola, S., & Pennestrì, F. (2024). Effectiveness of telemedicine for musculoskeletal disorders: Umbrella review. *Journal of Medical Internet Research, 26,* e50090. https://doi.org/10.2196/50090

Bittencourt, N. F. N., Meeuwisse, W. H., Mendonça, L. D., Nettel-Aguirre, A., Ocarino, J. M., & Fonseca, S. T. (2016). Complex systems approach for sports injuries: Moving from risk factor identification to injury pattern recognition—Narrative review and new concept. *British Journal of Sports Medicine, 50*(21), 1309–1314. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095850

Chinoy, E. D., Cuellar, J. A., Huwa, K. E., Jameson, J. T., Watson, C. H., Bessman, S. C., Hirsch, D. A., Cooper, A. D., Drummond, S. P. A., & Markwald, R. R. (2021). Performance of seven consumer sleep-tracking devices compared with polysomnography. *Sleep, 44*(5), zsaa291. https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa291

Chougule, A., Dowsett, M., Ekundayomi, D., Machesney, A., Mather, T., Gompels, B., & McDonnell, S. (2026). Accuracy and validity of 3D markerless motion capture compared to marker-based systems for lower-limb biomechanical assessment: A systematic review. *Sensors, 26*(12), 3956. https://doi.org/10.3390/s26123956

Crang, Z. L., Duthie, G., Cole, M. H., Weakley, J., Hewitt, A., & Johnston, R. D. (2021). The validity and reliability of wearable microtechnology for intermittent team sports: A systematic review. *Sports Medicine, 51*(3), 549–565. https://doi.org/10.1007/s40279-020-01399-1

European Union. (2016). Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 (General

Data Protection Regulation). *Official Journal of the European Union, L 119*, 1–88.

Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., Doleshal, P., & Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research, 15*(1), 109–115.

Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine, 44*(Suppl. 2), S139–S147. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z

Hliš, T., Fister, I., & Fister, I., Jr. (2024). Digital twins in sport: Concepts, taxonomies, challenges and practical potentials. *Expert Systems with Applications, 258*, 125104.

Impellizzeri, F. M., Tenan, M. S., Kempton, T., Novak, A., & Coutts, A. J. (2020). Acute:Chronic workload ratio: Conceptual issues and fundamental pitfalls. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 15*(6), 907–913. https://doi.org/10.1123/ijspp.2019-0864

Kara, I., Sahinler, Y., Koc, M. C., Sahin, M. Y., Sebin, K., Talaghir, L. G., Iconomescu, T. M., Nanu, L., Liușnea, Ș. C., & Manolache, G. M. (2026). Attitudes toward smart sports technologies and artificial intelligence: An examination from cognitive, affective and behavioral dimensions. *Frontiers in Public Health, 14*, 1830510. https://doi.org/10.3389/fpubh.2026.1830510

Leckey, C., van Dyk, N., Doherty, C., Lawlor, A., & Delahunt, E. (2025). Machine learning approaches to injury risk prediction in sport: A scoping review with evidence synthesis. *British Journal of Sports Medicine, 59*(7), 491–500. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108576

Lognoul, M. (2025). Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act—AI Act). *Revue du Droit des Technologies de l'Information,* (3–4), 145–189.

Manresa-Rocamora, A., Sarabia, J. M., Javaloyes, A., Flatt, A. A., & Moya-Ramón, M. (2021). Heart rate variability-guided training for enhancing cardiac-vagal modulation, aerobic fitness, and endurance performance: A methodological systematic review with meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(19), 10299. https://doi.org/10.3390/ijerph181910299

Rebelo, A., Martinho, D. V., Valente-Dos-Santos, J., Coelho-E-Silva, M. J., & Teixeira, D. S. (2023). From data to action: A scoping review of wearable technologies and biomechanical assessments informing injury prevention strategies in sport. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 15(*1), 169. https://doi.org/10.1186/s13102-023-00783-4

Romeo, A., Edney, S., Plotnikoff, R., Curtis, R., Ryan, J., Sanders, I., Crozier, A., & Maher, C. (2019). Can smartphone apps increase physical activity? Systematic review and meta-analysis. *Journal of Medical Internet Research, 21*(3), e12053. https://doi.org/10.2196/12053

World Health Organization. (2025). *Global strategy on digital health 2020–2027*. World Health Organization.

3. BÖLÜM

Beyin Sağlığının Korunması ve Geliştirilmesinde Fiziksel Aktivite

Mahmut ULUKAN[1], Buşra ÖZCAN[2]

1 İstanbul Gelişim Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, mulukan@gelisim.edu.tr ORCID: 0000-0003-3623-395X
2 Siirt Üniversitesi, Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu, busraozcan@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3619-8840

1. GİRİŞ

Beyin sağlığı, bireyin çevresiyle ilişki kurmasını, yeni bilgi öğrenmesini, duygularını düzenlemesini, hareket etmesini ve sosyal rollerini sürdürmesini mümkün kılan işlevsel bir bütündür. Dünya Sağlık Örgütü bu kavramı, herhangi bir nörolojik hastalığın bulunup bulunmamasından bağımsız olarak bilişsel, duyusal, sosyal-duygusal, davranışsal ve motor alanlarda kişinin yaşam boyu potansiyelini gerçekleştirebilmesiyle ilişkilendirmektedir. Böylece beyin sağlığı yalnızca demansın önlenmesine indirgenmemekte; çocuk gelişiminden ileri yaşta bağımsız yaşama kadar uzanan bir halk sağlığı alanı olarak ele alınmaktadır (World Health Organization, 2022).

Nüfusun yaşlanması, kronik hastalıkların birikmesi ve yaşam koşullarının değişmesi nedeniyle nörolojik sorunların toplumsal etkisi giderek görünürleşmektedir. Küresel Hastalık Yükü 2021 verilerini değerlendiren çalışma, sinir sistemini etkileyen hastalıkların farklı yaş gruplarında önemli düzeyde sağlık kaybıyla ilişkili olduğunu göstermiştir. Bununla eş zamanlı olarak yetişkinlerde fiziksel aktivite yetersizliği de yaygınlaşmaktadır. 507 nüfus temelli araştırmanın birleştirildiği analizde, 2022 yılında yetişkinlerin yaklaşık üçte birinin önerilen fiziksel aktivite düzeyine ulaşmadığı bildirilmiştir.

Ancak bu iki olgunun birlikte görülmesi, fiziksel aktivite eksikliğinin bütün nörolojik hastalıkların doğrudan nedeni olduğunu göstermez; ilişkinin biyolojik, davranışsal ve toplumsal belirleyicilerle birlikte değerlendirilmesi gerekir (GBD 2021 Nervous System Disorders Collaborators, 2024; Strain vd., 2024).

Egzersiz fizyolojisi ve nörobilim alanlarındaki gelişmeler, kas aktivitesinin damar sistemi, bağışıklık yanıtı, enerji kullanımı, nörotrofik sinyaller ve psikososyal deneyimler aracılığıyla beyin işlevlerini etkileyebileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte mekanistik bulguların önemli bir kısmı hayvan deneylerinden veya laboratuvar çalışmalarından gelmektedir. İnsanlarda dolaşımdaki bir biyobelirtecin yükselmesi, aynı değişimin beyinde aynı büyüklükte gerçekleştiğini kanıtlamaz. Benzer biçimde aktif bireylerde demansın daha az görülmesi, eğitim, gelir, beslenme, damar sağlığı ve başlangıçtaki bilişsel durum gibi etkenlerden bağımsız bir koruyucu nedensel etki bulunduğunu kendiliğinden göstermez (Maass vd., 2016; Qipo vd., 2026; Sabia vd., 2017).

Bu bölümün amacı, fiziksel aktivite ve beyin sağlığı ilişkisini yaşam boyu, çok disiplinli ve kanıt düzeyine duyarlı bir çerçevede incelemektir. Bölüm, güncel araştırmalara dayanan akademik kitap bölümü niteliğindedir; bir sistematik derleme olarak sunulmamaktadır. Spor bilimleri ve rekreasyon perspektifi özellikle korunmakta; biyolojik mekanizmalar, klinik kullanım, program erişilebilirliği, katılımın sürdürülebilirliği ve sosyal eşitsizlikler birlikte değerlendirilmektedir (World Health Organization, 2020; World Health Organization, 2022).

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Fiziksel aktivite, egzersiz, spor ve rekreasyon

Fiziksel aktivite, iskelet kaslarının kasılması sonucunda ortaya çıkan ve dinlenme düzeyinin üzerinde enerji harcaması gerektiren her türlü bedensel harekettir. İşe yürüyerek gitme, ev işi, merdiven çıkma, oyun ve planlı antrenman bu

geniş başlığın altında yer alabilir. Egzersiz ise fiziksel uygunluğun bir veya daha fazla bileşenini geliştirmeyi ya da korumayı amaçlayan planlı, yapılandırılmış ve tekrarlı fiziksel aktivitedir. Fiziksel uygunluk; dayanıklılık, kuvvet, esneklik ve hareket becerisi gibi ölçülebilir özellikleri tanımlar. Bu nedenle hareket miktarı ile fiziksel uygunluk aynı şey değildir; benzer sürelerde hareket eden iki kişinin aerobik kapasitesi farklı olabilir (Caspersen vd., 1985).

Spor, belirli kurallar, beceri gereksinimleri ve kimi zaman yarışma unsurlarıyla örgütlenen fiziksel etkinlikleri kapsar. Rekreatif fiziksel aktivite ise bireyin serbest zamanında gönüllülük, keyif, yenilenme ve sosyal etkileşim amacıyla katıldığı hareketli deneyimleri ifade eder. Dans, doğa yürüyüşü, kampüs içi spor, mahalle yürüyüş grubu ve aile oyunları bu kapsamda değerlendirilebilir. Rekreatif katılımın belirleyici özelliği yalnızca enerji harcaması değil, etkinliğin öznel anlamı ve sürdürülme olasılığıdır. Bununla birlikte rekreasyon bağlamının bilişsel sonuçlara özgün katkısını fiziksel yükten, sosyal temastan ve çevresel etkilerden ayırmak araştırma tasarımı açısından güçtür (Caspersen vd., 1985; Rhodes & Kates, 2015; World Health Organization, 2018).

Aerobik kapasite, dolaşım ve solunum sistemlerinin çalışan kaslara oksijen sağlama yeterliğini; kardiyorespiratuvar uygunluk ise bu bütünleşik dayanıklılık kapasitesinin ölçülebilir düzeyini anlatır. Aerobik egzersiz yürüyüş, bisiklet veya yüzme gibi sürekli büyük kas gruplarını kullanan etkinlikleri; direnç egzersizi ise kasların vücut ağırlığı, ağırlık, makine veya elastik bant gibi bir yüke karşı çalışmasını kapsar. Akut egzersiz tek bir hareket seansını, düzenli egzersiz haftalar ya da aylar boyunca yinelenen uygulamayı ifade eder. Bu ayrımlar önemlidir; tek bir yürüyüşün hemen sonrasında ölçülen dikkat değişimi ile altı aylık bir programın beyin yapısı üzerindeki olası etkisi aynı biyolojik süreç değildir (Caspersen vd., 1985; World Health Organization, 2020).

2.2. Sedanter davranış ve fiziksel aktivite yetersizliği

Sedanter davranış, uyanıkken oturma, uzanma veya yaslanma pozisyonunda gerçekleşen düşük enerji harcamalı etkinlikleri kapsar. Fiziksel aktivite yetersizliği ise yaş grubuna uygun önerilen fiziksel hareket düzeyine ulaşamamaktır. Haftada birkaç gün egzersiz yapan bir akademisyen, günün geri kalanında uzun saatler oturuyorsa hem önerilen egzersiz miktarına yaklaşabilir hem de yüksek sedanter süreye sahip olabilir. Dolayısıyla bu iki kavram birbiriyle ilişkili olsa da eş anlamlı değildir (Tremblay vd., 2017; World Health Organization, 2020).

Ekran kullanımı da tek tip bir davranış değildir. Çevrim içi ders izlemek, arkadaşlarla iletişim kurmak, gece geç saatte sosyal medya kullanmak ve hareketli video oyunu oynamak aynı zihinsel, sosyal veya bedensel özellikleri taşımaz. Araştırmalarda toplam ekran süresinin yanında içerik, zamanlama, uykuya etkisi, eşzamanlı hareket düzeyi ve kullanımın zorunlu ya da gönüllü olması değerlendirilmelidir. Bu ayrım özellikle çocuk ve ergen sağlığına ilişkin yorumlarda ölçüm hatasını azaltır (Santos vd., 2023; Stiglic & Viner, 2019).

2.3. Bilişsel işlev, bilişsel rezerv ve nöroplastisite

Bilişsel işlev; dikkat, bilgi işleme, öğrenme, bellek, dil, planlama ve karar verme gibi zihinsel süreçlerin bütünüdür. Yürütücü işlevler, hedef belirleme, uygun davranışı sürdürme, dikkat dağıtıcı uyaranları engelleme ve değişen koşullara uyum sağlama gibi üst düzey kontrol süreçlerini kapsar. Çalışma belleği kısa süreli bilgiyi zihinde tutup işlemeye; inhibitör kontrol uygunsuz bir tepkiyi durdurmaya; bilişsel esneklik ise farklı kurallar veya görevler arasında geçiş yapmaya karşılık gelir (Diamond, 2013; World Health Organization, 2022).

Beyin rezervi, beyin yapısının kapasitesi veya dayanıklılığıyla ilişkili özellikleri; bilişsel rezerv ise bireyin yaşam boyu edindiği eğitim, deneyim, zihinsel uğraş ve sosyal katılım sayesinde aynı düzeydeki yapısal değişime rağmen işlevini

sürdürebilme olasılığını anlatan kuramsal bir çerçeveyi ifade eder. Bu kavramlar doğrudan ölçülebilen tek bir biyolojik madde değildir. Nöroplastisite, sinir sistemi bağlantılarının ve işlevsel ağlarının deneyime göre değişebilmesidir. Nörogenez ise yeni sinir hücrelerinin oluşması anlamına gelir; nöroplastisite ile eş anlamlı değildir ve insan beynindeki kapsamı konusunda yöntemsel tartışmalar sürmektedir (Elliott vd., 2025; Stern, 2012; World Health Organization, 2022).

3. FİZİKSEL AKTİVİTENİN NÖROBİYOLOJİK MEKANİZMALARI

3.1. Nöroplastisite ve sinaptik uyum

Yeni bir hareket örüntüsü öğrenmek, dengeyi korumak, bir rakibin yön değiştirmesine tepki vermek veya dans adımlarını sırayla uygulamak duyusal, motor ve bilişsel süreçlerin birlikte çalışmasını gerektirir. Bu deneyimler sinaptik bağlantıların etkinliğinde ve beyin ağlarının organizasyonunda değişim oluşturabilecek bir çevresel zenginleşme sağlar. Egzersiz çalışmalarında nöroplastisite kavramı çoğu zaman daha iyi bilişsel performans, görüntüleme bulguları veya dolaşımdaki biyobelirteçler üzerinden dolaylı olarak değerlendirilir; her olumlu davranış değişikliğinin doğrudan sinaptik yeniden yapılanmayı kanıtladığı söylenemez (Diamond, 2013; Erickson vd., 2011; Maass vd., 2016).

İnsanlarda yapısal ve işlevsel değişim olasılığını destekleyen klasik randomize araştırmada bir yıllık aerobik egzersiz, ileri yaşta hipokampal hacim ve bellek sonuçlarıyla ilişkilendirilmiştir. Ancak daha güncel bir meta-analizde yaşlı bireylerde beyaz cevher bütünlüğünün belirli bir ölçütünde iyileşme saptanırken hipokampus hacmi, bellek, işlemleme hızı ve yürütücü işlevler için tutarlı değişim bulunmamıştır. Bu karşılaştırma, tek bir başarılı çalışmanın bütün görüntüleme göstergelerine veya bütün popülasyonlara genellenmemesi gerektiğini göstermektedir (Erickson vd., 2011; Zhang vd., 2024).

3.2. Hipokampus ve nörogenez

Hipokampus, yeni anıların oluşturulması, mekânsal yönelim ve öğrenmeyle ilişkili bir beyin yapısıdır. Kemirgen çalışmalarında gönüllü koşunun hipokampal hücre çoğalmasıyla ilişkili olabileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte laboratuvar hayvanlarında doğrudan doku örneği incelemek mümkünken yaşayan insanlarda aynı sürecin rutin biçimde ve aynı kesinlikle izlenmesi mümkün değildir. İnsan hipokampal hacmindeki değişim; damar yapısı, bağ dokusu, sıvı dengesi veya farklı hücresel süreçlerden kaynaklanabileceğinden tek başına yeni nöron üretiminin göstergesi değildir (Elliott vd., 2025; Erickson vd., 2011; van Praag vd., 1999).

Elliott ve arkadaşlarının primatlara ilişkin sistematik değerlendirmesi, yetişkin insanlarda ve diğer primatlarda hipokampal nörogenezi destekleyen bulgular bulunduğunu; ancak ölçüm yaklaşımlarının heterojen olduğunu ve yaşla birlikte göstergelerin azaldığını ortaya koymuştur. Buradan çıkarılabilecek dikkatli sonuç, yetişkin hipokampal nörogenezinin bilimsel olarak tartışılan ve giderek daha ayrıntılı incelenen bir süreç olduğudur. "Her yürüyüş yeni beyin hücresi üretir" gibi kesin ifadeler mevcut insan kanıtının ötesine geçer (Elliott vd., 2025).

3.3. Beyin kaynaklı nörotrofik faktör

Beyin kaynaklı nörotrofik faktör, İngilizce karşılığıyla brain-derived neurotrophic factor (BDNF), sinir hücrelerinin yaşaması, sinaptik düzenleme ve öğrenmeyle ilişkili bir proteindir. Egzersiz sonrasında periferik kanda ölçülen BDNF düzeylerinin değişebildiği çeşitli insan çalışmalarında gösterilmiştir. Szuhany ve arkadaşlarının meta-analizi akut egzersiz ve düzenli egzersiz bağlamındaki değişimleri değerlendirmiş; Dinoff ve arkadaşları ise egzersiz programları sonrasında dinlenik periferik BDNF düzeyinde ortalama artış bildirmiştir (Dinoff vd., 2016; Szuhany vd., 2015).

Bu bulguların yorumunda ölçümün yapıldığı biyolojik bölge önemlidir. Serum veya plazmadaki BDNF düzeyi, trombositler ve örnek alma koşulları gibi kaynaklardan etkilenebilir; beyindeki BDNF üretimiyle bire bir örtüşmeyebilir. Ayrıca farklı çalışmaların kullandığı egzersiz şiddeti, örnekleme zamanı, yaş grubu ve laboratuvar yöntemi değişkendir. Dolayısıyla BDNF, olası bir mekanizmanın göstergesi olarak ele alınmalı; tek başına bilişsel iyileşmenin kanıtı şeklinde sunulmamalıdır (Dinoff vd., 2016; Polacchini vd., 2015; Szuhany vd., 2015).

3.4. IGF-1, VEGF ve damar oluşumu

İnsülin benzeri büyüme faktörü 1 (IGF-1) ve vasküler endotelyal büyüme faktörü (VEGF), egzersizle ilişkili nörotrofik ve damarsal uyum tartışmalarında incelenen büyüme faktörleridir. İleri yaştaki yetişkinlerle yürütülen bir araştırmada periferik IGF-1, VEGF ve BDNF düzeyleri; bellek, hipokampal kanlanma ve hacim göstergeleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Ancak dolaşımdaki bir belirtecin değişmesi, beyinde yeni damar oluştuğunu veya klinik açıdan anlamlı bilişsel iyileşme geliştiğini tek başına kanıtlamaz (Maass vd., 2016; Qipo vd., 2026).

2026 tarihli direnç antrenmanı meta-analizi, ileri yaşta dolaşımdaki nöroplastisiteyle ilişkili belirteçler arasında IGF-1 ve BDNF artışları, inflamatuvar belirteçlerde ise azalma bildirmiştir. Ancak bu sonuçlar periferik biyobelirteçlere dayanmaktadır; doğrudan beyindeki VEGF aktivitesi veya yeni damar oluşumu ölçülmüş değildir. Bir mekanizmanın biyolojik olarak anlamlı görünmesi, her yaşta ve her egzersiz türünde aynı etkiyi doğrulamaz (Qipo vd., 2026).

3.5. Serebral kan akımı ve kardiyovasküler sağlık

Beyin, sürekli oksijen ve glikoz sağlanmasına ihtiyaç duyan yüksek enerji gereksinimli bir organdır. Düzenli fiziksel aktivite kan basıncı kontrolü, damar esnekliği, endotel işlevi

ve kardiyorespiratuvar uygunluk üzerinden serebrovasküler sağlığı destekleyebilir. Beyin kan akımı ve damarların değişen gereksinimlere yanıt verebilmesi, özellikle ileri yaşta bilişsel işlevlerin korunması açısından araştırılmaktadır. Bu ilişkide doğrudan serebral uyum ile kalp-damar risk etkenlerinin düzelmesinden kaynaklanan dolaylı yararlar birbirinden ayrılmalıdır (Livingston vd., 2024; Maass vd., 2016; World Health Organization, 2020).

Yapısal manyetik rezonans görüntüleme ve damar temelli görüntüleme yöntemleri, egzersiz sonrası değişimleri inceleyebilir; ancak kullanılan cihaz, beyin bölgesi ve analiz yaklaşımı sonuçları etkiler. Üstelik beyin kan akımındaki geçici artışın uzun dönemde kalıcı bilişsel yarara dönüşmesi otomatik değildir. Kardiyovasküler risklerin azaltılması güçlü bir sağlık gerekçesi olmakla birlikte, bu durum belirli bir demans türünün kesin olarak önleneceği anlamına gelmez (Livingston vd., 2024; Zhang vd., 2024).

3.6. İnflamasyon ve bağışıklık düzenlenmesi

Kronik düşük dereceli inflamasyon, uzun süreli ve görece düşük yoğunluklu bağışıklık aktivasyonunu tanımlar; metabolik hastalıklar, yaşlanma ve damar sorunlarıyla birlikte görülebilir. Nöroinflamasyon ise merkezi sinir sistemindeki bağışıklık ilişkili süreçlere karşılık gelir. Düzenli egzersizin sistemik inflamatuvar belirteçleri düzenleyebilmesi, beyin sağlığına dolaylı katkı sağlayabilecek mekanizmalardan biridir. Bununla birlikte dolaşımdaki C-reaktif protein, interlökin-6 veya tümör nekroz faktörü değişimleri, merkezi sinir sistemindeki inflamasyonun doğrudan ölçümü değildir (Qipo vd., 2026; Ye vd., 2021).

Qipo ve arkadaşlarının 2026 tarihli çalışmasında direnç antrenmanının ileri yaştaki bireylerde çeşitli proinflamatuvar belirteçlerde azalma ve nöroplastisiteyle ilişkilendirilen dolaşımsal belirteçlerde artışla ilişkili olduğu bildirilmiştir. Öte yandan yetersiz toparlanma, aşırı egzersiz yükü, enerji eksikliği ve mevcut hastalıklar bazı bireylerde ters sonuçlara yol

açabilir. Bu nedenle egzersizin etkisi "ne kadar fazla, o kadar iyi" ilkesine indirgenmemeli; yüklenme-toparlanma dengesi dikkate alınmalıdır (Qipo vd., 2026).

3.7. Mitokondriyal işlev ve enerji metabolizması

Mitokondriler hücresel enerji üretiminde görev alan organellerdir. Genç ve ileri yaştaki yetişkinlerle yürütülen bir insan çalışmasında farklı egzersiz biçimlerinin iskelet kasındaki metabolik uyum, mitokondriyal proteinlerle ilişkili süreçler ve insülin duyarlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bulgular öncelikle kas dokusuna ve sistemik metabolizmaya ilişkindir; egzersizin insan beynindeki mitokondrilerde aynı düzeyde değişim oluşturduğunu göstermemektedir (Maass vd., 2016; Robinson vd., 2017).

Oksidatif stres, oksidan süreçler ile antioksidan savunma arasındaki dengenin bozulmasını ifade eder. İleri yaştaki yetişkinleri inceleyen bir sistematik derleme ve meta-analiz, düzenli aerobik egzersizin bazı dolaşımsal oksidan göstergelerinde azalma ve bazı antioksidan göstergelerinde artışla ilişkili olabileceğini bildirmiştir. Sonuçlar ölçülen belirtece, program içeriğine ve katılımcı özelliklerine göre değiştiğinden, bütün egzersiz şiddetleri için tek bir optimal oksidatif yanıt varsayılamaz (Robinson vd., 2017; Ye vd., 2021).

3.8. Kas-beyin iletişimi: Miyokinler, irisin, katepsin B ve kinürenin

Miyokinler, kas dokusunun aktivitesi sırasında salgılanabilen ve başka organlarla iletişimde rol oynayabilen biyolojik sinyallerdir. İrisin, FNDC5 adlı öncü proteinle ilişkili bir molekül olarak kas-beyin iletişimi tartışmalarında öne çıkmıştır. Lourenco ve arkadaşlarının araştırması, Alzheimer hastalığı modellerindeki farelerde FNDC5/irisin yolunun sinaptik işlev ve bellekle ilişkili olabileceğini; insan doku ve sıvı örneklerinde de belirli farklılıklar bulunduğunu göstermiştir. Ancak deneysel modelde gözlenen düzelme, insanlarda irisin üzerinden

klinik tedavi başarısı gösterildiği anlamına gelmez (Lourenco vd., 2019).

Katepsin B, kas aktivitesinden etkilenebilen başka bir aday biyolojik aracıdır. Moon ve arkadaşlarının çalışmasında hücre kültürü, fare, primat ve insan verileri birlikte değerlendirilmiş; farelerde bu proteinin yokluğunda koşuyla ilişkili belirli bilişsel ve nörojenik sonuçların ortaya çıkmadığı, insanlarda ise dolaşımdaki katepsin B değişimlerinin uygunluk ve bellek ölçümleriyle ilişkili olabildiği bildirilmiştir. İnsan bölümündeki ilişki nedensel mekanizmanın kesin olarak doğrulandığı şeklinde yorumlanmamalıdır (Moon vd., 2016).

Kinürenin metabolizmasına ilişkin temel deneysel çalışma, iskelet kasında PGC-1α1 yolunun etkinleşmesinin farelerde stresle ilişkili biyolojik süreçleri değiştirebildiğini göstermiştir. Laktatın olası enerji ve sinyal iletimi işlevleri, farelerle yürütülen deneysel bir çalışmada hipokampal BDNF ve öğrenme göstergeleri bağlamında incelenmiştir (El Hayek vd., 2019). Buna karşın irisin, katepsin B, kinürenin ve laktatın insan beynindeki özgün, birbirinden bağımsız ve klinik açıdan anlamlı katkıları henüz eşit düzeyde kanıtlanmış değildir (Agudelo vd., 2014; Lourenco vd., 2019; Moon vd., 2016).

3.9. Nörotransmiterler ve hormonal düzenleme

Dopamin, serotonin, noradrenalin ve gama-aminobütirik asit (GABA), dikkat, motivasyon, duygudurum, hareket ve uyarılma düzeyiyle ilişkili nörotransmiter sistemleridir. Egzersiz bu sistemleri doğrudan veya dolaylı biçimde etkileyebilecek fizyolojik değişimlerle ilişkilendirilmektedir. Endorfinler ve diğer nörokimyasal süreçler de egzersiz sonrasında bazı bireylerde iyi oluş hissine katkıda bulunabilir. Bununla birlikte çoğu insanda bütün nörotransmiterlerin tek bir egzersiz sonrasında aynı yönde değiştiğini söylemek bilimsel olarak doğru değildir (Meeusen & De Meirleir, 1995; Noetel vd., 2024).

Hipotalamus-hipofiz-adrenal eksen, vücudun stres yanıtında görev alan hormonal sistemdir. Kortizol yanıtı egzersizin

şiddetine, süresine, antrenman geçmişine, uyku durumuna ve psikolojik bağlama göre değişebilir. Düzenli ve yönetilebilir fiziksel aktivite stresle başa çıkma kapasitesini destekleyebilirken aşırı yüklenme, yarışma baskısı ve yetersiz toparlanma olumsuz duygudurumla ilişkili olabilir. Psikolojik etkileri yalnızca serotonin veya endorfin artışına indirgemek, sosyal deneyim, öz yeterlik ve uyku gibi eşzamanlı süreçleri gözden kaçırır (Munro vd., 2026; Noetel vd., 2024).

3.10. Uyku, bilişsel toparlanma ve glimfatik sistem

Uyku, dikkat, bellek pekişmesi, duygusal düzenleme ve metabolik toparlanma için önemlidir. 81 randomize araştırmayı değerlendiren meta-analiz, fiziksel egzersizin öznel uyku kalitesi ve nesnel uyku verimliliği göstergelerinde ortalama iyileşmelerle ilişkili olduğunu bildirmiştir. Ancak egzersiz türleri arasındaki sıralamalar, çalışmaların karşılaştırılabilirliğine ve kullanılan ölçeklere bağlıdır. Gece geç saatlerde uygulanan yoğun egzersizin etkisi kişiden kişiye farklılaşabileceğinden uyku planı bireyselleştirilmelidir (Zhou vd., 2025).

Glimfatik sistem, beyin dokusundaki sıvı hareketleri ve metabolik atıkların uzaklaştırılmasıyla ilişkili olduğu düşünülen bir çerçevedir. Uyku fizyolojisinin bu süreçle ilişkisine yönelik araştırmalar ilgi çekicidir; ancak ölçümlerin önemli bölümü deneysel modellerden veya dolaylı insan göstergelerinden oluşmaktadır. Egzersizin insan beyninde glimfatik temizliği kesin olarak artırdığı ya da Alzheimer patolojisini bu yolla doğrudan azalttığı söylenemez. Güncel değerlendirmeler, mekanizmanın klinik öneminin ve müdahale koşullarının henüz netleşmediğini göstermektedir (van Hattem vd., 2025).

Tablo 1. Fiziksel aktivitenin beyin sağlığıyla ilişkili mekanizmaları ve kanıt sınırları

Mekanizma	Olası işlev	Öne çıkan insan kanıtı	Temel yorum sınırı
Nöroplastisite ve hipokampus	Ağ uyumu; öğrenme ve bellekle ilişkili yapısal değişim	Bazı randomize çalışmalar ve görüntüleme derlemeleri	Bütün görüntüleme sonuçları aynı yönde değildir.
BDNF, IGF-1 ve FGF-21	Nörotrofik sinyal ve hücresel uyumla ilişkili dolaşımsal göstergeler	Aerobik ve direnç programlarında periferik biyobelirteç ölçümleri	Kan düzeyi, beyin dokusundaki değişimin doğrudan ölçümü değildir.
Serebrovasküler düzenleme	Damar işlevi, metabolik destek ve kardiyovasküler risk yönetimi	Fiziksel uygunluk, damar ölçümü ve seçilmiş görüntüleme sonuçları	Kan akımı değişimi, klinik bilişsel yararı kendiliğinden kanıtlamaz.
İnflamasyon ve metabolizma	Sistemik inflamatuvar yük ile enerji kullanımının düzenlenmesi	Direnç antrenmanı ve metabolik göstergelere ilişkin meta-analizler	Sistemik inflamasyon, merkezi nöroinflamasyonla eşit değildir.
Kas-beyin sinyalleri	İrisin, katepsin B, kinürenin ve laktatın aday aracı rolleri	Sınırlı insan göstergeleri; çok sayıda hayvan ve hücre çalışması	Deneysel mekanizma, insanlarda kanıtlanmış tedavi değildir.
Uyku ve stres	Uyku kalitesi, davranışsal düzenleme ve toparlanma	Uyku meta-analizleri ve depresyon/ anksiyete derlemeleri	Glimfatik etki insanlarda doğrudan ve kesin gösterilmiş değildir.

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (El Hayek vd., 2019; Erickson vd., 2011; Lourenco vd., 2019; Maass vd., 2016; Polacchini vd., 2015; Qipo vd., 2026; van Hattem vd., 2025; Ye vd., 2021).



Şekil 1. Fiziksel aktivite ile beyin sağlığı arasındaki çok düzeyli mekanizma modeli

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Lourenco vd., 2019; Maass vd., 2016; Qipo vd., 2026; World Health Organization, 2022).

4. FİZİKSEL AKTİVİTE VE BİLİŞSEL İŞLEVLER

4.1. Dikkat, çalışma belleği ve yürütücü işlevler

Dikkat, çevresel uyaranlardan hangisinin işleneceğinin seçilmesiyle; çalışma belleği ise kısa süreli bilginin kullanılması ve güncellenmesiyle ilişkilidir. İnhibitör kontrol, bilişsel esneklik ve planlama gibi yürütücü işlevler özellikle okul, iş yaşamı ve güvenli hareket açısından önemlidir. Egzersiz sonrasında ölçülen iyileşmeler, kullanılan testin türüne ve değerlendirme zamanına göre değişebilir. Bir görevde daha hızlı yanıt verilmesi, bütün bilişsel alanların aynı ölçüde geliştiğini göstermez (Chang vd., 2025; Diamond, 2013).

Singh ve arkadaşlarının 2025 tarihli üst derlemesinde 133 sistematik derleme, 2.724 randomize araştırma ve 258.279 katılımcıya dayalı bir sentez sunulmuştur. Genel biliş için bildirilen standartlaştırılmış ortalama fark 0,42; bellek için 0,26; yürütücü işlevler için 0,24 olarak raporlanmıştır. Bu sayılar çalışmaların ortalama etkilerini göstermekte olup her bireyin aynı ölçüde yarar sağlayacağını veya bütün çalışmaların birbirinden bağımsız olduğunu göstermez. Üst derlemelerde aynı birincil araştırmanın farklı meta-analizlerde yeniden yer alması da sonuçların yorumunda dikkate alınmalıdır (Singh vd., 2025).

4.2. Tek egzersiz seansının kısa süreli etkileri

Akut egzersiz araştırmaları, bir yürüyüş, bisiklet veya benzeri hareket seansı sonrasında bilişsel performansın kısa süreli olarak değişip değişmediğini inceler. Chang ve arkadaşlarının 2025 tarihli meta-derlemesinde 30 sistematik derleme üzerinden dikkat, yürütücü işlev, bellek ve bilgi işleme gibi alanlarda küçükten orta büyüklüğe uzanan ortalama etkiler bildirilmiştir. Değişim, egzersizin hemen sonrasında veya belirli bir toparlanma süresinden sonra ölçülebilir; bu nedenle zamanlama önemlidir (Chang vd., 2025).

Akut fayda olasılığı, sınavdan önce bütün öğrencilerin yoğun koşu yapması gerektiği anlamına gelmez. Çok yüksek şiddetli veya uzun seanslar, sıvı kaybı, yorgunluk ve aşırı uyarılma nedeniyle bazı görevlerde performansı düşürebilir. Uygulanabilir bir yaklaşım; uzun süreli zihinsel çalışmayı kısa yürüyüşler veya rahat hareket aralarıyla bölmek, sonrasındaki dikkat düzeyini kişisel deneyime göre izlemektir. Bu öneri, kısa süreli bilişsel etkinin kalıcı yapısal beyin değişimine dönüştüğü iddiasından ayrılmalıdır (Chang vd., 2025; Riebe vd., 2015).

4.3. Düzenli egzersizin uzun dönemli etkileri ve çelişkili bulgular

Düzenli egzersiz çalışmalarında müdahale süresi, karşılaştırma grubunun niteliği, başlangıçtaki bilişsel durum, katılım uyumu ve seçilen testler sonucu etkiler. Sağlıklı bireylerde egzersizin bilişsel performansa etkisini değerlendiren Ciria ve arkadaşları, temel randomize çalışmalarda düşük istatistiksel güç, seçici raporlama ve yayın yanlılığı bulunabileceğini göstermiştir. Ortalama etki, aktif kontrol ve başlangıç farkları hesaba katıldığında küçülmüş; yayın yanlılığına yönelik düzeltme sonrasında ihmal edilebilir düzeye yaklaşmıştır. Bu sonuç, egzersizin genel sağlık yararlarını ortadan kaldırmaz; yalnızca sağlıklı bireylerde bilişsel nedensellik iddialarının dikkatli kurulması gerektiğini gösterir (Ciria vd., 2023).

Aynı literatürde olumlu sonuçlar bildiren daha geniş üst derlemeler de bulunmaktadır. Bu farklılık; dahil edilen popülasyonların sağlıklı ya da klinik olması, çocukların ve yaşlıların aynı analizde değerlendirilmesi, kullanılan aktif kontrol türü ve istatistiksel işlemlerle ilişkili olabilir. Bu nedenle uygun sentez, bir araştırmayı seçerek ötekini yok saymak değil; hangi sorunun, hangi popülasyonda, hangi kontrol koşuluyla yanıtlandığını açıklamaktır. Günlük işlevsellikte hissedilir bir değişim ile laboratuvar testinde istatistiksel anlamlılık arasında da ayrım yapılmalıdır (Ciria vd., 2023; Singh vd., 2025; Sun vd., 2025).

5. EGZERSİZ TÜRLERİNE GÖRE BEYİN SAĞLIĞI

5.1. Aerobik egzersiz

Yürüyüş, koşu, bisiklet ve yüzme gibi aerobik etkinlikler, beyin sağlığı literatüründe en çok araştırılan uygulamalar arasındadır. Bu etkinlikler kardiyorespiratuvar uygunluk, damar sağlığı, uyku ve duygudurum üzerinden olası katkılar sağlayabilir. Yürüyüşün özel avantajı, birçok birey için düşük maliyetli ve kolay uyarlanabilir olmasıdır. Bununla birlikte güvenli yol, iklim koşulları, hareket kısıtlılığı ve mahalle güvenliği gibi

etkenler erişimi belirleyebilir (Erickson vd., 2011; Sallis vd., 2016; World Health Organization, 2020).

Aerobik antrenmanların bilişsel sonuçları katılımcının başlangıç uygunluğuna ve karşılaştırma grubuna göre değişmektedir. Erickson ve arkadaşlarının klasik çalışması olumlu hipokampal hacim sonuçları bildirmiş olsa da EXERT araştırmasında aerobik çalışma, germe-denge-hareket açıklığı etkinliklerini içeren aktif karşılaştırma grubuna karşı temel bilişsel ölçümlerde anlamlı üstünlük göstermemiştir. Bu nedenle aerobik egzersizin değerini teslim etmekle birlikte, bütün diğer hareket türlerinden kesin olarak üstün olduğunu söylemek doğru değildir (Baker vd., 2025; Erickson vd., 2011).

5.2. Direnç egzersizi

Direnç egzersizleri kasların bir yüke karşı çalışmasını sağlar; vücut ağırlığı, direnç bandı, serbest ağırlık veya egzersiz makineleri kullanılabilir. Kas kuvveti, denge, günlük işlevsellik ve metabolik sağlık üzerindeki yararlar özellikle ileri yaşta önemlidir. Bilişsel sonuçlar ise araştırma protokolüne, egzersizin süresine ve katılımcı özelliklerine göre değişmektedir. Programın iyi yönetilmesi, düşme korkusu olan veya günlük yaşamda kuvvet kaybı yaşayan bireylerde katılım güvenliğini artırabilir (Qipo vd., 2026; Robinson vd., 2017; World Health Organization, 2020).

2026 tarihli bir meta-analiz, ileri yaştaki bireylerde direnç antrenmanının dolaşımdaki IGF-1 ve BDNF gibi belirteçlerde artış, bazı inflamatuvar göstergelerde azalma bildirmiştir. Önceki bir BDNF meta-analizinde aerobik müdahaleler için daha belirgin değişimler saptanmışken, yeni araştırmaların farklı örneklem ve egzersiz dozları kullandığı unutulmamalıdır. Güncel ve eski sonuçlar arasındaki farklılık, direnç egzersizinin etkisiz olduğu veya bütün biyobelirteçlerde üstün olduğu şeklinde yorumlanmamalıdır (Dinoff vd., 2016; Qipo vd., 2026).

5.3. Kombine ve çok bileşenli programlar

Aerobik ve kuvvet çalışmalarını bir araya getiren programlar, aynı anda dayanıklılık, kas gücü, denge ve günlük işlevselliği hedefleyebilir. Çok bileşenli uygulamalar bu iki boyuta esneklik, koordinasyon, bilişsel görev ve sosyal katılım da ekleyebilir. Böyle bir yapı, özellikle yaşlı bireylerde yalnızca bir laboratuvar çıktısına değil bütüncül yaşam kapasitesine odaklanma avantajı sağlar (Saunders vd., 2025; World Health Organization, 2020).

Ancak birden fazla bileşenin birlikte sunulması, hangi unsurun etkiden sorumlu olduğunu belirlemeyi güçleştirir. İnme sonrası kombine antrenmanı değerlendiren Cochrane derlemesi, bazı işlevsel ve uygunluk göstergelerini incelerken mortalite veya tekrarlayan olaylar açısından kesin yarar ortaya koymamıştır. Bu durum, kombine egzersizin gereksiz olduğu anlamına değil; değerlendirilen sonucun ve kanıt belirsizliğinin açıkça belirtilmesi gerektiğine işaret eder (Saunders vd., 2025).

5.4. Koordinasyon, beceri ve dans temelli etkinlikler

Dans, raket sporları, takım oyunları ve çift görevli denge çalışmaları; hareket planlama, ritim, dikkat, çevresel ipuçları ve sosyal etkileşimi birleştirebilir. Özellikle sürekli karar vermeyi gerektiren etkinliklerde motor öğrenme ile bilişsel yük eşzamanlıdır. Ancak bu etkinliklerin özgün üstünlüğünü belirlemek için aynı egzersiz süresi ve şiddetine sahip uygun karşılaştırma grupları gerekir (Diamond, 2013; Ernst vd., 2024; Prates vd., 2025).

2025 tarihli bir üst derleme, bilişsel bozukluğu olan ileri yaştaki bireylerde dans müdahalelerinin bazı küresel biliş ve yürütücü işlev göstergeleriyle olumlu ilişkisini bildirmiştir. Bununla birlikte dahil edilen sistematik derlemelerin tamamı düşük veya çok düşük yöntemsel nitelikte değerlendirilmiştir. Dolayısıyla dans, sosyal açıdan çekici ve araştırmaya değer bir

rekreatif seçenek olmasına rağmen kanıtın kesinliği sınırlıdır (Prates vd., 2025).

5.5. Zihin-beden uygulamaları

Yoga ve tai chi gibi zihin-beden uygulamaları hareket, nefes düzeni, dikkat yönlendirme ve beden farkındalığını birleştirir. Denge güçlüğü, yüksek stres veya yoğun egzersize karşı çekingenlik yaşayan bireyler için uyarlanabilir seçenekler sunabilir. Depresyon ve uyku sonuçlarına ilişkin araştırmalar bu uygulamaları değerlendirmiştir; ancak eğitmenin niteliği, uygulamanın biçimi ve seans yapısı çalışmadan çalışmaya farklılık gösterir (Noetel vd., 2024; Zhou vd., 2025).

Bu etkinliklerin psikolojik yararları yalnızca bir nefes tekniğine veya belirli bir kültürel yönteme bağlanmamalıdır. Düzenli katılım, güvenli grup ortamı, beklenti etkileri, bedensel farkındalık ve düşük yoğunluklu hareket birlikte rol oynayabilir. Klinik hastalığı olan bireylerde zorlayıcı pozisyonlar, ortostatik belirtiler ve denge riski açısından uyarlama yapılması gerekebilir (Noetel vd., 2024; Riebe vd., 2015; Zhou vd., 2025).

5.6. Doğa temelli fiziksel aktivite

Doğa yürüyüşü, park egzersizi, bahçecilik ve su kenarında yapılan hareketli etkinlikler, fiziksel aktiviteyi çevresel deneyimle birleştirir. Doğa temelli müdahalelerin sistematik değerlendirmesinde yetişkinlerde depresif duygudurum, kaygı ve olumlu duygulanım açısından iyileşmeler bildirilmiştir. Bununla birlikte doğaya maruz kalma, egzersiz yükü, grup desteği ve günlük rutinden uzaklaşma gibi bileşenlerin katkısı her çalışmada birbirinden ayrılmamıştır (Coventry vd., 2021).

Doğa temelli rekreasyonun uygulanması için güvenli ulaşım, hava koşulları, erişilebilir parkurlar, sıcaklık ve engelli katılımcılara uygun düzenlemeler önemlidir. Kent içinde yeşil alanların eşit dağılmaması, bu yaklaşımın yalnızca bireysel motivasyonla çözülemeyeceğini gösterir. Kısa park yürüyüşleri de değerlidir; ancak doğanın bütün ruhsal sorunları tedavi

ettiği şeklindeki romantikleştirici yorumlardan kaçınılmalıdır (Coventry vd., 2021; Sallis vd., 2016; United Nations, 2006).

5.7. Sosyal ve rekreatif katılım

Grup yürüyüşleri, kampüs sporları, yaşlı merkezlerindeki dans dersleri ve mahalle etkinlikleri, hareketin yanında aidiyet ve sosyal destek sağlayabilir. Egzersizin depresyon ve anksiyete belirtileri üzerindeki etkilerini inceleyen 2026 tarihli üst değerlendirmede grup halinde ve gözetim altında uygulanan programların bazı alt gruplarda daha olumlu sonuçlarla ilişkili olabileceği bildirilmiştir. Ancak bu tür analizler, sosyal temasın tek başına etkisini belirlemek için tasarlanmış değildir (Munro vd., 2026).

Rekreasyon açısından temel soru yalnızca "hangi egzersiz daha etkilidir?" değil, "hangi etkinlik hangi birey tarafından düzenli, güvenli ve anlamlı biçimde sürdürülebilir?" sorusudur. Bireyin tercihine, utanma duygusuna, ulaşım koşullarına ve zamanına uyarlanmayan yüksek nitelikli bir programın pratik etkisi düşük kalabilir. Etkinliğin gönüllülüğü, eğlence düzeyi ve sosyal güvenliği bu nedenle program tasarımının merkezinde yer almalıdır (Bauman vd., 2012; Rhodes & Kates, 2015; World Health Organization, 2018).

Tablo 2. Egzersiz türleri, beyin sağlığı hedefleri ve uygulama koşulları

Etkinlik türü	Örnek uygulama	Olası hedef	Uygulama notu
Aerobik	Tempolu yürüyüş, bisiklet, yüzme	Damar sağlığı, uygunluk, duygudurum	Şiddet başlangıç düzeyine göre artırılmalıdır.
Direnç	Elastik bant, vücut ağırlığı, ağırlık çalışması	Kas gücü, işlevsel bağımsızlık, dolaşımsal biyobelirteçler	Hareket tekniği, eklem ağrısı ve toparlanma izlenmelidir.

Etkinlik türü	Örnek uygulama	Olası hedef	Uygulama notu
Denge ve koordinasyon	Destekli denge, çift görev, yön değiştirme	Düşme riskinin yönetimi ve motor planlama	Denge güçlüğünde gözetim ve tutunma desteği gerekir.
Dans ve beceri	Ritmik grup dansı, uyarlanmış oyun	Motor-bilişsel katılım ve sosyal etkileşim	Bilişsel üstünlük iddiaları düşük nitelikli kanıtla sınırlıdır.
Zihin-beden	Yoga, tai chi, nefes eşliğinde hareket	Beden farkındalığı, denge ve stres yönetimi	Zorlayıcı pozisyonlar kişisel duruma göre uyarlanır.
Doğa ve sosyal rekreasyon	Park yürüyüşü, bahçecilik, mahalle grubu	Katılımın sürekliliği, iyi oluş ve aidiyet	Ulaşım, sıcaklık, maliyet ve erişilebilirlik planlanır.

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Coventry vd., 2021; Munro vd., 2026; Noetel vd., 2024; Prates vd., 2025; Qipo vd., 2026; Singh vd., 2025).



Şekil 2. Egzersiz türleri, uygulama hedefleri ve kişiselleştirilmiş program ilişkisi

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Noetel vd., 2024; Prates vd., 2025; Rhodes & Kates, 2015; World Health Organization, 2020).

6. Yaşam Seyri Boyunca Fiziksel Aktivite ve Beyin Sağlığı

Beyin sağlığına yönelik fiziksel aktivite tek bir yaş grubuna ait önleyici bir davranış değildir. Erken dönemde motor beceriler ve öz düzenleme, yetişkinlikte stres yönetimi ve kardiyovasküler risk, ileri yaşta ise işlevsel bağımsızlık ve sosyal katılım daha görünür hedefler hâline gelebilir. Aynı etkinlik farklı dönemlerde farklı anlam taşıyabileceği için öneriler takvim yaşının yanında gelişim düzeyi, hastalık yükü, aile sorumlulukları, çevresel olanaklar ve kişisel tercihler dikkate alınarak düzenlenmelidir (Bauman vd., 2012; World Health Organization, 2020; World Health Organization, 2022).

6.1. Çocukluk: Hareket, öğrenme ve oyun

Çocukluk çağında hareket, yalnızca gelecekte görülebilecek hastalıkları önlemeye dönük bir yatırım olarak değerlendirilmemelidir. Oyun, beden eğitimi ve açık hava etkinlikleri; motor yeterlik, akran ilişkileri, sıra bekleme, kurala uyum ve öz düzenleme için güncel öğrenme ortamları oluşturur. Okul temelli beden eğitimi müdahalelerini inceleyen sistematik derleme, bazı bilişsel ve akademik sonuçlarda iyileşme olabileceğini göstermiştir; ancak programların içeriği, süresi ve ölçümleri oldukça değişkendir (García-Hermoso vd., 2021).

Özellikle çocuklar için tek biçimli, performans odaklı veya cezalandırıcı bir egzersiz dili sakıncalıdır. Bedensel yeterlik farklılıkları olan çocukların başarı duygusu yaşayabileceği oyun seçenekleri sunulmalı; yarışmaya katılmak istemeyenler hareketten bütünüyle uzaklaştırılmamalıdır. Beden eğitimi dersinin sınav hazırlığı gerekçesiyle sistematik olarak azaltılması, fiziksel hareket kadar okul aidiyetini ve sosyal deneyimi de sınırlayabilir. Hareketli teneffüsler, aktif ulaşım ve kısa sınıf içi etkinlikler, günlük akışı değiştirmeden uygulanabilecek örneklerdir (Leahy vd., 2025; UNESCO, 2015; World Health Organization, 2020).

6.2. Ergenlik: Duygusal düzenleme ve ekran bağlamı

Ergenlikte uyku düzenindeki değişim, akademik beklentiler, beden algısı ve dijital iletişim davranışları fiziksel aktivitenin etkisini biçimlendirebilir. Egzersiz, kaygı ve depresif belirtileri azaltmada destekleyici olabilir; bununla birlikte ergenin yaşadığı zorbalık, aile çatışması veya klinik depresyon yalnızca spor önerisiyle çözülemez. Ekran süresi araştırmalarında en güvenilir yaklaşım, toplam süreyi tek başına suçlamak yerine içeriği, kullanım saatini ve uykunun yer değiştirmesini birlikte incelemektir (Santos vd., 2023; Stiglic & Viner, 2019).

Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu tanısı olan çocuk ve ergenler için yakın dönemli sistematik derlemeler fiziksel aktivitenin belirtiler ve ilişkili işlevler açısından olası yararlarını araştırmıştır. Ancak örneklemler küçük, etkinlikler farklı ve takip süreleri genellikle kısadır. Dolayısıyla hareket, eğitimsel düzenlemelerin veya hekim tarafından planlanan tedavinin yerine değil; bireyin tercihleriyle uyumlu, güvenli bir destek bileşeni olarak düşünülmelidir (Leahy vd., 2025; Zheng vd., 2025).

6.3. Yetişkinlik: İş yaşamı, bakım emeği ve davranışın sürekliliği

Yetişkinlik döneminde fiziksel aktiviteyi kısıtlayan etmenler arasında uzun çalışma saatleri, ulaşım süresi, vardiyalı çalışma, bakım sorumlulukları ve güvencesiz istihdam yer alır. Bu nedenle haftalık hareket hedefi yalnızca spor salonuna erişim üzerinden tanımlanmamalıdır. Kısa yürüyüşler, merdiven kullanımı, ev içi direnç çalışmaları ve uygun olduğunda bisikletle ulaşım da anlamlı seçenekler olabilir. Gün içine yayılan etkinlikler, hareketsiz dönemleri kesintiye uğratması bakımından ayrıca yarar sağlayabilir (World Health Organization, 2020).

Orta yaşta hipertansiyon, diyabet, sigara kullanımı, işitme kaybı ve sosyal izolasyon gibi değiştirilebilir risklerin yönetimi önem kazanır. Demans önleme üzerine Lancet Komisyonu,

yaşam boyunca ele alınan 14 değiştirilebilir etmenin birlikte yaklaşık %45'lik bir önlenebilirlik potansiyeliyle ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu oran fiziksel aktivitenin tek başına sağlayacağı etki değildir; birden çok risk etmenine ilişkin modellemeye dayanır ve bireysel düzeyde kesin önleme vaadi şeklinde yorumlanmamalıdır (Livingston vd., 2024).

6.4. İleri yaş: İşlevsel bağımsızlık ve katılım

İleri yaşta beyin sağlığı için fiziksel aktivitenin amacı yalnızca bilişsel test puanlarını artırmak değildir. Kas gücünün korunması, düşme korkusunun azaltılması, evden bağımsız çıkabilme, sosyal etkileşim ve günlük yaşam etkinliklerini sürdürebilme de klinik olarak anlamlı sonuçlardır. Aerobik hareket, kas güçlendirme ve denge çalışmasının bir araya getirilmesi, tek bir bilişsel hedefe odaklanmaktan daha bütüncül bir yaklaşım sağlar (Singh vd., 2025; World Health Organization, 2020).

İleri yaş grubunda başlangıç düzeyi, kırılganlık, görme ve işitme sorunları, ağrı, ilaç kullanımı ve ulaşım olanakları programı belirler. Sandalyeden kalkma çalışmaları, destekli denge uygulamaları, kısa yürüyüşler ve sevilen müzik eşliğinde ritmik hareketler, yüksek eforlu antrenmanlar kadar ciddi bir programlama gerektirebilir. Bilişsel bozukluğu olan bireylerde karmaşık yönergelerin sadeleştirilmesi, tekrarlı yapı kurulması ve gerekirse bakım veren desteği sağlanması önemlidir (Baker vd., 2025; Riebe vd., 2015; World Health Organization, 2020).

Bununla birlikte ileri yaşta artmış aktivitenin bütün bireylerde aynı bilişsel sonucu doğuracağı ileri sürülemez. Hafif bilişsel bozukluğu olan yetişkinlerde EXERT çalışması, gözetimli aerobik egzersizi aktif bir germe-denge-hareket açıklığı programıyla karşılaştırmış; 12 ay sonunda birincil bilişsel sonuçta iki aktif grup arasında üstünlük göstermemiştir. Bulgular, anlamlı sosyal temas ve hareket içeren karşılaştırma programlarının da önem taşıyabileceğini; "daha yoğun olan

her zaman daha iyidir" yargısının her klinik durumda desteklenmediğini düşündürmektedir (Baker vd., 2025).

Tablo 3. Yaşam dönemlerine göre beyin sağlığı hedefleri ve fiziksel aktivite örnekleri

Yaşam dönemi	Öncelikli hedef	Örnek etkinlik	Dikkat edilecek nokta
Çocukluk	Motor öğrenme, oyun ve öz düzenleme	Hareketli teneffüs, kapsayıcı beden eğitimi, aktif oyun	Yarışma baskısı ve beceriye göre dışlama önlenmelidir.
Ergenlik	Duygusal düzenleme, uyku ve akran ilişkisi	Seçime dayalı takım oyunu, yürüyüş, dans	Beden algısı, zorbalık ve ekran kullanımının bağlamı önemlidir.
Yetişkinlik	Stres yönetimi, damar sağlığı, günlük hareket	Aktif ulaşım, kısa yürüyüş araları, kuvvet çalışması	Çalışma saati, bakım sorumluluğu ve maliyet hesaba katılır.
İleri yaş	İşlevsel bağımsızlık, denge ve sosyal katılım	Yürüyüş, otur-kalk çalışması, denge, uyarlanmış dans	Düşme riski, kırılganlık ve erişilebilir ulaşım değerlendirilir.

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Baker vd., 2025; García-Hermoso vd., 2021; Leahy vd., 2025; Livingston vd., 2024; UNESCO, 2015; World Health Organization, 2020).



Şekil 3. Yaşam seyri boyunca fiziksel aktivite ve beyin sağlığı öncelikleri

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Bauman vd., 2012; Livingston vd., 2024; UNESCO, 2015; World Health Organization, 2022).

7. Ruh Sağlığı, Stres Yönetimi ve Uyku

7.1. Depresif belirtiler

Fiziksel aktivitenin ruh sağlığıyla ilişkisi biyolojik düzenleme, davranışsal etkinleşme, öz yeterlik ve sosyal temasın kesişiminde değerlendirilmelidir. Ruh sağlığının korunmasında fiziksel aktiviteyle birlikte bireysel psikolojik kaynakların da dikkate alınması gerekmektedir. Şahinler, Dindar ve Koç (2026), psikolojik esneklik, mindfulness ve öz-şefkatin ruh sağlığıyla güçlü ve pozitif ilişkiler gösterdiğini; özellikle psikolojik esnekliğin ruh sağlığıyla anlamlı bir doğrudan ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Psikolojik dayanıklılık ve öz-yeterlik gibi bireysel psikolojik kaynakların sağlıkla ilişkili sonuçlar açısından birlikte değerlendirilmesi de önemlidir. Şahinler ve arkadaşlarının (2025) özel eğitim öğretmenleri üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada psikolojik dayanıklılığın sağlık kaygısıyla negatif ve anlamlı bir ilişki gösterdiği, öz-yeterlik algısının da sağlık kaygısını negatif yönde yordadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte öz-yeterliğin psikolojik dayanıklılık ile sağlık kaygısı arasındaki ilişkide anlamlı bir aracılık rolü göstermediği raporlanmıştır. Bu bulgular, fiziksel aktivitenin ruh sağlığı üzerindeki potansiyel katkılarının değerlendirilmesinde psikolojik düzenleme kaynaklarının da bütüncül biçimde ele alınması gerektiğini düşündürmektedir. Depresyon için farklı egzersiz türlerini karşılaştıran ağ meta-analizi; yürüyüş veya koşu, yoga ve kuvvet antrenmanı gibi yaklaşımların belirtilerde azalmayla ilişkili olabileceğini bildirmiştir. Bununla birlikte körleme zorluğu, beklenti etkileri, müdahale sürelerinin değişkenliği ve yayın yanlılığı olasılığı sonuçların yorumunda dikkate alınmalıdır (Noetel vd., 2024).

Geniş bir üst derleme fiziksel aktivite müdahalelerinin depresyon, anksiyete ve psikolojik sıkıntı üzerinde yararlı etkiler bildirmiş; ancak içerilen birçok derlemenin yöntemsel niteliğinin eleştirel düzeyde düşük olduğunu da vurgulamıştır. Bu bulgu, etkinin olanaksız olduğu anlamına gelmez; etki büyüklüğünün kesinliği ve araştırma tasarımının niteliği konusunda dikkat gerektirir (Singh vd., 2023). Ruhsal belirtileri olan birey

için gerçekçi yorum, hareketin yararlı bir destek olabileceği; ancak tanı, psikoterapi, ilaç tedavisi veya kriz müdahalesinin yerine tek başına geçmeyeceğidir (National Institute for Health and Care Excellence, 2022; World Health Organization, 2023).

7.2. Anksiyete, stres ve davranışsal mekanizmalar

2026 tarihli bir üst değerlendirme, fiziksel aktivitenin depresyon ve anksiyete belirtilerinde ortalama olarak yararlı sonuçlarla ilişkili olduğunu bildirmiştir. Bu tür üst değerlendirmelerde aynı özgün çalışmaların birden fazla sistematik derlemede yer alabileceği unutulmamalıdır. Çalışma sayılarının mekanik biçimde toplanması benzersiz katılımcı sayısını olduğundan büyük gösterebilir; bu nedenle bulguların ağırlığı yalnızca görünürdeki örneklem büyüklüğüyle değerlendirilmemelidir (Munro vd., 2026). Özellikle çocuk ve ergenlerde sosyal kaygı ile duygu düzenleme süreçlerinin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Spor kurslarına katılan gençler üzerinde gerçekleştirilen bir araştırmada sosyal kaygı düzeylerinin duygu düzenleme güçlükleriyle anlamlı biçimde ilişkili olduğu belirlenmiştir (Özcan et al., 2025). Bu bulgu, fiziksel aktivite ve spor ortamlarında psikolojik iyi oluş değerlendirilirken yalnızca kaygı düzeyinin değil, bireyin duygularını düzenleme kapasitesinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Olası mekanizmalar arasında düzenli rutin oluşturma, tehdit odaklı düşünceden geçici uzaklaşma, ustalık duygusu, güvenli sosyal temas ve stres yanıtının düzenlenmesi yer alır. Bununla birlikte grup etkinliği herkeste aynı derecede rahatlatıcı değildir. Sosyal kaygısı olan birey için kalabalık bir sınıf, destekleyici olmak yerine kaygıyı artırabilir. Bu durumda bireysel yürüyüş, küçük grup, çevrimiçi eşlik veya tanıdık bir kişiyle egzersiz daha uygun başlangıç noktalarıdır (Munro vd., 2026; Noetel vd., 2024; Rhodes & Kates, 2015).

7.3. Uyku ve toparlanma

Uyku kalitesini inceleyen bir meta-analiz, farklı egzersiz müdahalelerinin genel popülasyonda özbildirime dayalı uyku göstergelerinde iyileşmeyle ilişkili olabileceğini göstermiştir. Buna karşın egzersizin saati, yoğunluğu, başlangıç uyku sorunu ve kullanılan ölçüm araçları sonuçları değiştirebilir. Her birey için yatmadan önce yoğun antrenmanın zararlı olduğu veya sabah egzersizinin zorunlu biçimde daha iyi olduğu söylenemez (Zhou vd., 2025).

Uyku fizyolojisi ve glifatik temizlenme arasındaki ilişki, nörobilim açısından önemli bir araştırma alanıdır; ancak insanlarda egzersizin glifatik akışı belirli bir oranda artırdığına dair kesin klinik çıkarım yapmak için mevcut kanıt yeterli değildir. Özellikle hayvan modellerinden elde edilen bulgular ile insanlarda dolaylı görüntüleme göstergeleri birbirinden ayrılmalıdır. Uygulamada temel öneri; düzenli uyku saatleri, tolere edilebilir hareket ve gece geç saatlerde uykuyu bozan ekran kullanımının birlikte ele alınmasıdır (Stiglic & Viner, 2019; van Hattem vd., 2025).

7.4. Klinik sınırlar ve olası zararlar

Egzersizin olası yararları, zorlayıcı egzersiz davranışını, klinik belirtilerin göz ardı edilmesini veya denetimsiz yüklenmeyi haklı çıkarmaz. Depresyonun değerlendirilmesinde intihar riski ve tedavi gereksinimi klinik kılavuzlara göre ele alınmalıdır; göğüs ağrısı, bayılma, yeni nörolojik belirti ya da belirgin kardiyovasküler yakınma varlığında egzersiz öncesi veya sırasında profesyonel değerlendirme gerekir. Güvenli yaklaşım, hareketi gerekli ruh sağlığı ve tıbbi bakımın yerine değil, uygun olduğunda onun tamamlayıcısı olarak planlamaktır (National Institute for Health and Care Excellence, 2022; Riebe vd., 2015; World Health Organization, 2023).

8. Nörolojik ve Klinik Durumlarda Fiziksel Aktivite

8.1. Demans ve Alzheimer hastalığı

Demans riskinin azaltılmasında fiziksel aktivite, kardiyovasküler risk yönetimi ve yaşam boyu sosyal katılımla birlikte ele alınmalıdır. Lancet Komisyonu raporundaki yaklaşık %45'lik toplam önlenebilirlik kestirimi, fiziksel aktivite dahil 14 değiştirilebilir risk etmeninin birleşik modeline ilişkindir. Bu nedenle "egzersiz demansın %45'ini önler" biçiminde bir ifade bilimsel olarak hatalıdır (Livingston vd., 2024).

Alzheimer hastalığı ve demansı olan bireylerde egzersiz dozunu inceleyen ağ meta-analizi, çeşitli programların bilişsel sonuçlar üzerinde yararlı olabileceğini belirtmiştir. Ancak çalışmaların süreleri, hastalık evreleri, ölçümleri ve karşılaştırma koşulları farklıdır; dolayısıyla bütün hastalar için kesin ve evrensel bir optimal doz belirlenmiş değildir (Yuan vd., 2024). Klinik programlarda gezinme riski, düşme, iletişim güçlüğü, bakım veren yükü ve aşırı yorgunluk birlikte değerlendirilmelidir (Livingston vd., 2024; Yuan vd., 2024).

8.2. Hafif bilişsel bozukluk

Hafif bilişsel bozuklukta hareket programlarının gerekçesi, yalnızca olası bilişsel değişim değil; kuvvet, güvenli yürüyüş ve günlük işlevlerin korunmasıdır. EXERT çalışmasında 296 yetişkin gözetimli aerobik veya germe-denge-hareket açıklığı programına atanmıştır. On iki ay sonunda bilişsel birincil sonuç bakımından iki aktif yaklaşım arasında istatistiksel üstünlük gösterilmemiştir; sonuç, fiziksel etkinliğin bütün biçimlerinin etkisiz olduğu şeklinde yorumlanmamalıdır (Baker vd., 2025).

Bu örnek, aktif karşılaştırma grubunun araştırma yorumunu nasıl değiştirdiğini gösterir. Her iki grup da düzenli ilgi, yapılandırılmış hareket ve sosyal temas aldığında yalnızca aerobik yoğunluğa atfedilen fark küçülebilir. Hafif bilişsel bozukluğu olan bireylerde güvenli ulaşım, anımsatıcı sistemler,

basit yönergeler ve bakım veren katılımı programın sürdürülebilirliği açısından önemlidir (Baker vd., 2025; Hopewell vd., 2025).

8.3. Parkinson hastalığı

Parkinson hastalığında fiziksel aktivite; yürüme, denge, motor işlev ve yaşam kalitesine odaklanan rehabilitasyonun önemli bileşenlerinden biridir. Güncellenmiş Cochrane ağ meta-analizi 154 randomize çalışma ve 7.837 katılımcıyı değerlendirmiş; farklı fiziksel egzersiz türlerinin motor belirti şiddeti ve yaşam kalitesi açısından yarar sağlayabileceğini, türler arasındaki üstünlük sıralamasının ise kesin olmadığını göstermiştir (Ernst vd., 2024).

Uygulamada ilaçların etki zamanlaması, donma atakları, ortostatik hipotansiyon, çift görev güçlüğü ve düşme öyküsü dikkate alınmalıdır. Dans, ritmik yürüme, denge çalışması ve direnç egzersizi uygun biçimde uyarlanabilir; ancak özellikle ileri evrede gözetim gereksinimi artabilir. Programın başarısı yalnızca motor testler üzerinden değil, bireyin evden çıkabilmesi ve toplumsal etkinliklere katılabilmesi üzerinden de değerlendirilmelidir (Ernst vd., 2024; Osborne vd., 2022).

8.4. İnme sonrası dönem

İnme sonrası fiziksel antrenman, kardiyorespiratuvar uygunluk ve hareket kapasitesinin geliştirilmesinde kullanılabilir. Cochrane derlemesinin güncel değerlendirmesi kardiyorespiratuvar ve karma programların yürüyüşe ilişkin bazı sonuçları iyileştirebildiğini; ancak biliş, bağımsızlık ve uzun dönem klinik sonuçlar için kanıtın müdahale türüne göre değiştiğini göstermektedir (Saunders vd., 2025).

İnme geçiren bireylerde egzersiz reçetesi lezyonun etkileri, kardiyovasküler durum, spastisite, yutma sorunları, iletişim güçlüğü ve düşme riski çerçevesinde hazırlanmalıdır. Toplum temelli rekreasyon, sağlık ekibi tarafından belirlenen güvenlik sınırları içinde planlandığında sosyal izolasyonun

azaltılmasına katkıda bulunabilir. Ancak erken rehabilitasyon, ilaç tedavisi ve sekonder korunma yaklaşımının yerine bağımsız bir spor programı geçirilmemelidir (Riebe vd., 2015; Saunders vd., 2025).

8.5. Multipl skleroz

Multipl sklerozda yorgunluk, bilişsel yakınmalar ve ısı duyarlılığı fiziksel aktiviteye katılımı sınırlayabilir. Randomize çalışmaları inceleyen bir sistematik derleme ve daha yeni bir ağ meta-analizi, farklı egzersiz türlerinin bazı bilişsel sonuçları iyileştirebileceğini bildirmiştir. Bununla birlikte bilişsel alanların ölçüm biçimi, hastalık alt tipi ve müdahale süreleri önemli ölçüde değişmektedir (Li vd., 2023; Su vd., 2025).

Egzersiz programı; aşırı ısınmadan kaçınma, uygun dinlenme aralıkları, semptom dalgalanmalarına göre yük azaltma ve erişilebilir ortam sağlama ilkeleriyle düzenlenmelidir. Serin ortam, parçalı yürüyüş, su içinde etkinlik veya oturarak yapılan direnç çalışmaları bazı bireyler için uygun olabilir. Alevlenme dönemlerinde ve yeni nörolojik belirtilerde sağlık profesyonelinin değerlendirmesi gerekir (Kalb vd., 2020; Li vd., 2023).

8.6. Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu

Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğunda fiziksel aktivite; motor enerjinin düzenlenmesi, yürütücü işlev ve sosyal katılım için tamamlayıcı bir seçenek olarak araştırılmaktadır. Yakın tarihli bir meta-analiz az sayıdaki randomize çalışmada belirti şiddetinde küçük-orta düzeyde olası iyileşmeler bildirmiştir. Ancak çalışma sayısı, örneklemlerin küçüklüğü, müdahale çeşitliliği ve körleme zorluğu nedeniyle kesin tedavi eşdeğerliği ileri sürülemez (Zheng vd., 2025). Spor ortamlarının sosyal çıktıları değerlendirilirken prososyal ve antisosyal davranış örüntülerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Takım sporcularıyla gerçekleştirilen bir araştırmada prososyal ve antisosyal davranış eğilimlerinin eğitim durumu ve spor

yılına göre anlamlı biçimde farklılaştığı bildirilmiştir (Şahinler, 2022). Bu nedenle fiziksel aktivite ve spor programlarının sosyal gelişime katkısı, yalnızca katılım düzeyi üzerinden değil, spor ortamında ortaya çıkan kişilerarası davranış örüntüleri üzerinden de değerlendirilmelidir.

Çocuk ve ergenlerde hareketli oyunlar, kısa seanslar, açık yönergeler ve öngörülebilir rutinler yararlı olabilir. Program, çocuğu "fazla enerjisini atması gereken sorunlu birey" olarak damgalamamalıdır. Okul düzenlemeleri, aile desteği ve klinik tedaviyle uyumlu, başarı deneyimi sağlayan katılımcı bir yapı tercih edilmelidir (Leahy vd., 2025).

8.7. Travmatik beyin hasarı ve sarsıntı

Sarsıntı sonrası fiziksel aktiviteye dönüş, belirtileri yok sayan erken yüksek yoğunluklu antrenman anlamına gelmez. Dokuz randomize çalışma ve 346 katılımcıyı içeren sistematik derleme, aerobik egzersizin sarsıntı ilişkili belirtiler üzerinde yararlı olabileceğini bildirmiştir; ancak egzersiz dozu, hasar sonrası geçen süre ve katılımcı özellikleri çalışmalar arasında değişmiştir (Alashram, 2025).

Baş ağrısı, baş dönmesi, görsel yakınma ve bilişsel zorlanma açısından belirtiler izlenmeli; etkinlik semptomların belirgin biçimde artmasına neden olduğunda yeniden düzenlenmelidir. Temaslı spora dönüş, klinik değerlendirme ve güncel branşa özgü protokollerle belirlenmelidir. Ağır travmatik beyin hasarında ise bireysel nörolojik durum, denge, nöbet öyküsü ve eşlik eden yaralanmalar daha kapsamlı bir rehabilitasyon yaklaşımı gerektirir (Alashram, 2025; Patricios vd., 2023).

Tablo 4. Nörolojik ve klinik durumlarda fiziksel aktivitenin yeri

Klinik durum	Kanıtın desteklediği yaklaşım	Güvenlik önceliği	Yorum sınırı
Demans / Alzheimer	İşlev, hareket ve sosyal katılıma göre uyarlanmış program	Gezinme, düşme ve bakım veren desteği	Kesin koruma veya evrensel ideal doz gösterilmemiştir.
Hafif bilişsel bozukluk	Düzenli aerobik veya düşük yoğunluklu, gözetimli hareket	Basit yönerge, düzenli izlem, ulaşım	EXERT'te iki aktif program arasında bilişsel üstünlük bulunmamıştır.
Parkinson hastalığı	Aerobik, denge, dans ve direnç bileşenleri	Düşme, donma atakları, ilaç zamanlaması	Egzersiz türleri arasında kesin üstünlük sıralaması sınırlıdır.
İnme sonrası	Kardiyorespiratuvar ve direnç içeren kombine rehabilitasyon	Denge, kardiyovasküler risk, gözetim	Yürüme ve dengede olası küçük yararlar; kanıt kesinliği düşüktür.
Multipl skleroz	Yorgunluk ve bilişsel hedefe göre aerobik veya karma program	Isı duyarlılığı, yorgunluk, alevlenme	Hastalık alt tipleri ve bilişsel ölçümler heterojendir.
DEHB	Kısa, yapılandırılmış ve tercih edilen hareketli etkinlikler	Damgalamama, eğitim ve klinik tedaviyle uyum	Az sayıda küçük randomize çalışma bulunmaktadır.
Beyin sarsıntısı / TBI	Semptom izlemine dayalı kademeli aerobik etkinlik	Baş dönmesi, baş ağrısı, spora dönüş kararı	Hasar şiddeti ve zamanlamaya göre genelleme yapılamaz.

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Alashram, 2025; Baker vd., 2025; Kalb vd., 2020; Livingston vd., 2024; Osborne vd., 2022; Patricios vd., 2023; Saunders vd., 2025; Zheng vd., 2025).

9. Egzersiz Dozu ve Uygulama İlkeleri

9.1. Dünya Sağlık Örgütü önerileri

Dünya Sağlık Örgütü, 5–17 yaş grubuna hafta boyunca günde ortalama en az 60 dakika orta-yüksek şiddette, çoğunlukla aerobik fiziksel aktivite önermektedir. Yüksek şiddetli etkinlikler ile kas ve kemiği güçlendiren uygulamalar haftada en az üç gün yer almalıdır. Bu öneri, tüm çocukların her gün kesintisiz 60 dakika organize spor yapması gerektiği anlamına

gelmez; oyun, aktif ulaşım ve okul etkinlikleri de günlük toplamın parçasıdır (World Health Organization, 2020).

Yetişkinler için haftada 150–300 dakika orta şiddette veya 75–150 dakika yüksek şiddette aerobik fiziksel aktivite ya da bunların eşdeğer birleşimi önerilir. Başlıca kas gruplarını içeren kuvvetlendirme etkinlikleri haftada en az iki gün uygulanmalıdır. İleri yaştaki bireylerde, özellikle hareket kısıtlılığı ve düşme riski varsa, kuvvet ile dengeyi içeren çok bileşenli fiziksel aktivite haftada en az üç gün önerilmektedir. Bunlar genel halk sağlığı hedefleridir; belirli bir nörolojik hastalık için otomatik klinik reçete olarak uygulanmamalıdır (World Health Organization, 2020).

9.2. Şiddet, sıklık, süre ve ilerleme

Orta şiddette bir etkinlik sırasında birey çoğu zaman konuşabilir; ancak rahatça şarkı söylemekte zorlanır. Yüksek şiddette etkinlikte konuşma daha kısa cümlelerle sınırlanabilir. Bu konuşma testi, kalp atım hızı ölçümünün bulunmadığı durumlarda yararlı olabilir; ancak beta bloker kullanımı, solunum hastalığı ve konuşma bozuklukları gibi durumlarda tek başına yeterli olmayabilir (Centers for Disease Control and Prevention, 2024; Riebe vd., 2015).

Uzun süre hareketsiz kalan bireyler için ilk hedef, kılavuzdaki üst sınıra hemen ulaşmak değil; güvenli ve düzenli bir başlangıç yapmaktır. Örneğin tolere edilebilen 10 dakikalık yürüyüşlerin haftanın birkaç gününe yerleştirilmesi ve daha sonra süre ya da sıklığın artırılması uygulanabilir. Yük artışı ağrı, aşırı yorgunluk, uyku bozulması ve kişisel toparlanma düzeyi dikkate alınarak kademeli biçimde yapılmalıdır (Riebe vd., 2015; World Health Organization, 2020).

9.3. Bireyselleştirme ve risk değerlendirmesi

Aynı dakika hedefi herkes için eşdeğer yük yaratmaz. İleri yaş, gebelik, kronik hastalık, engellilik, sedatif ilaç kullanımı ve kardiyovasküler semptomlar egzersizin biçimini

değiştirebilir. Düşme öyküsü olan bireylerde dengeli zemin, gerektiğinde tutunma desteği ve uygun ayakkabı önemlidir. Egzersiz sırasında göğüs ağrısı, bayılma, yeni gelişen nörolojik belirti veya olağan dışı nefes darlığı ortaya çıkarsa etkinlik durdurulmalı ve tıbbi değerlendirme alınmalıdır (Riebe vd., 2015; World Health Organization, 2020).

Kılavuzlar "hiç hareket etmemenin" en uygun yaklaşım olduğunu desteklemez; fakat "her koşulda aynı antrenmanı sürdürmek" de güvenli değildir. Bu nedenle program planlamasında bireyin tıbbi öyküsü, önceki hareket deneyimi, erişim koşulları ve etkinlik tercihi birlikte ele alınmalıdır. Özellikle klinik popülasyonlarda egzersiz uzmanı, hekim, fizyoterapist ve gerektiğinde psikolog arasındaki iş birliği uygulamanın niteliğini artırabilir (Riebe vd., 2015; World Health Organization, 2020).

10. Sedanter Davranış, Ekran Süresi ve Dijital Yaşam

Sedanter davranış, uyanıklık sırasında oturma, uzanma veya yatma pozisyonunda ve düşük enerji harcamasıyla gerçekleşen davranışları ifade eder. Yeterli düzeyde haftalık egzersiz yapan bir kişi aynı zamanda uzun süreler hareketsiz oturabilir; dolayısıyla "egzersiz yapıyor olmak" ve "az oturmak" bütünüyle aynı davranış değildir (Tremblay vd., 2017). Ekran kullanımı ise sedanterliğin yalnızca bir biçimidir; her ekran deneyimi aynı sosyal ve bilişsel içeriğe sahip değildir (Santos vd., 2023; Stiglic & Viner, 2019).

Çocuk ve ergenlerde ekran süresiyle ruh sağlığı arasındaki ilişkiyi değerlendiren derlemeler, özellikle uyku kaybı, zorbalık, sorunlu kullanım ve fiziksel etkinliğin yer değiştirmesi gibi bağlamsal unsurların önemine işaret etmektedir. Ancak araştırmaların önemli bölümü gözlemseldir. Ruhsal sıkıntının ekran kullanımını artırması da mümkündür; bu nedenle yalnızca ilişki bulunmasına dayanarak ekranın tek yönlü neden olduğu ileri sürülemez (Santos vd., 2023; Stiglic & Viner, 2019).

Yetişkinlerde uzun oturma süreleri çoğu zaman çalışma koşullarıyla ilişkilidir. Düzenli ayağa kalkma, kısa yürüyüşler, hareketli toplantılar ve uygun çalışma istasyonu düzenlemeleri hareketsiz süreleri azaltmaya yardımcı olabilir. Bununla birlikte erişilebilir tuvalet, dinlenme hakkı veya güvenli yürüyüş alanı olmayan bir işyerinde sorumluluğun bütünüyle çalışana yüklenmesi gerçekçi değildir (Bauman vd., 2012; World Health Organization, 2018; World Health Organization, 2020).

Dijital araçlar fiziksel aktiviteye destek de sağlayabilir. Adım sayacı, uzaktan egzersiz sınıfı ve anımsatıcı uygulamalar bazı bireylerde davranışın sürdürülmesini kolaylaştırabilir. Ancak ticari giyilebilir cihazların ölçüm doğruluğu cihaz türüne, kullanım konumuna ve aktivite biçimine göre değişir; ham adım sayısı bütün bedensel hareketi veya bilişsel yararı doğrudan ölçmez (Evenson vd., 2015). Dijital hedefler, suçluluk veya zorlayıcı davranış oluşturmadan bireyin gerçek yaşam koşullarına göre düzenlenmelidir (Rhodes & Kates, 2015; World Health Organization, 2021).

11. Sosyal Eşitsizlikler ve Erişim

Fiziksel hareketsizlik küresel ölçekte yaygındır; 2000–2022 yıllarını kapsayan birleştirilmiş analizde 2022 yılında yetişkinlerin yaklaşık üçte birinin önerilen fiziksel aktivite düzeyine ulaşmadığı bildirilmiştir. Ülke, cinsiyet ve yaşa göre belirgin farklılıklar bulunması, sorunun yalnızca kişisel isteksizlikle açıklanamayacağını göstermektedir (Strain vd., 2024).

Fiziksel aktiviteye katılım; yaş, sağlık durumu, kişisel tercih, sosyal destek ve yapılı çevre gibi birbiriyle ilişkili belirleyicilerden etkilenir. Çok ülkeli bir çalışmada mahalle özellikleri ile yetişkinlerin fiziksel aktivite düzeyleri arasında ilişkiler bildirilmiştir. Güvenli yaya alanları, ulaşım, ücretlendirme ve engelli bireylerin erişimi bu nedenle yalnızca bireysel motivasyon sorunu olarak değerlendirilemez; ancak gözlemsel çevre araştırmaları tek başına nedensellik kanıtı sağlamaz (Bauman vd., 2012; Sallis vd., 2016; United Nations, 2006; World Health Organization, 2018).

Beyin sağlığı yaklaşımı, aynı önerinin tüm bireylere eşit yarar sağlayacağını varsaymamalıdır. Parkların güvenliği, okul beden eğitiminin niteliği, mahalle yürünebilirliği ve düşük maliyetli toplum programları davranışın toplumsal belirleyicileridir. Rekreasyon uzmanları bu nedenle yalnızca egzersiz içeriğini değil, kayıt koşullarını, fiziksel erişimi, ücretlendirmeyi ve katılımcıların kendilerini güvende hissetmesini de değerlendirmelidir (Sallis vd., 2016; UNESCO, 2015; World Health Organization, 2018).

Erişilebilirlik değerlendirmesinde katılımcının etkinliğe başvurabilmesi yeterli değildir. Etkinlik alanına bağımsız ulaşım, giriş basamakları, aydınlatma, oturma ve dinlenme alanları, erişilebilir tuvalet, işaret dili veya sadeleştirilmiş yönerge gereksinimi ve yardımcı cihazlarla hareket edebilme birlikte düşünülmelidir. Bilişsel bozukluğu olan bireyler için yalnızca dijital kayıt zorunluluğu bile dışlayıcı olabilir. Bu nedenle telefonla kayıt, yüz yüze bilgilendirme ve bakım verenle ortak iletişim gibi seçenekler sunulmalıdır (Bauman vd., 2012; United Nations, 2006; World Health Organization, 2018).

Yaş, toplumsal cinsiyet, sağlık durumu ve engellilik temelinde oluşturulan genellemeler, kapsayıcı program tasarımının hedefleriyle uyumlu değildir. Birleşmiş Milletler Engelli Hakları Sözleşmesi, kültürel yaşama, rekreasyona, boş zamana ve spora eşit katılım hakkını açıkça tanımaktadır. Bu çerçevede program geliştirme sürecinde hedef grupların erişim gereksinimlerinin ve tercihlerinin değerlendirilmesi, kanıtlanmış klinik etki iddiası değil, hak temelli bir uygulama ilkesidir (UNESCO, 2015; United Nations, 2006; World Health Organization, 2018).

12. Ölçüm, Araştırma Tasarımı ve Kanıtın Sınırları

12.1. Fiziksel aktivitenin ölçülmesi

Özbildirim anketleri etkinliğin türünü ve bağlamını öğrenmek için yararlı; ancak anımsama hatası ve sosyal beğenirlik yanlılığına açıktır. İvmeölçerler ve giyilebilir cihazlar süre

ile hareket örüntüsünü daha nesnel izleyebilir; fakat bisiklet, kuvvet antrenmanı, yüzme ve yük taşıma gibi etkinlikleri her cihaz eşit doğrulukta yakalayamaz. Tüketici cihazlarını inceleyen sistematik derleme, adım sayısı ve enerji harcaması doğruluğunun cihaz ile ölçüm sonucuna göre değiştiğini göstermiştir; eski kuşak cihazlara ilişkin bulguların güncel modellere otomatik olarak genellenmemesi gerekir (Evenson vd., 2015).

Kardiyorespiratuvar uygunluk, fiziksel aktiviteyle ilişkili olmakla birlikte onun yerine geçen bir değişken değildir. VO_2-peak veya yürüme testleri fizyolojik kapasite hakkında bilgi sağlar; ancak genetik özellikler, hastalık, ilaç kullanımı ve test motivasyonu sonucu etkileyebilir. İyi tasarlanmış çalışmalarda katılım oranı, gerçek egzersiz şiddeti, programdan ayrılma ve istenmeyen olaylar da raporlanmalıdır (Caspersen vd., 1985; Evenson vd., 2015; Hopewell vd., 2025).

12.2. Bilişsel ve nörobiyolojik sonuçlar

Bilişsel değerlendirmede dikkat, işlemleme hızı, bellek ve yürütücü işlev birbirinden ayrılmalıdır. Tek bir tarama testindeki değişim, bütün bilişsel alanların iyileştiği anlamına gelmez. Aynı testin tekrar uygulanması öğrenme etkisi yaratabilir; bu nedenle uygun karşılaştırma grubu ve mümkün olduğunda değerlendiricinin körlenmesi önemlidir (Ciria vd., 2023; Diamond, 2013; Hopewell vd., 2025).

Manyetik rezonans görüntüleme, işlevsel bağlantısallık ve elektroensefalografi beyin yapısı ile işlevi hakkında değerli bilgi sağlayabilir; ancak pahalıdır ve analiz yaklaşımına duyarlıdır. Kan örneklerinde ölçülen BDNF veya diğer biyobelirteçler, beyindeki yerel üretimin doğrudan karşılığı değildir. 2026 tarihli direnç antrenmanı derlemesi dolaşımdaki BDNF, IGF-1 ve FGF-21 gibi nöroplastisiteyle ilişkili göstergelerde toplu bir artış bildirmiştir. Ancak bu periferik sonuçlar, beyinde aynı düzeyde değişiklik gerçekleştiğini veya belirli bir klinik bilişsel yararın kesin olarak ortaya çıktığını göstermez (Qipo vd., 2026).

12.3. Nedensellik, karşılaştırma grupları ve yayın yanlılığı

Gözlemsel çalışmalar fiziksel olarak daha aktif bireylerin daha iyi bilişsel sağlık gösterebildiğini bildirse de ters nedensellik mümkündür: Erken bilişsel bozulma veya depresif belirtiler fiziksel aktivitenin azalmasına yol açabilir. Eğitim, gelir, beslenme, sigara kullanımı ve başlangıç sağlık durumu gibi karıştırıcı değişkenler de ilişkinin bir bölümünü açıklayabilir. Randomizasyon bu sorunların bazılarını azaltır; ancak müdahaleyi körlemenin güç olması ve aktif karşılaştırma gruplarının farklılığı devam eder (Ciria vd., 2023; Hopewell vd., 2025; Sabia vd., 2017).

Egzersiz ve biliş ilişkisine yönelik geniş kapsamlı araştırmalar arasında sonuç ayrılığı bulunmaktadır. Bir şemsiye derleme yararlı etkiler bildirmişken, başka bir yeniden değerlendirme küçük çalışma etkileri ve yanlılıklar hesaba katıldığında kanıtın zayıfladığını ileri sürmüştür (Ciria vd., 2023; Singh vd., 2025). Bu farklılık, sonuçları seçerek bir görüşü kesinleştirmek yerine; çalışma kalitesi, ölçüm alanı, katılımcı grubu ve karşılaştırma koşulları üzerinden dengeli değerlendirme yapılmasını gerektirir (Ciria vd., 2023; Page vd., 2021).

Üst derlemelerde aynı randomize araştırmanın birden fazla meta-analizde yinelenmesi, kanıtın bağımsız hacmini olduğundan büyük gösterebilir. Çok sayıda alt grup ve biyobelirteç incelendiğinde rastlantısal anlamlı sonuçlar da artabilir. Önceden kayıtlı protokol, açık veri analizi, uzun takip, istenmeyen olay raporlaması ve aktif kontrol grubu gelecekteki araştırmaların güvenilirliğini artıracaktır (Hopewell vd., 2025; Page vd., 2021; Pieper vd., 2014).

12.4. Veri koruma ve uygulama etiği

Giyilebilir teknolojiler aracılığıyla toplanan konum, hareket, uyku ve sağlıkla ilişkili veriler, kişinin mahremiyetini etkileyebilecek bilgiler içerebilir. Bu nedenle toplanan verilerin amacı, erişim yetkisi, saklama süresi ve paylaşım koşulları katılımcıya açıkça bildirilmelidir. Türkiye'deki uygulamalarda

6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu ve ilgili kurumsal süreçler dikkate alınmalı; burada yapılan açıklama hukuki danışmanlık olarak değerlendirilmemelidir (Kişisel Verileri Koruma Kurumu, 2016; World Health Organization, 2021).

Tablo 5. Fiziksel aktivite ve beyin sağlığı araştırmalarında ölçüm araçları

Ölçüm grubu	Sağladığı bilgi	Uygulama avantajı	Başlıca sınırlılık
Özbildirim anketi	Etkinliğin türü, amacı ve bağlamı	Düşük maliyet; büyük örneklem	Anımsama hatası ve sosyal beğenirlik yanlılığı
İvmeölçer / giyilebilir cihaz	Hareket süresi, adım ve zamansal örüntü	Günlük yaşama yakın nesnel izlem	Cihaz algoritması, veri gizliliği ve bazı etkinlikleri kaçırma
Uygunluk ve yürüyüş testi	VO_2peak, dayanıklılık, yürüme kapasitesi	İşlevsel değişimin izlenmesi	Sağlık durumu, ilaçlar ve test motivasyonu etkileyebilir.
Nöropsikolojik test	Dikkat, bellek, hız, yürütücü işlev	Bilişsel alanları ayrı değerlendirme	Tekrar testi, eğitim düzeyi ve körleme sorunları
MRG / fMRG / EEG	Yapısal değişim, bağlantısallık, beyin etkinliği	Mekanistik ve bölgesel bilgi	Yüksek maliyet, hareket artefaktı ve analiz esnekliği
Kan biyobelirteçleri	BDNF, IGF-1 ve sistemik inflamasyon	Tekrarlı örnekleme ve biyolojik izlem	Periferik sonuç beyin dokusundaki değişimle eşit değildir.

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Ciria vd., 2023; Evenson vd., 2015; Hopewell vd., 2025; Pieper vd., 2014; Polacchini vd., 2015; Qipo vd., 2026).

13. Rekreasyon, Toplum Programları ve Sosyal Reçeteleme

Rekreasyon, sağlık etkisi bulunan boş zaman etkinliklerinin gönüllülük, anlam, keyif ve toplumsal katılım boyutlarını birlikte ele alır. Beyin sağlığı bağlamında rekreatif hareketin gücü, yalnızca belirli bir nabız aralığını tutturmasında değil;

kişinin programı yaşamına uyarlayabilmesinde de yatabilir. Kampüs yürüyüşleri, kuşaklararası dans programları, mahalle bahçeciliği, engelli bireylere uyarlanmış sporlar ve doğa gezileri bu açıdan değerlendirilebilir (Rhodes & Kates, 2015; United Nations, 2006; World Health Organization, 2018).

Sosyal reçeteleme, sağlık veya toplum hizmetlerinden kişilerin yerel sosyal, kültürel ve fiziksel etkinliklere yönlendirilmesini ifade eder. Uzun süreli sağlık sorunu olan yetişkinlerde yapılan sistematik derleme, 12 çalışmayı ve 3.566 katılımcıyı değerlendirmiştir; ancak müdahalelerin farklılığı ve yöntemsel sınırlılıklar nedeniyle genel iyi oluş için kesin ve tutarlı üstünlük gösterilmemiştir (O'Sullivan vd., 2024). Dolayısıyla sosyal reçeteleme umut verici bir örgütlenme yaklaşımıdır; etkili olduğu varsayılarak değerlendirme dışı bırakılmamalıdır (O'Sullivan vd., 2024; World Health Organization, 2018).

Nitelikli bir toplum programı beş soruya yanıt verebilmelidir: Kimler katılamıyor, katılımın maliyeti nedir, hangi güvenlik önlemleri bulunuyor, süreklilik nasıl destekleniyor ve etkiler hangi göstergelerle değerlendiriliyor? Yalnızca kayıt sayısı ölçüldüğünde en fazla ihtiyaç duyan grupların dışlanması gözden kaçabilir. Devamlılık, erişilebilirlik, öznel iyi oluş, düşme korkusu ve sosyal aidiyet gibi sonuçlar, programın hedeflerine göre birlikte izlenmelidir (O'Sullivan vd., 2024; Rhodes & Kates, 2015; World Health Organization, 2018).

Üniversiteler ve belediyeler, spor bilimleri birimleriyle yerel sağlık hizmetleri arasında ortak programlar geliştirebilir. Örneğin bilişsel yakınması olan yaşlılar için erişilebilir bir yürüyüş rotası, haftalık küçük grup buluşması ve basit kuvvet çalışması birleştirilebilir. Burada amaç klinik tedavi rolünü üstlenmek değil; uzman yönlendirmesiyle güvenli, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir katılım alanı oluşturmaktır (O'Sullivan vd., 2024; World Health Organization, 2018; World Health Organization, 2020).

Program akışında ilk görüşme, kişinin sağlık sınırlılıklarını belirlemek kadar ne yapmak istemediğini öğrenmek için de kullanılmalıdır. Ardından erişilebilir bir deneme oturumu,

açık güvenlik yönergeleri ve gerektiğinde yönlendirme mekanizması kurulabilir. İlk haftalardaki düzenli iletişim, katılımın zaman içinde azalmasına neden olan ulaşım, maliyet, ağrı veya sosyal rahatsızlık gibi sorunları erken görünür kılar. Katılımcının etkinliği bırakması başarısızlık olarak etiketlenmemeli; daha uygun saat, yoğunluk veya etkinlik türü için veri olarak ele alınmalıdır (Bauman vd., 2012; O'Sullivan vd., 2024; Rhodes & Kates, 2015).

Değerlendirme sürecinde biyolojik göstergelerin ölçümü her toplum programı için gerekli değildir. Bir mahalle yürüyüş grubunda devamlılık, kendini güvende hissetme, sosyal ilişki kurma ve günlük yürüme kapasitesi; pahalı biyobelirteç analizlerinden daha uygun sonuçlar olabilir. Buna karşılık klinik bir araştırmada standart bilişsel ölçüm, fiziksel uygunluk, istenmeyen olaylar ve yeterli izlem önem kazanır. Sonuç seçimi programın amacına göre yapıldığında rekreasyon hizmetleri hem gerçekçi hem de hesap verebilir biçimde değerlendirilebilir (Hopewell vd., 2025; O'Sullivan vd., 2024; World Health Organization, 2018).

Doğa temelli programlar psikolojik iyi oluşa katkı sağlayabilir; ancak hava sıcaklığı, alerjenler, hijyen, ulaşım ve arazi erişilebilirliği planlanmalıdır (Coventry vd., 2021). Dans ve beceri temelli etkinlikler motivasyonu destekleyebilir; fakat bilişsel bozukluğu olan ileri yaştaki bireylerde dansın kesin klinik üstünlüğüne ilişkin kanıtın düşük yöntemsel niteliği açıkça belirtilmelidir (Prates vd., 2025). Rekreasyon uzmanının görevi, olumlu deneyimi abartılı tedavi iddialarından ayırmaktır (Coventry vd., 2021; Prates vd., 2025).

Tablo 6. Rekreatif ve toplum temelli beyin sağlığı programları için uygulama matrisi

Program modeli	Uygulama bileşeni	Olası hedef grup	Değerlendirme ölçütü
Mahalle yürüyüş grubu	Erişilebilir rota, küçük grup, dinlenme noktası	Yetişkinler ve ileri yaştaki bireyler	Devamlılık, yürüme kapasitesi, sosyal aidiyet
Kapsayıcı okul etkinliği	Hareketli teneffüs, uyarlanmış oyun, öğretmen desteği	Çocuklar, ergenler, engelli öğrenciler	Katılım eşitliği, öz düzenleme, deneyim kalitesi
Uyarlanmış dans programı	Ritim, sade yönerge, gözetim ve güvenli alan	İleri yaş, hafif bilişsel bozukluk, Parkinson	Keyif, katılım, denge ve düşme olayları
Doğa temelli rekreasyon	Park yürüyüşü, bahçecilik, erişilebilir açık alan	Stres yaşayan yetişkinler ve karma yaş grupları	İyi oluş, sürdürülebilirlik ve erişim engelleri
Sosyal reçeteleme	Sağlık hizmetinden yerel programa yönlendirme	Uzun süreli sağlık sorunu veya sosyal izolasyonu olanlar	Yönlendirme tamamlanması, devamlılık, güvenlik
Üniversite-belediye ortaklığı	Uygulayıcı eğitimi, güvenli değerlendirme, yerel ağ	Öğrenciler, çalışanlar ve mahalle sakinleri	Ulaşılabilirlik, maliyet, katılımcı geri bildirimi

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır; dayanak çalışmalar: (Coventry vd., 2021; Leahy vd., 2025; O'Sullivan vd., 2024; Prates vd., 2025; United Nations, 2006; World Health Organization, 2018).

14. Uygulamaya Yönelik Öneriler

Okul çağındaki çocuklar için hareketli oyun, nitelikli beden eğitimi ve güvenli aktif ulaşım birlikte desteklenmelidir. Hedef, yalnızca sporcu performansı değil; motor yeterlik, arkadaşlık ve öğrenmeye katılımdır. Ergenlerde program seçiminde mahremiyet, beden algısı, akran baskısı ve uyku düzeni dikkate alınmalı; ekran kullanımı toptan yasaklanmak yerine işlevi ve zamanlamasıyla değerlendirilmelidir (García-Hermoso vd., 2021; Santos vd., 2023; UNESCO, 2015).

Yetişkin çalışanlar için uygulanabilir seçenekler; kısa yürüyüş araları, aktif ulaşım, haftada iki gün kuvvet çalışması ve uzun oturma dönemlerinin kesilmesidir. Bakım emeği üstlenen bireylerde ücretsiz çocuk bakımı, esnek saat ve ev yakınındaki etkinlikler, motivasyon konuşmalarından daha etkili bir erişim düzenlemesi olabilir. Sağlık profesyonelleri hedefleri kişinin başlangıç düzeyine göre belirlemeli ve küçük ilerlemeleri görünür kılmalıdır (Bauman vd., 2012; Sallis vd., 2016; World Health Organization, 2020).

İleri yaştaki bireyler için aerobik, kuvvet ve denge bileşenleri birleştirilmeli; düşme korkusu veya ulaşım güçlüğü varsa ev temelli ya da yakın çevrede uygulamalar tercih edilmelidir. Hafif bilişsel bozukluğu olanlarda kısa yönergeler, düzenli saatler ve güvenilir eşlik eden kişi katılımı kolaylaştırabilir. Demans tanısı olanlarda bakım veren desteği, güvenli rota ve bireyin daha önce sevdiği etkinlikler özellikle değerlidir (Baker vd., 2025; Livingston vd., 2024; World Health Organization, 2020).

Parkinson hastalığında ritim, yürüme ve denge çalışmaları ilaç zamanlaması ve düşme riski dikkate alınarak düzenlenmelidir. İnme sonrası programlarda rehabilitasyon ekibinin önerileri, kardiyovasküler durum ve taraflar arası kuvvet farklılığı önemlidir. Multipl sklerozda yorgunluk ve ısı duyarlılığına göre daha kısa seanslar planlanabilir. Sarsıntı sonrasında fiziksel aktivite, semptomların izlenmesine dayalı kademeli dönüş biçiminde uygulanmalıdır (Kalb vd., 2020; Osborne vd., 2022; Patricios vd., 2023; Saunders vd., 2025).

Depresyon veya anksiyete yaşayan bireylerde etkinliğin en uygun türü, kişinin güvenli ve sürdürülebilir bulduğu seçenekle başlar. Grup programları bazı kişiler için sosyal destek sağlarken, başkaları için başlangıçta fazla zorlayıcı olabilir. Hareketin psikoterapiye, gerektiğinde farmakolojik tedaviye ve kriz yönetimine ek olarak değerlendirildiği açıkça belirtilmelidir (Munro vd., 2026; National Institute for Health and Care Excellence, 2022; Noetel vd., 2024).

Araştırmacılar açısından öncelik, büyük ve şeffaf bir örneklem oluşturmanın ötesinde doğru karşılaştırma koşulunu kurmaktır. Sosyal temas, beklenti, eğitmen ilgisi ve başlangıç sağlık durumu denetlenmediğinde egzersizin özgül katkısı belirsiz kalır. Yerel uygulamalarda katılım engelleri ve istenmeyen olaylar, başarı öyküleri kadar düzenli raporlanmalıdır (Ciria vd., 2023; Hopewell vd., 2025; Pieper vd., 2014).

15. Tartışma ve Gelecek Araştırma Alanları

Mevcut kanıtlar fiziksel aktivitenin beyin sağlığıyla ilişkisini desteklemekte; ancak bu ilişkinin tek boyutlu, bütün popülasyonlarda eşit ve her sonuç için kesin olduğunu göstermemektedir. Biliş alanında olumlu üst derlemeler ile yanlılık düzeltmelerinden sonra daha temkinli sonuçlara ulaşan değerlendirmeler yan yana okunmalıdır (Ciria vd., 2023; Singh vd., 2025). Ruh sağlığı alanında etki daha tutarlı görünse bile çalışma kalitesi, beklenti etkileri ve müdahalelerin heterojenliği önemini korumaktadır (Munro vd., 2026; Singh vd., 2023).

Mekanizma araştırmalarında nörotrofik faktörler, serebral kan akımı, inflamasyon ve kas-beyin iletişimi umut verici alanlardır. Buna karşılık çevresel dolaşımda ölçülen biyobelirteçlerin doğrudan beyin dokusundaki değişimi göstermediği unutulmamalıdır. Direnç antrenmanının biyobelirteçlerini değerlendiren güncel derleme, dolaşımdaki nöroplastisiteyle ilişkili göstergelerde ortalama artış bildirmiştir; ancak bu sonuç, beyindeki değişimin büyüklüğünü veya bilişsel klinik yararı kendiliğinden kanıtlamaz. Biyolojik açıklama ile klinik sonuç arasında kalan mesafe açıkça belirtilmelidir (Qipo vd., 2026).

Gelecek çalışmalar, hangi bireyin hangi fiziksel aktivite biçiminden hangi koşulda yarar gördüğünü daha açık biçimde değerlendirmelidir. Başlangıç kardiyorespiratuvar uygunluğu, yaş, cinsiyet, engellilik durumu, hastalık evresi, eğitim, uyku ve sosyoekonomik koşullar etkiyi değiştirebilir. Aynı zamanda programların keyif, aidiyet ve kültürel kabul düzeyi ölçülmediğinde, laboratuvarda etkili görünen müdahaleler gerçek

yaşamda sürdürülemeyebilir (Bauman vd., 2012; Rhodes & Kates, 2015; Singh vd., 2025).

Bir başka öncelik, daha uzun takip süreleridir. Kısa dönem bilişsel test puanı ile yıllar sonra günlük işlev veya demans görülme sıklığı aynı sonuç değildir. Çocuklarda akademik başarı, yetişkinlerde işlevsellik ve ileri yaşta bağımsız yaşam gibi anlamlı sonuçlar; uygun güvenlik ve etik çerçeve içinde izlenmelidir. Üst derlemelerde araştırma örtüşmesinin sistematik biçimde raporlanması ve küçük çalışma etkilerinin incelenmesi de önemlidir (Hopewell vd., 2025; Page vd., 2021; Pieper vd., 2014).

Toplumsal düzeyde beyin sağlığı politikaları, yalnızca bireye egzersiz önerisi veren kampanyalarla sınırlı tutulmamalıdır. Güvenli kamusal alanlar, erişilebilir ulaşım, kapsayıcı spor tesisleri, okul programları ve düşük maliyetli toplum etkinlikleri fiziksel aktivitenin gerçek belirleyicileri arasındadır. Rekreasyon bilimi, bu yapısal koşulları davranış değişikliği ve sosyal katılım perspektifiyle birleştirebilecek önemli bir uygulama alanı sunmaktadır (Sallis vd., 2016; United Nations, 2006; World Health Organization, 2018).

16. Sonuç

Fiziksel aktivite, yaşam boyu beyin sağlığını destekleyebilecek çok boyutlu bir davranıştır. Aerobik hareket, kuvvetlendirme, denge, dans, doğa temelli etkinlikler ve sosyal rekreasyon; farklı bireyler için farklı giriş noktaları sağlayabilir. Mevcut araştırmalar biliş, ruh sağlığı, uyku ve bazı nörolojik rehabilitasyon sonuçlarında yarar olasılığı göstermektedir; ancak etki büyüklüğü, özgül mekanizma ve klinik üstünlük her alanda aynı kesinlikle belirlenmiş değildir (Noetel vd., 2024; Singh vd., 2025; World Health Organization, 2022; Zhou vd., 2025).

Güvenilir yaklaşım, biyolojik olasılıkları kesin tedavi iddialarına dönüştürmeden; hareketi bireyin yaşı, sağlık durumu, tercihleri ve çevresel olanaklarıyla uyumlu biçimde

planlamaktır. Dünya Sağlık Örgütü önerileri genel halk sağlığı açısından yol gösterirken, nörolojik hastalığı veya önemli klinik riski olan bireylerde kişiselleştirilmiş profesyonel değerlendirme gereklidir. Sedanter sürenin azaltılması, uyku düzeninin korunması ve sosyal katılımın desteklenmesi bu çerçevenin tamamlayıcı bileşenleridir (Riebe vd., 2015; World Health Organization, 2020; World Health Organization, 2022).

Sonuç olarak beyin sağlığı için en uygun fiziksel aktivite, herkes adına belirlenmiş tek bir ideal egzersiz değildir. Bilimsel kanıtla uyumlu, güvenli, erişilebilir, birey tarafından anlamlı bulunan ve uzun vadede sürdürülebilen hareket; klinik bakım ve toplumsal katılımla birleştiğinde en güçlü uygulama zeminini oluşturur (Rhodes & Kates, 2015; World Health Organization, 2018; World Health Organization, 2022).

Kaynakça

Agudelo, L. Z., Femenía, T., Orhan, F., Porsmyr-Palmertz, M., Goiny, M., Martinez-Redondo, V., Correia, J. C., Izadi, M., Bhat, M., Schuppe-Koistinen, I., Pettersson, A. T., Ferreira, D. M. S., Krook, A., Barres, R., Zierath, J. R., Erhardt, S., Lindskog, M., & Ruas, J. L. (2014). Skeletal muscle PGC-1α1 modulates kynurenine metabolism and mediates resilience to stress-induced depression. *Cell, 159*(1), 33–45. https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.07.051

Alashram, A. R. (2025). Effects of aerobic exercise on concussion-related symptoms: A systematic review of randomized controlled trials. *Brain Injury, 39*(8), 625–634. https://doi.org/10.1080/02699052.2025.2476494

Baker, L. D., Pa, J. A., Katula, J. A., Aslanyan, V., Salmon, D. P., Jacobs, D. M., Chmelo, E. A., Hodge, H., Morrison, R., Matthews, G., Brewer, J., Jung, Y., Rissman, R. A., Taylor, C., Léger, G. C., Messer, K., Evans, A. C., Okonkwo, O. C., Shadyab, A. H., … Feldman, H. H. (2025). Effects of exercise on cognition and Alzheimer's biomarkers in a randomized controlled trial of adults with mild cognitive impairment: The EXERT study. *Alzheimer's & Dementia, 21*(4), e14586. https://doi.org/10.1002/alz.14586

Bauman, A. E., Reis, R. S., Sallis, J. F., Wells, J. C., Loos, R. J. F., Martin, B. W., & Lancet Physical Activity Series Working Group. (2012). Correlates of physical activity: Why are some people physically active and others not? *The Lancet, 380*(9838), 258–271. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60735-1

Caspersen, C. J., Powell, K. E., & Christenson, G. M. (1985). Physical activity, exercise, and physical fitness: Definitions and distinctions for health-related research. *Public Health Reports, 100*(2), 126–131. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1424733/

Centers for Disease Control and Prevention. (2024). *How to measure physical activity intensity*. https://www.cdc.gov/physical-activity-basics/measuring/index.html

Chang, Y.-K., Ren, F.-F., Li, R.-H., Ai, J.-Y., Kao, S.-C., & Etnier, J. L. (2025). Effects of acute exercise on cognitive function: A meta-review of 30 systematic reviews with meta-analyses. *Psy-*

chological Bulletin, 151(2), 240–259. https://doi.org/10.1037/bul0000460

Ciria, L. F., Román-Caballero, R., Vadillo, M. A., Holgado, D., Luque-Casado, A., Perakakis, P., & Sanabria, D. (2023). An umbrella review of randomized control trials on the effects of physical exercise on cognition. *Nature Human Behaviour, 7*(6), 928–941. https://doi.org/10.1038/s41562-023-01554-4

Coventry, P. A., Brown, J. V. E., Pervin, J., Brabyn, S., Pateman, R., Breedvelt, J., Gilbody, S., Stancliffe, R., McEachan, R., & White, P. C. L. (2021). Nature-based outdoor activities for mental and physical health: Systematic review and meta-analysis. *SSM – Population Health, 16*, 100934. https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2021.100934

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135–168. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750

Dinoff, A., Herrmann, N., Swardfager, W., Liu, C. S., Sherman, C., Chan, S., & Lanctôt, K. L. (2016). The effect of exercise training on resting concentrations of peripheral brain-derived neurotrophic factor (BDNF): A meta-analysis. *PLOS ONE, 11*(9), e0163037. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163037

El Hayek, L., Khalifeh, M., Zibara, V., Abi Assaad, R., Emmanuel, N., Karnib, N., El-Ghandour, R., Nasrallah, P., Bilen, M., Ibrahim, P., Younes, J., Abou Haidar, E., Barmo, N., Jabre, V., Stephan, J. S., & Sleiman, S. F. (2019). Lactate mediates the effects of exercise on learning and memory through SIRT1-dependent activation of hippocampal brain-derived neurotrophic factor (BDNF). *The Journal of Neuroscience, 39*(13), 2369–2382. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1661-18.2019

Elliott, T., Liu, K. Y., Hazan, J., Wilson, J., Vallipuram, H., Jones, K., Mahmood, J., Gitlin-Leigh, G., & Howard, R. (2025). Hippocampal neurogenesis in adult primates: A systematic review. *Molecular Psychiatry, 30*(3), 1195–1206. https://doi.org/10.1038/s41380-024-02815-y

Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., Kim, J. S., Heo, S., Alves, H., White, S. M., Wojcicki, T. R., Mailey, E., Vieira, V. J., Martin, S. A., Pence, B. D., Woods, J. A., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2011). Exer-

cise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108*(7), 3017–3022. https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108

Ernst, M., Folkerts, A.-K., Gollan, R., Lieker, E., Caro-Valenzuela, J., Adams, A., Cryns, N., Monsef, I., Dresen, A., Roheger, M., Eggers, C., Skoetz, N., & Kalbe, E. (2024). Physical exercise for people with Parkinson's disease: A systematic review and network meta-analysis. *Cochrane Database of Systematic Reviews,* (4), CD013856. https://doi.org/10.1002/14651858.CD013856.pub3

Evenson, K. R., Goto, M. M., & Furberg, R. D. (2015). Systematic review of the validity and reliability of consumer-wearable activity trackers. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 12*, 159. https://doi.org/10.1186/s12966-015-0314-1

García-Hermoso, A., Ramírez-Vélez, R., Lubans, D. R., & Izquierdo, M. (2021). Effects of physical education interventions on cognition and academic performance outcomes in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine, 55*(21), 1224–1232. https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-104112

GBD 2021 Nervous System Disorders Collaborators. (2024). Global, regional, and national burden of disorders affecting the nervous system, 1990–2021: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet Neurology, 23*(4), 344–381. https://doi.org/10.1016/S1474-4422(24)00038-3

Hopewell, S., Chan, A.-W., Collins, G. S., Hróbjartsson, A., Moher, D., Schulz, K. F., Tunn, R., Aggarwal, R., Berkwits, M., Berlin, J. A., Bhandari, N., Butcher, N. J., Campbell, M. K., Chidebe, R. C. W., Elbourne, D., Farmer, A., Fergusson, D. A., Golub, R. M., Goodman, S. N., … Boutron, I. (2025). CONSORT 2025 statement: Updated guideline for reporting randomised trials. *BMJ, 389*, e081123. https://doi.org/10.1136/bmj-2024-081123

Kalb, R., Brown, T. R., Coote, S., Costello, K., Dalgas, U., Garmon, E., Giesser, B., Halper, J., Karpatkin, H., Keller, J., Ng, A. V., Pilutti, L. A., Rohrig, A., Van Asch, P., Zackowski, K., & Motl, R. W. (2020). Exercise and lifestyle physical activity recom-

mendations for people with multiple sclerosis throughout the disease course. *Multiple Sclerosis Journal, 26*(12), 1459–1469. https://doi.org/10.1177/1352458520915629

Kişisel Verileri Koruma Kurumu. (2016). *Personal data protection law (Law No. 6698).* https://www.kvkk.gov.tr/Icerik/6649/Personal-Data-Protection-Law

Leahy, A. A., Robinson, K., Eather, N., Smith, J. J., Hillman, C. H., Beacroft, S., Mazzoli, E., & Lubans, D. R. (2025). School physical activity interventions for children and adolescents with disability: Systematic review and meta-analysis of effects on academic, cognitive, and mental health outcomes. *Journal of Physical Activity and Health, 22*(9), 1064–1075. https://doi.org/10.1123/jpah.2025-0052

Li, G., You, Q., Hou, X., Zhang, S., Du, L., Lv, Y., & Yu, L. (2023). The effect of exercise on cognitive function in people with multiple sclerosis: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Neurology, 270*, 2908–2923. https://doi.org/10.1007/s00415-023-11649-7

Livingston, G., Huntley, J., Liu, K. Y., Costafreda, S. G., Selbæk, G., Alladi, S., Ames, D., Banerjee, S., Burns, A., Brayne, C., Fox, N. C., Ferri, C. P., Gitlin, L. N., Howard, R., Kales, H. C., Kivimäki, M., Larson, E. B., Nakasujja, N., Rockwood, K., … Mukadam, N. (2024). Dementia prevention, intervention, and care: 2024 report of the Lancet standing Commission. *The Lancet, 404*(10452), 572–628. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)01296-0

Lourenco, M. V., Frozza, R. L., de Freitas, G. B., Zhang, H., Kincheski, G. C., Ribeiro, F. C., Gonçalves, R. A., Clarke, J. R., Beckman, D., Staniszewski, A., Berman, H., Guerra, L. A., Forny-Germano, L., Meier, S., Wilcock, D. M., de Souza, J. M., Alves-Leon, S., Prado, V. F., Prado, M. A. M., … De Felice, F. G. (2019). Exercise-linked FNDC5/irisin rescues synaptic plasticity and memory defects in Alzheimer's models. *Nature Medicine, 25*(1), 165–175. https://doi.org/10.1038/s41591-018-0275-4

Maass, A., Düzel, S., Brigadski, T., Goerke, M., Becke, A., Sobieray, U., Neumann, K., Lövdén, M., Lindenberger, U., Bäckman, L., Braun-Dullaeus, R., Ahrens, D., Heinze, H.-J., Müller, N. G., Lessmann, V., Sendtner, M., & Düzel, E. (2016). Relationships of peripheral IGF-1, VEGF and BDNF levels to exer-

cise-related changes in memory, hippocampal perfusion and volumes in older adults. *NeuroImage, 131*, 142–154. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.10.084

Meeusen, R., & De Meirleir, K. (1995). Exercise and brain neurotransmission. *Sports Medicine, 20*(3), 160–188. https://doi.org/10.2165/00007256-199520030-00004

Moon, H. Y., Becke, A., Berron, D., Becker, B., Sah, N., Benoni, G., Janke, E., Lubejko, S. T., Greig, N. H., Mattison, J. A., Duzel, E., & van Praag, H. (2016). Running-induced systemic cathepsin B secretion is associated with memory function. *Cell Metabolism, 24*(2), 332–340. https://doi.org/10.1016/j.cmet.2016.05.025

Munro, N. R., Teague, S., Somoray, K., Simpson, A., Budden, T., Jackson, B., Rebar, A., & Dimmock, J. (2026). Effect of exercise on depression and anxiety symptoms: Systematic umbrella review with meta-meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine, 60*(8), 590–599. https://doi.org/10.1136/bjsports-2025-110301

National Institute for Health and Care Excellence. (2022). **Depression in adults: Treatment and management (NICE guideline NG222).* https://www.nice.org.uk/guidance/ng222

Noetel, M., Sanders, T., Gallardo-Gómez, D., Taylor, P., Del Pozo Cruz, B., van den Hoek, D., Smith, J. J., Mahoney, J., Spathis, J., Moresi, M., Pagano, R., Pagano, L., Vasconcellos, R., Arnott, H., Varley, B., Parker, P., Biddle, S., & Lonsdale, C. (2024). Effect of exercise for depression: Systematic review and network meta-analysis of randomised controlled trials. *BMJ, 384*, e075847. https://doi.org/10.1136/bmj-2023-075847

O'Sullivan, D. J., Bearne, L. M., Harrington, J. M., Cardoso, J. R., & McVeigh, J. G. (2024). The effectiveness of social prescribing in the management of long-term conditions in community-based adults: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation, 38*(10), 1306–1320. https://doi.org/10.1177/02692155241258903

Osborne, J. A., Botkin, R., Colon-Semenza, C., DeAngelis, T. R., Gallardo, O. G., Kosakowski, H., Martello, J., Pradhan, S., Rafferty, M., Readinger, J. L., Whitt, A. L., & Ellis, T. D. (2022). Physical therapist management of Parkinson disease: A clinical practice guideline from the American Physical Therapy

Association. *Physical Therapy, 102*(4), pzab302. https://doi.org/10.1093/ptj/pzab302

Özcan, B., Şahinler, Y., Ulukan, M., & Koç, M. C. (2025). Determining the levels of social anxiety and emotion regulation difficulties among youth participating in sports courses at youth centers. *SPORT TK-EuroAmerican Journal of Sport Sciences, 14*, 17. https://doi.org/10.6018/sportk.651711

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Patricios, J. S., Schneider, K. J., Dvorak, J., Ahmed, O. H., Blauwet, C., Cantu, R. C., Davis, G. A., Echemendia, R. J., Makdissi, M., McNamee, M., Broglio, S., Emery, C. A., Feddermann-Demont, N., Fuller, G. W., Giza, C. C., Guskiewicz, K. M., Hainline, B., Iverson, G. L., Kutcher, J. S., … Meeuwisse, W. (2023). Consensus statement on concussion in sport: The 6th International Conference on Concussion in Sport–Amsterdam, October 2022. *British Journal of Sports Medicine, 57*(11), 695–711. https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106898

Pieper, D., Antoine, S.-L., Mathes, T., Neugebauer, E. A. M., & Eikermann, M. (2014). Systematic review finds overlapping reviews were not mentioned in every other overview. *Journal of Clinical Epidemiology, 67*(4), 368–375. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2013.11.007

Polacchini, A., Metelli, G., Francavilla, R., Baj, G., Florean, M., Mascaretti, L. G., & Tongiorgi, E. (2015). A method for reproducible measurements of serum BDNF: Comparison of the performance of six commercial assays. *Scientific Reports, 5*, 17989. https://doi.org/10.1038/srep17989

Prates, R. A. C. S., Kaczmarska, M., Senger, D., Piña-Escudero, S. D., Light, S. W., Pintado-Caipa, M., Battista, P., Tahir, P., Pitsch, E., Allen, I. E., Possin, K. L., & Haas, A. N. (2025). Effects of dance interventions on brain health for older adults with cognitive impairment: An umbrella review. *BMC Geriatrics, 25,* 846. https://doi.org/10.1186/s12877-025-06483-7

Qipo, O., Gajauskaitė, G., Vints, W. A. J., Levin, O., Masiulis, N., & Bautmans, I. (2026). Dose-response relationship of resistance training and the effects on circulating biomarkers of inflammation or neuroplasticity in older adults: A systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews, 113*, 102917. https://doi.org/10.1016/j.arr.2025.102917

Rhodes, R. E., & Kates, A. (2015). Can the affective response to exercise predict future motives and physical activity behavior? A systematic review of published evidence. *Annals of Behavioral Medicine, 49*(5), 715–731. https://doi.org/10.1007/s12160-015-9704-5

Riebe, D., Franklin, B. A., Thompson, P. D., Garber, C. E., Whitfield, G. P., Magal, M., & Pescatello, L. S. (2015). Updating ACSM's recommendations for exercise preparticipation health screening. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 47*(11), 2473–2479. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000664

Robinson, M. M., Dasari, S., Konopka, A. R., Johnson, M. L., Manjunatha, S., Esponda, R. R., Carter, R. E., Lanza, I. R., & Nair, K. S. (2017). Enhanced protein translation underlies improved metabolic and physical adaptations to different exercise training modes in young and old humans. *Cell Metabolism, 25*(3), 581–592. https://doi.org/10.1016/j.cmet.2017.02.009

Sabia, S., Dugravot, A., Dartigues, J.-F., Abell, J., Elbaz, A., Kivimäki, M., & Singh-Manoux, A. (2017). Physical activity, cognitive decline, and risk of dementia: 28 year follow-up of Whitehall II cohort study. *BMJ, 357*, j2709. https://doi.org/10.1136/bmj.j2709

Sahinler, Y., Dindar, M. D., & Koc, M. C. (2026). The effect of psychological flexibility, self-compassion, and mindfulness on mental health among university students. *Frontiers in Psychology, 17*, 1757032. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2026.1757032

Şahinler, Y. (2022). Investigation of prosocial and antisocial behavior tendencies of team athletes according to different variables. *Research in Sport Education and Sciences, 24,* (2), 37–40.

Sallis, J. F., Cerin, E., Conway, T. L., Adams, M. A., Frank, L. D., Pratt, M., Salvo, D., Schipperijn, J., Smith, G., Cain, K. L., Davey, R., Kerr, J., Lai, P. C., Mitáš, J., Reis, R., Sarmiento, O. L., Schofield, G., Troelsen, J., Van Dyck, D., … Owen, N. (2016). Physical activity in relation to urban environments in 14 cities

worldwide: A cross-sectional study. *The Lancet, 387*(10034), 2207–2217. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)01284-2

Santos, R. M. S., Mendes, C. G., Bressani, G. Y. S., Ventura, S. A., Nogueira, Y. J. A., de Miranda, D. M., & Romano-Silva, M. A. (2023). The associations between screen time and mental health in adolescents: A systematic review. *BMC Psychology, 11*, 127. https://doi.org/10.1186/s40359-023-01166-7

Saunders, D. H., Carstairs, S. A., Cheyne, J. D., Fileman, M., Morris, J., Morton, S., Wylie, G., & Mead, G. E. (2025). Combined cardiorespiratory and resistance training for people with stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews,* (9), CD016002. https://doi.org/10.1002/14651858.CD016002

Singh, B., Bennett, H., Miatke, A., Dumuid, D., Curtis, R., Ferguson, T., Brinsley, J., Szeto, K., Petersen, J. M., Gough, C., Eglitis, E., Simpson, C. E. M., Ekegren, C. L., Smith, A. E., Erickson, K. I., & Maher, C. (2025). Effectiveness of exercise for improving cognition, memory and executive function: A systematic umbrella review and meta-meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine, 59*(12), 866–876. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108589

Singh, B., Olds, T., Curtis, R., Dumuid, D., Virgara, R., Watson, A., Szeto, K., O'Connor, E., Ferguson, T., Eglitis, E., Miatke, A., Simpson, C. E. M., & Maher, C. (2023). Effectiveness of physical activity interventions for improving depression, anxiety and distress: An overview of systematic reviews. *British Journal of Sports Medicine, 57*(18), 1203–1209. https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106195

Stern, Y. (2012). Cognitive reserve in ageing and Alzheimer's disease. *The Lancet Neurology, 11*(11), 1006–1012. https://doi.org/10.1016/S1474-4422(12)70191-6

Stiglic, N., & Viner, R. M. (2019). Effects of screentime on the health and well-being of children and adolescents: A systematic review of reviews. *BMJ Open, 9*(1), e023191. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-023191

Strain, T., Flaxman, S., Guthold, R., Semenova, E., Cowan, M., Riley, L. M., Bull, F. C., Stevens, G. A., & Country Data Author Group. (2024). National, regional, and global trends in insufficient physical activity among adults from 2000 to 2022: A pooled analysis of 507 population-based surveys with 5.7

million participants. *The Lancet Global Health, 12*(8), e1232–e1243. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(24)00150-5

Su, X., Zheng, Z., Yu, F., Liu, C., Wang, S., & Zhu, F. (2025). The impact of different exercise types on cognitive function in patients with multiple sclerosis: A systematic review and network meta-analysis. *Journal of Neurology, 272*, 709. https://doi.org/10.1007/s00415-025-13465-7

Sun, G., Ding, X., Zheng, Z., & Ma, H. (2025). Effects of exercise interventions on cognitive function in patients with cognitive dysfunction: An umbrella review of meta-analyses. *Frontiers in Aging Neuroscience, 17*, 1553868. https://doi.org/10.3389/fnagi.2025.1553868

Szuhany, K. L., Bugatti, M., & Otto, M. W. (2015). A meta-analytic review of the effects of exercise on brain-derived neurotrophic factor. *Journal of Psychiatric Research, 60*, 56–64. https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2014.10.003

Tremblay, M. S., Aubert, S., Barnes, J. D., Saunders, T. J., Carson, V., Latimer-Cheung, A. E., Chastin, S. F. M., Altenburg, T. M., & Chinapaw, M. J. M. (2017). Sedentary Behavior Research Network (SBRN)—Terminology Consensus Project process and outcome. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 14*, 75. https://doi.org/10.1186/s12966-017-0525-8

UNESCO. (2015). *Quality physical education: Guidelines for policy-makers*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231101

United Nations. (2006). *Convention on the Rights of Persons with Disabilities: Article 30—Participation in cultural life, recreation, leisure and sport*. https://www.un.org/development/desa/disabilities/convention-on-the-rights-of-persons-with-disabilities/article-30-participation-in-cultural-life-recreation-leisure-and-sport.html

van Hattem, T., Verkaar, L., Krugliakova, E., Adelhöfer, N., Zeising, M., Drinkenburg, W. H. I. M., Claassen, J. A. H. R., Bódizs, R., Dresler, M., & Rosenblum, Y. (2025). Targeting sleep physiology to modulate glymphatic brain clearance. *Physiology, 40*(3), 271–290. https://doi.org/10.1152/physiol.00019.2024

van Praag, H., Kempermann, G., & Gage, F. H. (1999). Running increases cell proliferation and neurogenesis in the adult mouse

dentate gyrus. *Nature Neuroscience, 2*(3), 266–270. https://doi.org/10.1038/6368

World Health Organization. (2018). *Global action plan on physical activity 2018–2030: More active people for a healthier world*. https://www.who.int/publications/i/item/9789241514187

World Health Organization. (2020). *WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240015128

World Health Organization. (2021). *Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240029200

World Health Organization. (2022). *Optimizing brain health across the life course: WHO position paper*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240054561

World Health Organization. (2023). *Mental Health Gap Action Programme (mhGAP) guideline for mental, neurological and substance use disorders* (3rd ed.). https://www.who.int/publications/i/item/9789240084278

Ye, Y., Lin, H., Wan, M., Qiu, P., Xia, R., He, J., Tao, J., Chen, L., & Zheng, G. (2021). The effects of aerobic exercise on oxidative stress in older adults: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Physiology, 12*, 701151. https://doi.org/10.3389/fphys.2021.701151

Yuan, Y., Yang, Y., Hu, X., Zhang, L., Xiong, Z., Bai, Y., Zeng, J., & Xu, F. (2024). Effective dosage and mode of exercise for enhancing cognitive function in Alzheimer's disease and dementia: A systematic review and Bayesian model-based network meta-analysis of RCTs. *BMC Geriatrics, 24*, 480. https://doi.org/10.1186/s12877-024-05060-8

Zhang, W., Zhou, C., & Chen, A. (2024). A systematic review and meta-analysis of the effects of physical exercise on white matter integrity and cognitive function in older adults. *GeroScience, 46*(2), 2641–2651. https://doi.org/10.1007/s11357-023-01033-8

Zheng, R., Huang, S., Yang, J., Zhao, P., & Li, E. (2025). The therapeutic effects of physical activity on children with attention deficit hyperactivity disorder: A systematic review and meta-analysis. *Medicine, 104*(16), e42063. https://doi.org/10.1097/MD.0000000000042063

Zhou, X., Kong, Y., Yu, B., Shi, S., & He, H. (2025). Effects of exercise on sleep quality in general population: Meta-analysis and systematic review. *Sleep Medicine, 125*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.sleep.2024.10.036

4. BÖLÜM

Paralimpik Sporlarda Performans Teknolojileri

Mehmet AYDOĞAN[1]

1 İstanbul Gelişim Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, meaydogan@gelisim.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6856-8319

Giriş

Paralimpik spor, insan performansının yalnızca fizyolojik kapasite ve teknik beceriyle değil, sporcuya özgü ekipman, ölçüm sistemleri ve çevresel düzenlemelerle birlikte üretildiği seçkin bir rekabet alanıdır. Koşu protezleri, yarış tekerlekli sandalyeleri, oturma sistemleri, atış sehpaları, görsel ve işitsel yönlendirme araçları, giyilebilir sensörler ve video tabanlı analiz çözümleri sporcunun işlevsel kapasitesini sportif göreve aktarabilmesini sağlar. Teknoloji burada bedensel eksikliği telafi eden ikincil bir unsur değildir; hareket tekniğinin, ekipmanla etkileşimin ve güvenli performansın bileşenlerinden biridir (Burkett, 2010; Dyer, 2020).

Performans teknolojilerinin etkisi, cihazın teknik özelliklerinden daha geniş bir çerçevede değerlendirilmelidir. Aynı protez ayağın iki sporcuda farklı eklem yükleri oluşturması, aynı tekerlekli sandalye geometrisinin gövde kontrolü ve üst ekstremite kuvveti farklı sporcularda ayrı sonuçlar üretmesi mümkündür. Başarılı uygulama; sporcunun engel türü, işlevsel profili, antropometrik özellikleri, branşın kuralları, hareket görevi ve yarışma çevresi arasında kurulan uyuma dayanır. Paralimpik performans teknolojisinin temel birimi cihaz

değil, sporcu-cihaz-çevre sistemidir (Mason vd., 2013; Rum vd., 2021).

Teknolojik yenilikler rekabet olanaklarını genişletirken adalet, erişilebilirlik ve düzenleme sorunlarını da görünür kılar. Yüksek maliyetli karbon kompozitler, kişiye özel üretim, patentli bileşenler ve ileri ölçüm laboratuvarları ülkeler ile sporcular arasındaki kaynak farkını büyütebilir. Ayrıca bir cihazın kaybedilen işlevi telafi etmesi ile biyolojik kapasitenin ötesinde avantaj üretmesi arasındaki sınır her zaman açık değildir. Uluslararası Paralimpik Komite ekipman politikasında güvenlik, erişilebilirlik, evrensel tasarım, fiziksel becerinin önceliği ve haksız avantajın önlenmesi ilkelerini birlikte ele almaktadır (World Para Athletics, 2024).

Bölüm; yardımcı spor ekipmanlarını, biyomekanik ve fizyolojik ölçüm araçlarını, giyilebilir sistemleri, veri analitiğini, sınıflandırmada teknoloji kullanımını, yaralanma önleme uygulamalarını ve etik-yönetsel sorunları bütüncül biçimde incelemektedir. Amaç, performans teknolojilerinin hangi mekanizmalarla yarar sağladığını, hangi sınırlılıklar altında yorumlanması gerektiğini ve antrenman ortamına nasıl aktarılabileceğini spor bilimleri açısından açıklamaktır (Burkett, 2010; Dyer, 2020).

Paralimpik Performans Teknolojisinin Kavramsal Çerçevesi

Performans teknolojisi; sportif hareketi ölçen, destekleyen, yönlendiren veya optimize eden araç, yöntem ve veri işleme süreçlerinin tümünü kapsar. Paralimpik sporda üç işlev öne çıkar: hareketin gerçekleştirilmesini mümkün kılma, mevcut işlevsel kapasitenin verimli kullanılmasını sağlama ve antrenman kararlarını nesnel verilerle destekleme. Protez, ortez ve tekerlekli sandalye ilk iki işlevi; kuvvet platformu, hareket yakalama, elektromiyografi, kalp atım hızı ölçümü ve atalet sensörleri üçüncü işlevi temsil eder. Aynı sistem birden fazla amaca hizmet edebilir; sensörlü tekerlek hem hareketi mümkün kılan ekipmanın parçası hem de itiş tekniğini ölçen bir

laboratuvar aracı hâline gelebilir (Burkett, 2010; Rum vd., 2021).

Yardımcı teknoloji ile performans artırıcı teknoloji arasındaki ayrım uygulamada geçirgendir. Günlük yaşam protezi yürüme güvenliği ve enerji ekonomisi için tasarlanırken koşuya özgü protez yüksek hızda elastik enerji depolama ve geri verme amacı taşır. Günlük tekerlekli sandalyede manevra kolaylığı, oturma konforu ve erişilebilirlik belirleyiciyken yarış sandalyesinde aerodinamik sürüklenme, yuvarlanma direnci, kütle dağılımı ve itiş pozisyonu öne çıkar. Spor ekipmanı, rehabilitasyon cihazından farklı performans ölçütleri ve güvenlik yükleriyle değerlendirilmelidir (Burkett, 2010).

Teknolojinin değeri yalnızca laboratuvar doğruluğuyla belirlenmez. Ölçümün antrenman sahasında tekrarlanabilir olması, sporcuyu rahatsız etmemesi, cihazın hareket tekniğini değiştirmemesi ve verinin antrenör tarafından yorumlanabilmesi gerekir. Optik hareket yakalama yüksek uzamsal doğruluk sağlasa da geniş saha, su ortamı veya yarışma koşullarında sınırlıdır. IMU, GPS ve tekerlek kodlayıcıları daha düşük maliyet ve yüksek ekolojik geçerlik sunar; buna karşılık sinyal sürüklenmesi, yerleşim farklılığı ve algoritma bağımlılığı ölçüm hatası doğurabilir (Camomilla vd., 2018; Rum vd., 2021).

Paralimpik sporcularda bireyler arası çeşitlilik, standart referans aralıklarının kullanımını güçleştirir. Lezyon düzeyi, kas tonusu, duyu kaybı, uzuv eksikliği, gövde kontrolü ve otonom sinir sistemi etkilenimi aynı branş içinde farklı fizyolojik yanıtlar yaratabilir. Teknoloji verisi, engelli olmayan sporculardan elde edilen normlara doğrudan göre yorumlanmamalıdır. Kişisel başlangıç değerleri, spor sınıfı, teknik görev ve ekipman konfigürasyonu kayıt altına alınarak uzunlamasına izlem yapılması daha güvenilir bir yaklaşımdır (Burkett, 2010; Rum vd., 2021).

Protez ve Ortez Teknolojileri

Koşuya özgü alt ekstremite protezleri, karbon fiber kompozitlerden üretilen kavisli yay elemanları aracılığıyla yüklenme sırasında elastik enerji depolar ve itiş evresinde enerjinin bir bölümünü geri verir. İnsan ayak bileği-kas kompleksinin aktif güç üretimini bütünüyle taklit etmez; sertlik, eğrilik, uzunluk, hizalama ve soket bağlantısı sporcunun kütlesi, koşu hızı ve amputasyon düzeyine göre ayarlanır. Protez seçimi yalnızca model tercihi değildir. Soket uyumu, rezidüel uzuv cilt sağlığı, basınç dağılımı, pelvis kontrolü ve karşı ekstremite yüklenmesi performansı doğrudan etkiler (Brüggemann vd., 2008; Beck vd., 2016).

Protez sertliğinin yetersiz olması aşırı deformasyona ve mekanik kayba, fazla olması ise yük aktarımının sertleşmesine ve kontrol güçlüğüne yol açabilir. Hizalama değişiklikleri temas süresi, adım frekansı, dikey salınım ve eğri koşu mekaniği üzerinde etkilidir. Ayar süreci video, yer tepki kuvveti, basınç ölçümü ve sporcunun algısal geribildirimi birlikte kullanılarak yürütülmelidir. Tek bir laboratuvar testinde en yüksek hızı veren düzenek, uzun süreli antrenmanda cilt hasarı veya bel ağrısı yaratıyorsa sürdürülebilir performans seçeneği değildir (Dyer, 2020).

Koşu protezlerinin rekabet avantajı tartışması, enerji geri dönüşü kadar protez uzunluğu ve sporcunun erişebildiği etkili bacak uzunluğu üzerinde yoğunlaşmıştır. Weyand ve arkadaşları (2009), belirli bir bilateral amputasyon örneğinde koşunun fizyolojik ve mekanik özelliklerini incelemiş; sonraki çalışmalar avantajın kullanılan değişkene, hıza, viraja ve sporcuya göre farklı yorumlanabileceğini göstermiştir. Dünya Para Atletizm kuralları protez kullanan sporcular için azami izin verilen ayakta durma boyunu hesaplayan ölçüm sistemleri uygular ve gerçek dışı adım uzunluğu ya da enerji avantajı doğuran ekipmanı sınırlar (World Para Athletics, 2024). Bilimsel değerlendirme, tek bir performans çıktısından hareketle genelleme yapmak yerine çoklu biyomekanik ölçütlere dayanmalıdır.

Üst ekstremite protezleri ve ortezler bisiklet, kürek, okçuluk ve kış sporlarında tutuş, kuvvet aktarımı ve eklem stabilitesi sağlar. Tasarımda hızlı bırakma mekanizmaları, darbe güvenliği, sürtünme, terleme ve tekrarlayan yükler dikkate alınır. Kişiye özel üretimde üç boyutlu tarama ve eklemeli imalat, geometrinin hassas biçimde uyarlanmasına ve prototipleme süresinin kısalmasına yardım eder. Malzeme dayanımı, bağlantı noktaları ve yarışma kurallarına uygunluk saha kullanımından önce mekanik testlerle doğrulanmalıdır (Dyer, 2020).

Teknolojik uyarlamanın merkezinde disiplinler arası ekip bulunur. Protez-ortez uzmanı, biyomekanist, fizyoterapist, hekim, antrenör ve sporcu aynı performans hedefini farklı göstergeler üzerinden izler. Sporcunun konfor ve kontrol algısı, sayısal ölçümlerin yerine geçmez; ancak ölçümlerle birlikte kararın vazgeçilmez parçasıdır. Cihaz ayarlarının tarihçesi, kullanılan bileşenler, soket sorunları, cilt tepkileri ve performans değişimleri düzenli kaydedilmelidir (Dyer, 2020).

Tekerlekli Sandalye, El Bisikleti ve Oturma Sistemleri

Tekerlekli sandalye sporlarında sandalye, sporcunun kuvvetini zemine aktaran mekanik arayüzdür. Yarış, basketbol, ragbi, tenis ve eskrim sandalyeleri branşa özgü geometrilere sahiptir. Tekerlekli sandalye sporlarında performansın geliştirilmesi yalnızca ekipman, biyomekanik uyum ve fiziksel kapasiteyle sınırlı değildir; antrenman sürecinin davranışsal ve psikososyal çıktıları da bütüncül performans yaklaşımının bir parçası olarak değerlendirilmelidir. Şahinler, Ulukan ve Atasoy (2026), sekiz haftalık bir antrenman programının tekerlekli sandalye tenisçilerinin sportif karakter ve ahlaki yaklaşım düzeylerinde anlamlı gelişmeler oluşturduğunu bildirmiştir. Bu bulgu, paralimpik sporlarda performans teknolojileri değerlendirilirken fiziksel ve teknik göstergelerin yanı sıra sporcunun sportif karakteri ve ahlaki gelişiminin de dikkate alınmasının önemini göstermektedir. Yarış sandalyelerinde üç tekerlekli uzun şasi, düşük oturma pozisyonu ve aerodinamik düzen; salon sporlarında kısa dönüş yarıçapı, kamber açısı, çarpışma

güvenliği ve yön değiştirme kapasitesi belirleyicidir. Sporcu ile sandalye arasındaki mekanik uyum bozulduğunda güçlü bir üst gövde dahi etkili ivmelenme üretemez (Mason vd., 2013).

Oturma yüksekliği, oturma derinliği, sırtlık yüksekliği, koltuk açısı, dingil konumu, kamber, lastik basıncı ve toplam kütle itiş mekaniğini değiştirir. Daha alçak oturma pozisyonu tekerlekle temas açısını artırabilir; aşırı alçaklık omuz hareket açıklığını ve görüşü sınırlayabilir. Arka tekerleğin öne alınması manevrayı kolaylaştırırken devrilme riskini yükseltebilir. Optimum geometri, performans göstergesi ile güvenlik ve işlevsel kontrolün ortak değerlendirilmesini gerektirir. Rum ve arkadaşlarının (2021) derlemesi, giyilebilir sensörlerin sandalye ayarlarının hızlanma, dönüş ve kas aktivitesi üzerindeki etkisini ölçmek için kullanıldığını göstermektedir.

Tekerlek göbeğine veya şasiye yerleştirilen IMU ve kodlayıcılar doğrusal hız, açısal hız, itiş sayısı, itiş frekansı, duruş süresi ve dönüş yükünü kaydedebilir. van der Slikke ve arkadaşları (2020), giyilebilir tekerlekli sandalye hareketlilik ölçümünün antrenman ve maç performansını saha koşullarında nicelleştirebildiğini belirtmektedir. Basketbol ve ragbide yalnızca toplam mesafe sınırlı bilgi verir; yüksek ivmelenme sayısı, rotasyonlar, çarpışmalar ve düşük hızda konum mücadelesi branşın gerçek yükünü daha iyi temsil eder.

El bisikletinde krank uzunluğu, krank ekseninin omuza göre konumu, sırtlık açısı, gövde sabitlemesi ve vites oranı güç üretimini etkiler. Ergometre, güç ölçer, EMG ve hareket analizi birlikte kullanılarak omuz-dirsek koordinasyonu ile mekanik verim incelenebilir. Güç ölçerin kalibrasyonu, cihazın hangi noktada ölçüm yaptığı ve tek taraflı ölçümün çift taraflı güce nasıl dönüştürüldüğü açıkça kaydedilmelidir. Standart bisiklet algoritmalarının el bisikletine doğrudan uygulanması hatalı yük tahminleri yaratabilir (Mason vd., 2013).

Oturma arayüzündeki basınç haritalama sistemleri performans ve sağlık açısından önem taşır. Duyu kaybı bulunan sporcularda uzun süreli yüksek basınç doku hasarı riskini artırır. Basınç tepe değeri tek başına yeterli değildir; basıncın

süresi, dağılımı, kayma kuvvetleri, sıcaklık ve nem birlikte değerlendirilmelidir. Minder seçimi ve sabitleme sistemi gövde stabilitesini artırırken solunum hareketini veya üst ekstremite erişimini kısıtlamamalıdır (Rum vd., 2021; van der Slikke vd., 2020).

Biyomekanik Ölçüm ve Hareket Analizi

Biyomekanik analiz, performans teknolojisinin tasarım ve değerlendirme omurgasını oluşturur. Kinematik ölçümler eklem açıları, hız, ivme ve hareket zamanlamasını; kinetik ölçümler kuvvet, moment, basınç ve güç üretimini açıklar. Paralimpik sporda hareketin yalnızca vücut segmentleri üzerinden çözümlenmesi eksik kalır. Protez deformasyonu, tekerlek dönüşü, sandalye-sporcu temasları ve yardımcı cihazın zemine uyguladığı kuvvet aynı zaman ekseninde incelenmelidir (Rum vd., 2021).

Üç boyutlu optik hareket yakalama, hassas eklem kinematiği için referans yöntemlerden biridir. Yansıtıcı işaretleyicilerin anatomik noktalara yerleştirilmesi, uzuv eksikliği veya atipik segment geometrisi bulunan sporcularda standart modellerin değiştirilmesini gerektirir. Yumuşak doku artefaktı, protez üzerindeki işaretleyicinin biyolojik eklemi temsil etmemesi ve sandalyenin görüşü kapatması özel hata kaynaklarıdır. Araştırma raporlarında kullanılan segment modeli, filtreleme yöntemi ve ekipman koordinat sistemi belirtilmelidir (Camomilla vd., 2018; Rum vd., 2021).

Kuvvet platformları, aletli tekerlekler, basınç tabanlıkları ve yük hücreleri kuvvet aktarımını ölçer. Koşu protezinde dikey yükleme hızı ve temas süresi; tekerlekli sandalye itişinde teğetsel kuvvet, mekanik etkinlik ve itiş momenti; atma branşlarında sabitleme sehpasına aktarılan kuvvet önemli göstergelerdir. Ölçüm sisteminin örnekleme frekansı hızlı darbe olaylarını yakalayacak düzeyde olmalı, sensör kalibrasyonu her oturumdan önce kontrol edilmelidir (Beck vd., 2016).

Yüzey elektromiyografisi kas aktivasyon zamanlamasını ve göreli aktivite düzeyini incelemeye yardım eder. Elektrot yerleşimi, deri hazırlığı, terleme, kas atrofisi, spastisite ve cihaz kayışlarının oluşturduğu hareket artefaktları sinyal kalitesini etkiler. Genlik karşılaştırmalarında normalizasyon yöntemi özellikle önemlidir; maksimal istemli kasılma bazı nörolojik etkilenimlerde güvenilir referans oluşturmayabilir. Göreve özgü submaksimal referans kasılmalar veya birey içi uzunlamasına karşılaştırmalar tercih edilebilir (Rum vd., 2021).

Video analizi laboratuvar dışındaki en erişilebilir yöntemlerden biridir. Yüksek hızlı kamera; protez temas zamanını, sandalye itiş döngüsünü, yüzme çıkışını veya boccia atışını çözümleyebilir. Kamera düzlemi, kare hızı, ölçeklendirme ve perspektif hatası kontrol edilmeden yapılan görsel yorum yanıltıcıdır. İki boyutlu ölçüm, hareketin baskın olarak tek düzlemde gerçekleştiği teknik görevlerle sınırlandırılmalı; çok düzlemli dönüşlerde üç boyutlu veya çok kameralı sistemler kullanılmalıdır (Camomilla vd., 2018; Rum vd., 2021).

Giyilebilir Sensörler ve Saha Temelli Performans İzleme

Giyilebilir sensörler, laboratuvar ölçümünü antrenman ve yarışma çevresine taşır. İvmeölçer, jiroskop ve manyetometre içeren IMU'lar vücut segmentine, proteze, tekerleğe veya spor ekipmanına sabitlenebilir. Kalp atım hızı sensörleri, GNSS/GPS alıcıları, taşınabilir metabolik ölçüm, kas oksijenasyonu ve sıcaklık sensörleri fizyolojik yükü tamamlar. Rum ve arkadaşları (2021), engelli bireylerin sporlarında en sık IMU ve EMG kullanıldığını; uygulamaların performans tanımlama, sınıflandırma, yaralanma önleme ve ekipman kişiselleştirmede toplandığını bildirmiştir.

Sensör verisinin anlamlı olabilmesi için yerleşim ve veri işleme standardı gerekir. Tekerlek eksenine yerleştirilen jiroskop hız ve dönüşü güvenilir biçimde tahmin edebilir; şasideki sensör çarpışma ve titreşimden daha fazla etkilenebilir. Protez üzerindeki sensör cihazın hareketini, rezidüel uzuv üzerindeki sensör biyolojik segmentin hareketini temsil eder. Her iki veri

aynı değildir. Sensör yönelimi, sabitleme biçimi, örnekleme frekansı ve filtre parametreleri antrenman günlüğünde tutulmalıdır (Camomilla vd., 2018; van der Slikke vd., 2020).

Dış yük sporcunun yaptığı mekanik işi, iç yük organizmanın verdiği fizyolojik ve algısal yanıtı ifade eder. Mesafe, hız, ivmelenme, itiş sayısı ve güç dış yüke; kalp atım hızı, kan laktatı, algılanan zorluk ve toparlanma göstergeleri iç yüke örnek verilebilir. Omurilik yaralanması olan sporcularda kalp atım hızının egzersiz yoğunluğunu yansıtma gücü lezyon düzeyi ve otonom etkilenime göre değişebilir. Kalp hızı bölgeleri kişiye özgü testlerden türetilmeli, genel nüfus formülleriyle belirlenmemelidir (Goosey-Tolfrey & Leicht, 2013).

Takım sporlarında sensör verileri teknik-taktik olaylarla eşleştirilmelidir. Yüksek ivmelenmenin topa ulaşma, savunma dönüşü veya çarpışma sonrasında oluşması antrenörlük açısından farklı anlam taşır. Video zaman damgası ile tekerlek sensörü eşleştirildiğinde fiziksel yükün oyun eylemi içindeki karşılığı görülebilir. Veri hacminin artması daha iyi karar anlamına gelmez; az sayıda, geçerli ve eyleme dönük gösterge seçilmelidir (Rum vd., 2021).

Saha sistemlerinin geçerlik ve güvenirliği kullanıcı grubunda test edilmelidir. Bir algoritmanın engelsiz koşuda adım sayısını doğru vermesi, koşu protezi kullanan sporcuda veya çerçeve koşusunda aynı doğruluğu garanti etmez. Cihaz yazılımı güncellendiğinde algoritma değişebilir ve uzunlamasına seriler kesintiye uğrayabilir. Ham veriye erişim, sürüm kaydı ve çapraz doğrulama performans ekibinin veri yönetişim planında yer almalıdır (Camomilla vd., 2018; van der Slikke vd., 2020).

Fizyolojik İzlem, Termoregülasyon ve Toparlanma

Paralimpik performansın fizyolojik izlenmesi, engel türüne özgü yanıtların anlaşılmasını gerektirir. Üst ekstremite ağırlıklı egzersizde aktif kas kütlesi daha düşük, lokal kas yorgunluğu daha erken ve omuz kuşağı yükü daha yüksek olabilir.

Omurilik yaralanmasında sempatik kontrolün etkilenmesi kalp hızı, kan akımı ve terleme yanıtlarını değiştirir. Serebral palside istemsiz kas aktivitesi ve hareket ekonomisi farklılaşabilir. Standart yük testlerinin protokolü spor dalına ve işlevsel profile uyarlanmalıdır (Goosey-Tolfrey & Leicht, 2013).

Laboratuvar değerlendirmesinde tekerlekli sandalye veya el bisikleti ergometresi, sporcunun kendi ekipmanının sabitlendiği rulo sistemleri ve portatif metabolik analiz kullanılabilir. Tepe oksijen tüketimi, ventilasyon, solunum değişim oranı, güç ve algılanan zorluk birlikte yorumlanır. Testin sonlandırma ölçütleri, ekipman ayarı ve sabitleme yöntemi tekrar testlerinde aynı tutulmalıdır. Üst ekstremite egzersizinde geleneksel maksimal test ölçütlerinin tümü ortaya çıkmayabileceğinden tek ölçüte dayalı karar verilmemelidir (Griggs vd., 2020).

Isı stresi, özellikle terleme ve deri kan akımı sınırlanan sporcularda ciddi performans ve sağlık sorunudur. Yüksek çevre sıcaklığı, koruyucu ekipman, protez soketi ve sınırlı ısı kaybı çekirdek sıcaklığını yükseltebilir. Griggs ve arkadaşları (2020), omurilik yaralanması, uzuv eksikliği, serebral palsi ve görme yetersizliği bulunan sporcularda termoregülasyonun farklı mekanizmalarla etkilenebildiğini vurgulamaktadır. Isı stratejisi tanıya göre değil, bireysel terleme yanıtı, kullanılan ekipman ve yarışma koşullarına göre planlanmalıdır.

Soğuk içecek, buz yeleği, soğutma havlusu, ön soğutma ve mola aralarında bölgesel soğutma uygulanabilir. Duyu kaybı bulunan bölgelerde aşırı soğuk uygulaması doku hasarı yaratabileceğinden sıcaklık ve süre kontrol edilmelidir. Giyilebilir deri veya çekirdek sıcaklık sensörleri yararlı olsa da ölçüm doğruluğu, gecikme ve cihazın onay durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Dünya Para Atletizm sıcak hava önlemlerini yarışma organizasyonu düzeyinde ayrıca düzenlemektedir (World Para Athletics, 2024).

Uyku, kas ağrısı, rezidüel uzuv durumu, cilt bütünlüğü, algılanan toparlanma ve günlük yaşam yükü dijital günlüklerde izlenebilir. Protez veya sandalye kullanan sporcuda ekipman kaynaklı ağrı, antrenman yükü artışından önce performansı

bozabilir. Kısa öz bildirim ölçekleri fizyolojik verilerle birlikte kullanıldığında erken uyarı sağlar. İzleme sistemi cezalandırıcı seçme aracına dönüşmemeli; sporcu verinin hangi amaçla toplandığını ve kimlerin erişebileceğini bilmelidir (Griggs vd., 2020).

Görüntü, Ses ve Erişilebilir Geribildirim Teknolojileri

Performans geribildirimi görsel, işitsel ve dokunsal kanallara uyarlanmalıdır. Görme yetersizliği bulunan sporcularda sesli yönlendirme, mekânsal ses işaretleri ve dokunsal titreşim; işitme yetersizliği bulunan sporcularda ışıklı başlangıç sistemleri ve görsel uyarılar performansın güvenli biçimde yürütülmesini sağlar. Geribildirim aracı sporcunun duyusal profiline göre seçilmeli, yarışma kurallarıyla uyumlu olmalı ve antrenmanda sistematik biçimde öğretilmelidir (Burkett, 2010; Rum vd., 2021).

Video geribildirimi, ekran büyütme, yüksek kontrast, yavaş gösterim, farklı kamera açıları ve sesli betimleme ile erişilebilir hâle getirilebilir. Motor öğrenmede aşırı sık geribildirim bağımlılık yaratabilir. Sporcuya her denemeden sonra ayrıntılı veri vermek yerine teknik hedefe uygun aralıklarla özet bilgi sunmak daha yararlı olabilir. Karmaşık gösterge panelleri yerine sporcunun kontrol edebileceği bir veya iki performans değişkeni seçilmelidir (World Para Athletics, 2024).

Yüzmede dokunma çubuğu, görme yetersizliği bulunan sporcunun duvara yaklaşımını bildirir; atletizmde rehber koşucu ile bağlantı ve sesli çağrı sistemleri yönelim sağlar. Teknoloji, insan rehberliğini bütünüyle ortadan kaldırmak zorunda değildir. Güvenilir insan-cihaz iletişimi, gecikme ve hata toleransı yarışma performansının parçasıdır. Sistem arızası için önceden belirlenmiş yedek iletişim yöntemi bulunmalıdır (Burkett, 2010; Rum vd., 2021).

Sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik, yarışma ortamını kontrollü biçimde canlandırma, taktik senaryo tekrarı ve algısal beceri eğitimi için potansiyel taşır. Başlık ağırlığı, görsel

hareket hastalığı, erişilebilir kontrol arayüzü ve gerçek hareketle aktarım sorunu göz ardı edilmemelidir. Etkililik, teknolojik yenilik izlenimiyle değil, öğrenme ve performans ölçütleriyle sınanmalıdır (World Para Athletics, 2024).

Veri Analitiği ve Karar Destek Sistemleri

Performans analitiği, farklı kaynaklardan gelen verileri antrenman kararına dönüştürür. Sensör, video, fizyolojik test, öz bildirim, sağlık kaydı ve ekipman ayarlarının ortak zaman çizelgesinde birleştirilmesi sporcunun yük-performans ilişkisini görünür kılar. Analiz süreci veri temizleme, eksik veri yönetimi, bireysel normalleştirme ve belirsizliğin raporlanmasını içermelidir. Renkli gösterge paneli bilimsel geçerlik yerine geçmez (Camomilla vd., 2018; Rum vd., 2021).

Makine öğrenmesi; hareket örüntüsü tanıma, yorgunluk sınıflama, ekipman ayarı önerme ve sakatlık riskini inceleme amacıyla kullanılabilir. Paralimpik sporcu örneklemleri çoğunlukla küçük ve heterojendir. Çok sayıda değişkenle az sayıda sporcudan kurulan modeller aşırı uyum gösterir ve yeni sporcularda başarısız olabilir. Çapraz doğrulama sporcu düzeyinde yapılmalı; aynı sporcunun oturumları hem eğitim hem test kümesine dağıtılmamalıdır. Model performansı yalnızca doğrulukla değil duyarlılık, özgüllük, kalibrasyon ve güven aralıklarıyla sunulmalıdır (Tweedy & Vanlandewijck, 2011).

Algoritmik adalet, engel gruplarının veri setinde temsiliyle ilişkilidir. Tekerlekli sandalye sporlarından elde edilen yoğun veri, yüzme, boccia, goalball veya kış sporlarına ait az sayıda kayıtla aynı genellenebilirliğe sahip değildir. Ticari algoritmanın eğitim verisi açıklanmıyorsa sporcuya özgü sapma değerlendirilemez. Karar destek sistemi antrenör ve sağlık ekibinin muhakemesini desteklemeli, sınıflandırma veya spora katılım kararını tek başına vermemelidir (Camomilla vd., 2018; Rum vd., 2021).

Veri sahipliği ve mahremiyet performans ortamında açık protokoller gerektirir. Sağlık durumu, engel profili, protez

ayarı ve sınıflandırma verileri hassas kişisel verilerdir. Sporcu onamı, amaçla sınırlılık, erişim yetkisi, saklama süresi ve silme yöntemi belirlenmelidir. Takım değiştiren sporcunun verilerinin kimde kalacağı ve araştırma amacıyla kullanım koşulları sözleşmede açıklanmalıdır (Tweedy & Vanlandewijck, 2011).

Teknoloji ve Kanıta Dayalı Sınıflandırma

Paralimpik sınıflandırma, uygun bir engeli bulunan sporcuları performans üzerindeki işlevsel etkinin büyüklüğüne göre spor sınıflarına ayırmayı amaçlar. Sistem tanıya dayalı eşleştirmeden ibaret değildir; spor dalındaki temel görevlerin hangi işlevlerden etkilendiğini açıklayan kanıta ihtiyaç duyar. Kanıta dayalı sınıflandırma yaklaşımı, engelin performans üzerindeki etkisini ölçen geçerli testlerin geliştirilmesini öngörür (Tweedy & Vanlandewijck, 2011).

Atalet sensörleri, EMG, kuvvet ölçümü ve video; gövde kontrolü, hareket açıklığı, kuvvet üretimi ve sportif görev performansı arasındaki ilişkiyi nesnelleştirebilir. Ölçümün sınıflandırmada kullanılabilmesi için ayırt edicilik, test-tekrar test güvenirliği, farklı ekipmanlarda kararlılık ve kasıtlı performans düşürmeye karşı dayanıklılık gösterilmelidir. Rum ve arkadaşları (2021), sensör temelli sınıflandırma çalışmalarının umut verici olmakla birlikte örneklem ve doğrulama bakımından sınırlı kaldığını belirtmektedir.

Sınıflandırma testi antrenman performansı ölçümünden farklı hukuki ve etik ağırlığa sahiptir. Hatalı ölçüm sporcunun sınıfını, seçilme olasılığını ve kariyerini etkileyebilir. Otomatik puanlama algoritmaları açıklanabilir olmalı; sporcu ölçüm prosedürünü, itiraz yolunu ve verinin kullanımını anlayabilmelidir. Teknoloji sınıflandırıcının klinik ve teknik değerlendirmesini ortadan kaldırmak yerine standartlaştırma ve belgelemeyi güçlendirmelidir (World Para Athletics, 2024).

Ekipmanın sınıflandırma üzerindeki etkisi de ayrıştırılmalıdır. Sandalye ayarı gövde stabilitesini, protez uzunluğu adım mekaniğini, sabitleme kayışları kuvvet aktarımını

değiştirebilir. Test protokolü sporcunun hangi ekipmanla değerlendirildiğini tanımlamalı ve sınıf ölçümü ile ekipman optimizasyonunun birbirine karışmasını önlemelidir (Tweedy & Vanlandewijck, 2011).

Yaralanma Önleme, Güvenlik ve Sağlık Teknolojileri

Paralimpik sporcularda yaralanma profili branş, engel türü ve kullanılan ekipmana göre değişir. Tekerlekli sandalye sporlarında omuz aşırı kullanım sorunları; protez kullanan koşucularda rezidüel uzuv, cilt, bel ve karşı ekstremite yükleri; duyu kaybında basınç yaraları; sıcak ortamda ısı hastalığı öne çıkabilir. Teknolojik izlem, yalnızca sakatlık ortaya çıktıktan sonra tanımlama değil, değiştirilebilir yük örüntülerini erken belirleme amacı taşımalıdır (Rum vd., 2021; Griggs vd., 2020).

Omuz hareketinin IMU ile izlenmesi, EMG ile kas yorgunluğunun değerlendirilmesi ve aletli tekerlekle itiş kuvvetinin ölçülmesi tekrarlayan yükü nicelleştirir. Yüksek itiş frekansı veya olumsuz kuvvet yönü teknik müdahale gerektirebilir. Tek bir eşik bütün sporcular için geçerli değildir. Ağrı, eklem hareketi, kas kuvveti, antrenman yükü ve sandalye ayarı ortak değerlendirilmelidir (Mason vd., 2013).

Protez soketinde basınç, sıcaklık ve nem sensörleri cilt sorunlarının izlenmesine yardım edebilir. Sensörün kendisi temas basıncını artırmamalı ve sinyal kabloları hareketi bozmamalıdır. Cilt kontrolü sensör uyarısına bırakılmamalı; sporcu ve sağlık ekibi düzenli görsel değerlendirmeyi sürdürmelidir. Protez bileşenlerinde yorulma çatlağı, gevşek bağlantı ve laminasyon hasarı için planlı teknik bakım yapılmalıdır (Rum vd., 2021; Griggs vd., 2020).

Koruyucu teknoloji yeni riskler de üretir. Sensör uyarılarına aşırı güven, yanlış negatif sonuçlarda tehlikelidir; alarm fazlalığı ise uyarı yorgunluğu yaratır. Sistem arızası, pil tükenmesi, veri kaybı ve kablosuz bağlantı sorunu risk analizine dâhil edilmelidir. Kritik sağlık kararları doğrulanmamış tüketici cihazlarına dayandırılmamalıdır (Mason vd., 2013).

Adalet, Erişim, Etik ve Yönetişim

Paralimpik teknolojide adalet, bütün sporcuların aynı ekipmanı kullanması anlamına gelmez. Farklı işlevsel gereksinimler kişiselleştirmeyi zorunlu kılar. Adil düzenleme; cihazın güvenli olmasını, sportif beceriyi merkezde tutmasını, makine kaynaklı güç üretmemesini ve erişilebilirlik bakımından kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını hedefler. IPC ekipman politikası teknoloji kullanımını performans, güvenlik, evrensel erişim ve sporun özünün korunması ilkeleri üzerinden ele alır (World Para Athletics, 2024).

Dünya Para Atletizm, gerçek dışı atış yüksekliği veya adım uzunluğu sağlayan, genel erişime açık olmayan ya da enerji üretip genel rekabet avantajı oluşturan ekipmanı inceleme ve yasaklama yetkisine sahiptir. Elektronik motorlar veya robotik mekanizmalarla performans üreten sistemler yarışmada yasaktır; belirli ekipmanlara ilişkin ayrıntılar branş kurallarında düzenlenir (World Para Athletics, 2024). Düzenleyici kararların şeffaf ölçütlere ve bağımsız teknik incelemeye dayanması sporcu güveni için gereklidir.

Erişim eşitsizliği, yüksek gelirli ülkelerin sporcularına daha çok prototip, laboratuvar süresi ve teknik destek sağlayabilir. Ticari erişilebilirlik kuralı tek başına ekonomik erişilebilirliği garanti etmez. Ortak ekipman merkezleri, açık ölçüm protokolleri, uluslararası teknik destek programları ve düşük maliyetli sensör çözümleri kaynak farkını azaltabilir. Paris 2024 ve önceki oyunlarda teknik servislerin protez, ortez ve tekerlekli sandalye onarımı sunması yarışmanın sürekliliği açısından önemli bir uygulamadır (World Para Athletics, 2024).

Sporcunun özerkliği kişiselleştirme sürecinin temelidir. Teknik ekip en hızlı olduğu düşünülen ayarı dayatmamalı; konfor, beden algısı, kullanım güveni ve uzun vadeli sağlık sporcuyla birlikte değerlendirilmelidir. Engelliliği yalnızca teknolojik olarak düzeltilmesi gereken bir eksiklik gibi gören yaklaşım, sporcunun deneyimini daraltır. Teknoloji kişinin bedeniyle ve spor kimliğiyle kurduğu ilişkiyi desteklemelidir (Burkett, 2010; Dyer, 2020).

Araştırma etiğinde küçük örneklemler yeniden tanımlanma riskini artırır. Nadir engel profili, ülke, branş ve derece bilgileri bir araya geldiğinde anonim veri dahi belirli sporcuyu işaret edebilir. Veri paylaşımında ayrıntı düzeyi, yeniden kullanım izni ve güvenli erişim mekanizmaları dikkatle planlanmalıdır (World Para Athletics, 2024).

Türkiye'de Paralimpik Performans Teknolojilerinin Geliştirilmesi

Türkiye'de paralimpik sporların kurumsal gelişimi federasyonlar, Türkiye Milli Paralimpik Komitesi, üniversiteler, sağlık kurumları ve yerel yönetimlerin ortak çalışmasını gerektirir. Sporcu sayısının ve uluslararası başarının artması, kişiye özel ekipman, teknik bakım, biyomekanik analiz ve veri yönetimi kapasitesine olan ihtiyacı büyütmektedir. Türkiye Milli Paralimpik Komitesi'nin branş tanıtımları, tekerlekli sandalye ve yardımcı ekipmanın spor kuralları içindeki yerini kamuoyuna aktaran temel ulusal kaynaklar arasındadır (Şimşek, 2025; Karadaş & Çetiner, 2022).

Ulusal literatürde yaz Paralimpik Oyunlarındaki dijitalleşme ve spor teknolojilerinin dönüşümünü ele alan güncel çalışma; performans ekipmanları, analiz sistemleri, karar destek araçları, yayıncılık ve organizasyon altyapısının birlikte geliştiğini göstermektedir (Şimşek, 2025). Yerli araştırmaların önemli bölümü betimleyici düzeydedir. Sporcuya özgü ekipman ayarını, sensör geçerliğini ve performans değişimini deneysel tasarımla inceleyen çok merkezli çalışmaların artırılması gerekir.

Üniversitelerde kurulacak paralimpik performans laboratuvarları pahalı cihaz koleksiyonları olarak düşünülmemelidir. Modüler bir yapı daha işlevseldir: yüksek hızlı video, taşınabilir kuvvet ve basınç ölçümü, IMU, EMG, tekerlek sensörü, saha testleri ve güvenli veri altyapısı ortak protokollerle kullanılabilir. Spor bilimleri, fizyoterapi, mühendislik, tıp, protez-ortez ve veri bilimi bölümleri aynı projelerde buluşturulmalıdır (Şimşek, 2025; Karadaş & Çetiner, 2022).

Teknik personel eğitimi cihaz satın alımından önce planlanmalıdır. Kalibrasyon, sensör yerleşimi, sinyal işleme, ölçüm hatası, engel grubuna özgü test güvenliği ve etik veri yönetimi için yeterlik standartları oluşturulabilir. Milli takım kamplarında kullanılan kısa test bataryalarının üniversite laboratuvarlarında ayrıntılı değerlendirmelerle ilişkilendirilmesi, saha ile araştırma arasındaki kopukluğu azaltır (Rum vd., 2021; Şimşek, 2025).

Yerli üretim çalışmaları sporcu ihtiyaçlarından başlamalıdır. Üç boyutlu tarama ve eklemeli imalat prototiplemeyi hızlandırabilir; ancak dayanım testi, biyouyumluluk, tamir edilebilirlik ve federasyon kurallarına uygunluk zorunludur. Sporcu, antrenör ve teknisyen tasarımın ilk aşamasından itibaren sürece katılmadığında mühendislik açısından gelişmiş fakat sahada kullanışsız ürünler ortaya çıkabilir (Şimşek, 2025; Karadaş & Çetiner, 2022).

Uygulama İçin Bütünleşik Performans Teknolojisi Modeli

Etkili teknoloji yönetimi gereksinim analiziyle başlar. Önce sportif görev ve performans sorunu tanımlanır: çıkışta güç kaybı, viraj kontrolü, omuz ağrısı, protez soketi rahatsızlığı veya ısı toleransı gibi somut bir soru belirlenir. Ardından ölçülecek değişken, kullanılacak araç ve kabul edilebilir hata düzeyi seçilir. Cihaz mevcut olduğu için ölçüm yapmak yerine karar ihtiyacına uygun teknoloji kullanılmalıdır (Dyer, 2020; Rum vd., 2021).

İkinci aşama başlangıç profilinin oluşturulmasıdır. Sporcunun işlevsel özellikleri, sınıfı, ekipman geometrisi, sağlık durumu, antrenman geçmişi ve temel performans ölçümleri kaydedilir. Ekipmanda tek değişken değiştirilerek kısa ve uzun süreli etkiler incelenir. Aynı gün içinde hız artışı görülmesi adaptasyonun tamamlandığı anlamına gelmez; öğrenme süresi, yorgunluk, cilt tepkisi ve tekrarlı kullanım değerlendirilmelidir (Mason vd., 2013).

Üçüncü aşama saha doğrulamasıdır. Laboratuvar ortamında seçilen ayar antrenman ve yarışma benzeri görevlerde sınanır. Performans, güvenlik ve sporcu algısı birlikte kaydedilir. Ölçümün en küçük saptanabilir değişimi bilinmeden küçük farklar anlamlı gelişme olarak sunulmamalıdır. Değişiklik, cihazın ölçüm hatasından ve sporcunun doğal günlük değişkenliğinden büyük olmalıdır (Dyer, 2020; Rum vd., 2021).

Dördüncü aşama karar ve izlemdir. Antrenör, sporcu, sağlık ekibi ve teknik uzman veriyi ortak toplantıda değerlendirir; tercih edilen ayar, gerekçe ve izlem süresi kaydedilir. Sezon içinde büyüme, vücut kütlesi, kas kuvveti, ağrı veya kural değişikliği ekipman uyumunu değiştirebilir. Periyodik yeniden değerlendirme performans teknolojisinin sürdürülebilirliğini sağlar (Mason vd., 2013).

Bütünleşik modelin başarısı en gelişmiş cihazla değil, doğru soruya verilen güvenilir ve uygulanabilir yanıtla ölçülür. Düşük maliyetli video ve iyi standardize edilmiş saha testi, doğrulanmamış pahalı bir sensörden daha değerli olabilir. Teknolojik kararların sporcunun sağlığına, özerkliğine ve uzun vadeli gelişimine hizmet etmesi temel ölçüttür (Dyer, 2020; Rum vd., 2021).

Sonuç

Paralimpik sporlarda performans teknolojileri, sporcunun işlevsel kapasitesi ile sportif görevin mekanik ve fizyolojik gereklilikleri arasında bağlantı kurar. Protez, ortez, tekerlekli sandalye, el bisikleti ve oturma sistemleri hareketin üretilmesini ve kuvvetin aktarılmasını sağlar; biyomekanik laboratuvar araçları ile giyilebilir sensörler tekniği, yükü ve ekipman etkileşimini ölçer. Fizyolojik izlem, termoregülasyon ve erişilebilir geribildirim sistemleri performansın güvenli biçimde sürdürülmesine katkı verir (Burkett, 2010; Rum vd., 2021).

Teknolojinin yararı kişiselleştirme, geçerli ölçüm ve disiplinler arası karar sürecine bağlıdır. Engel türleri ve işlevsel profiller arasındaki çeşitlilik, engelsiz sporcular için üretilen

normların doğrudan kullanılmasını sınırlar. Uzunlamasına bireysel izlem, ham veri ve algoritma şeffaflığı, ekipman ayarlarının ayrıntılı kaydı ve saha doğrulaması bilimsel niteliği güçlendirir (World Para Athletics, 2024).

Yenilik ile adalet arasındaki denge Paralimpik hareketin temel yönetişim sorunlarından biridir. Cihazın kaybedilen işlevi telafi etmesi, sportif beceriyi görünür kılması, güvenli ve erişilebilir olması beklenir. Makine kaynaklı performans, gerçek dışı mekanik avantaj ve ekonomik erişim eşitsizliği kurallar, bağımsız araştırma ve uluslararası destek mekanizmalarıyla ele alınmalıdır (Şimşek, 2025; Karadaş & Çetiner, 2022).

Türkiye açısından öncelik; sporcu merkezli araştırma ağları, üniversite-federasyon iş birliği, teknik personel eğitimi, ortak ölçüm protokolleri ve doğrulanmış yerli üretim kapasitesidir. Paralimpik performans teknolojisi, yalnızca elit yarışmalarda kullanılan ileri cihazlardan oluşmaz. Bilimsel olarak temellendirilmiş, erişilebilir, bakım yapılabilir ve sporcunun gerçek gereksinimine uyarlanmış her çözüm performans ekosisteminin değerli bir parçasıdır (Burkett, 2010; Rum vd., 2021).

Kaynakça

Beck, O. N., Taboga, P., & Grabowski, A. M. (2016). Characterizing the mechanical properties of running-specific prostheses. *PLOS ONE, 11*(12), e0168298. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168298

Brüggemann, G. P., Arampatzis, A., Emrich, F., & Potthast, W. (2008). Biomechanics of double transtibial amputee sprinting using dedicated sprinting prostheses. *Sports Technology, 1*(4–5), 220–227. https://doi.org/10.1080/19346182.2008.9648460

Burkett, B. (2010). Technology in Paralympic sport: Performance enhancement or essential for performance? *British Journal of Sports Medicine, 44*(3), 215–220. https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.067249

Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., & Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors, 18*(3), 873. https://doi.org/10.3390/s18030873

Dyer, B. (2020). Development of high performance parasport prosthetic limbs: A proposed framework and case study. *Assistive Technology, 32*(4), 214–221. https://doi.org/10.1080/10400435.2018.1527795

Goosey-Tolfrey, V. L., & Leicht, C. A. (2013). Field-based physiological testing of wheelchair athletes. *Sports Medicine, 43*(2), 77–91. https://doi.org/10.1007/s40279-012-0009-6

Griggs, K. E., Stephenson, B. T., Price, M. J., & Goosey-Tolfrey, V. L. (2020). Heat-related issues and practical applications for Paralympic athletes at Tokyo 2020. *Temperature, 7*(1), 37–57. https://doi.org/10.1080/23328940.2019.1617030

Karadaş, B., & Çetiner, H. (2022). Engelli spor politikaları kapsamında Paralimpik Oyunlara bakış. *Journal of Tourism & Gastronomy Studies, 10*(1), 135–155. https://doi.org/10.21325/jotags.2022.983

Mason, B. S., van der Woude, L. H. V., & Goosey-Tolfrey, V. L. (2013). The ergonomics of wheelchair configuration for optimal performance in the wheelchair court sports. *Sports Medicine, 43*(1), 23–38. https://doi.org/10.1007/s40279-012-0005-x

Rum, L., Sten, O., Vendrame, E., Belluscio, V., Camomilla, V., Vannozzi, G., Truppa, L., Notarantonio, M., Sciarra, T., Lazich,

A., Mannini, A., & Bergamini, E. (2021). Wearable sensors in sports for persons with disability: A systematic review. *Sensors, 21*(5), 1858. https://doi.org/10.3390/s21051858

Şahinler, Y., Ulukan, M., & Atasoy, T. (2026). The impact of an 8-week training program on the sportive character and moral approaches of wheelchair tennis players. *PALAESTRA, 40*(1).

Şimşek, A. (2025). 21. yüzyılda yaz Paralimpik Oyunlarında dijitalleşme ve spor teknolojilerinin evrimi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi, 8*(4), 65–93. https://izlik.org/JA98AH29PD

Tweedy, S. M., & Vanlandewijck, Y. C. (2011). International Paralympic Committee position stand—Background and scientific principles of classification in Paralympic sport. *British Journal of Sports Medicine, 45*(4), 259–269. https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.065060

van der Slikke, R. M. A., Berger, M. A. M., Bregman, D. J. J., & Veeger, D. H. E. J. (2020). Wearable wheelchair mobility performance measurement in basketball, rugby, and tennis: Lessons for classification and training. *Sensors, 20*(12), 3518. https://doi.org/10.3390/s20123518

Weyand, P. G., Bundle, M. W., McGowan, C. P., Grabowski, A., Brown, M. B., Kram, R., & Herr, H. (2009). The fastest runner on artificial legs: Different limbs, similar function? *Journal of Applied Physiology, 107*(3), 903–911. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00174.2009

World Para Athletics. (2024). *World Para Athletics rules and regulations 2024*. https://www.paralympic.org/athletics/rules

5.BÖLÜM

Yapay Zekâ Destekli Hareket Analizi ve Motor Performans Değerlendirmesi

Sezer TAŞTAN[2]

2 Ankara Demirspor Kulübü, sezertastann@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-8944-9036

1. GİRİŞ

İnsan hareketinin ölçülmesi; sportif performansın geliştirilmesi, yaralanma riskinin yönetilmesi, rehabilitasyonun izlenmesi ve motor becerilerin nesnel biçimde değerlendirilmesi açısından temel bir gerekliliktir. (1). Geleneksel hareket analizi, yüksek hızlı kameralar, yansıtıcı işaretleyiciler, kuvvet platformları ve uzman operatörlerden oluşan laboratuvar altyapılarına dayanır. Bu sistemler ayrıntılı veri üretmekle birlikte kurulum maliyeti, ölçüm süresi, teknik uzmanlık ve kontrollü ortam gereksinimi nedeniyle geniş örneklemlere ve saha uygulamalarına her zaman kolayca taşınamaz. Yapay zekâ; görüntü, ataletsel sensör, kuvvet ve elektromiyografi gibi farklı kaynaklardan üretilen büyük hacimli veriyi otomatik olarak işleyerek bu uygulama sınırlılıklarını azaltmaktadır. Güncel spor biyomekaniği alan yazını, özellikle derin öğrenme, bilgisayarlı görü ve giyilebilir teknoloji entegrasyonunun performans analizi ile yaralanma riskinin değerlendirilmesinde hızla yaygınlaştığını göstermektedir (Souaifi vd., 2025).

Bu dönüşüm, hareket analizini yalnızca daha hızlı bir ölçüm süreci hâline getirmemekte, aynı zamanda değerlendirilebilen değişkenlerin kapsamını da genişletmektedir. Bir sıçramanın yüksekliği veya sprint süresi gibi sonuç değişkenlerinin

yanında eklem hareket özellikleri, segmentler arası koordinasyon, teknik tutarlılık, zaman içindeki değişkenlik ve yük dağılımı gibi çok boyutlu özellikler de modellenebilmektedir. Derin öğrenme tabanlı insan poz kestiriminin spordaki uygulamaları; hareket becerisi analizi, eylem tanıma, artırılmış antrenörlük araçları ve hakem desteği olmak üzere farklı uygulama alanlarına ayrılmaktadır. Bununla birlikte kapalı veri setleri, standart olmayan kayıt protokolleri ve yeniden üretilebilirlik sorunları, araştırma bulgularının doğrudan uygulamaya aktarılmasını sınırlamaktadır (Aulton vd., 2025).

Bu bölümde yapay zekâ destekli hareket analizi, tek bir yazılım ya da kamera sistemi olarak değil; ölçüm amacı, veri üretimi, sinyal işleme, biyomekanik modelleme, istatistiksel doğrulama ve karar desteğinden oluşan bütünleşik bir sistem olarak ele alınmaktadır. Temel yaklaşım, model tarafından üretilen sonucu doğrudan doğru kabul etmek yerine, bu sonucun hangi hareket görevi, popülasyon, kamera düzeni ve hata sınırları içinde geçerli olduğunu belirlemektir. Böylece yapay zekâ, uzman değerlendirmesinin yerine geçen açıklanamayan bir karar mekanizması değil; ölçüm kapasitesini artıran, tekrarlanabilirliği destekleyen ve uzman kararını yapılandıran bir araç olarak konumlandırılmaktadır.

2. KAVRAMSAL VE TEKNOLOJİK ÇERÇEVE

Hareket analizi, vücudun uzay ve zaman içindeki konum değişikliklerini tanımlayan kinematik ölçümler ile bu hareketi oluşturan veya harekete karşı koyan kuvvetleri inceleyen kinetik ölçümleri kapsar. Motor performans değerlendirmesi ise yalnızca hareketin mekanik betimlemesiyle sınırlı değildir; görevin başarı düzeyi, hareket kalitesi, hız-doğruluk dengesi, koordinasyon, uyarlanabilirlik, enerji verimliliği ve tekrarlar arası kararlılık gibi işlevsel boyutları da içerir. Bu nedenle yapay zekâ temelli bir sistemin değeri, kaç anatomik noktayı takip ettiğinden çok, takip edilen veriyi anlamlı bir performans göstergesine dönüştürme gücüyle belirlenir.

İnsan poz kestirimi, görüntü içindeki anatomik anahtar noktaların veya vücut segmentlerinin konumunu belirleme işlemidir. İki boyutlu sistemler her karede piksel koordinatları üretirken, üç boyutlu sistemler çoklu kamera geometrisi, derinlik bilgisi veya tek kameralı derin öğrenme modelleri aracılığıyla uzamsal koordinatları kestirir. Üstten aşağı yaklaşımlar önce kişiyi belirleyip sonra eklem noktalarını çıkarır; alttan yukarı yaklaşımlar ise görüntüdeki anahtar noktaları bulup bunları kişilere eşler. OpenPose, AlphaPose, MediaPipe, MoveNet, HRNet ve DeepLabCut gibi model ve yazılım çerçeveleri farklı hız, doğruluk, donanım gereksinimi ve özelleştirme olanakları sunar. Model seçimi, genel popülerlikten ziyade hareket hızı, kişi sayısı, örtüşme olasılığı, kamera açısı ve hedeflenen anatomik ayrıntı düzeyine göre yapılmalıdır (Roggio vd., 2024).

Ham anahtar noktalar doğrudan biyomekanik değişken değildir. Kamera izdüşümü, yumuşak doku hareketi, anatomik işaretlerin görünmemesi ve modelin eğitim verisinden kaynaklanan yanlılıklar nedeniyle eklem merkezi ile tahmin edilen görüntü noktası arasında sistematik fark oluşabilir. Bu nedenle eklem açıları hesaplanmadan önce koordinatların filtrelenmesi, anatomik kısıtlarla düzeltilmesi ve gerektiğinde seyrek anahtar noktalardan daha yoğun sanal işaretleyicilerin üretilmesi gerekir. Anahtar nokta artırımı kullanan modellerde hata büyüklüğünün hareket türü, anatomik işaret noktası, model yapısı ve rotasyon eksenine göre değiştiği; incelenen antropometrik değişkenlerin ise hata üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı gösterilmiştir. Dolayısıyla tek bir ortalama hata değeri tüm kullanım senaryoları için yeterli değildir (Ruescas-Nicolau vd., 2024).

Makine öğrenmesi ile derin öğrenme arasındaki ayrım da uygulama açısından önemlidir. Geleneksel makine öğrenmesinde araştırmacı; eklem açısı, hız, simetri indeksi veya frekans alanı değişkenleri gibi özellikleri önceden tanımlar. Derin öğrenme ise görüntü veya zaman serisinden ayırt edici özellikleri otomatik olarak öğrenebilir. İlk yaklaşım daha az veriyle çalışabilir ve yorumlanması görece kolaydır; ikinci yaklaşım

karmaşık, doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilir ancak daha büyük veri setleri ve daha sıkı doğrulama gerektirir. En uygun çözüm çoğu zaman, fiziksel olarak anlamlı ve araştırmacı tarafından tanımlanan özelliklerin, model tarafından veriden otomatik olarak belirlenen özelliklerle birleştirildiği hibrit modellerdir.

3. VERİ EDİNİM TEKNOLOJİLERİ

Yapay zekâ destekli hareket analizinde ölçüm kalitesi, algoritmadan önce veri edinim zincirinde belirlenir. Görsel sistemler standart RGB kameralar, yüksek hızlı kameralar, derinlik sensörleri ve kızılötesi kameralar üzerinden çalışabilir. RGB kameralar erişilebilir ve saha kullanımına uygundur; ancak derinlik bilgisini doğrudan üretmez, ışık değişimlerinden etkilenir ve görüntü düzlemine dik hareketlerde hata artabilir. Derinlik kameraları uzamsal bilgi sağlar fakat çalışma mesafesi, görüş alanı ve dış ortam ışığı bakımından sınırlanabilir. Ticari sensörler ile açık kaynak poz kestirimi çerçevelerini inceleyen güncel değerlendirmeler, iki boyutlu çözümlerin ekonomik ve pratik olduğunu; üç boyutlu analiz içinse kamera yerleşimi, kalibrasyon ve hareket düzleminin daha kritik hâle geldiğini vurgulamaktadır (Edriss vd., 2025).

İşaretleyici tabanlı optik hareket yakalama, kontrollü koşullarda yüksek uzamsal doğruluk sağladığı için referans yöntem olmayı sürdürmektedir. Bununla birlikte işaretleyici yerleştirme hataları, yumuşak doku artefaktı ve laboratuvar davranışının doğal hareketten farklılaşması bu yaklaşımın da hatasız olmadığını gösterir. İşaretleyicisiz sistemlerin üstünlüğü, referans sistemi tamamen ikame etmelerinden değil; ölçümü hızlandırmaları, büyük örneklem toplamayı kolaylaştırmaları ve doğal çevrede veri üretmelerinden kaynaklanır. Spor organizasyonlarında teknoloji seçimini ele alan çalışmalar, kararın yalnızca cihaz fiyatına göre değil; hedeflenen performans değişkeni, kayıt sıklığı, iş gücü, veri işleme süresi ve gerekli doğruluk düzeyi birlikte değerlendirilerek verilmesi gerektiğini belirtmektedir (Adlou vd., 2025).

Akıllı telefon tabanlı çoklu kamera sistemleri, işaretleyicisiz analizin saha uygulamalarında yaygınlaşmasında belirleyici olmuştur. Örneğin OpenCap, iki veya daha fazla telefondan senkron video alarak poz kestirimi, üç boyutlu kinematik, kas-iskelet modelleme ve dinamik simülasyonu tek bir analiz sürecinde birleştirmektedir. Sistem; eklem açıları, eklem momentleri, kas aktivasyonları ve eklem yükleri gibi değişkenleri bulut tabanlı olarak hesaplayarak özel laboratuvar donanımına olan bağımlılığı azaltmıştır. Bununla birlikte bu kolaylık, her hareket için aynı doğruluk anlamına gelmez; hızlı yön değiştirme, örtüşme ve kameradan uzaklaşma gibi durumlarda harekete özgü doğrulama gereklidir (Uhlrich vd., 2023).

Açık kaynaklı çoklu kamera analiz sistemleri araştırmacıya daha fazla kontrol sağlar. Pose2Sim, video kalibrasyonu, iki boyutlu anahtar nokta çıkarımı, çoklu görünüm üçgenleme ve kinematik hesaplama basamaklarını bir araya getirir. Bu tür sistemlerde doğruluk; kameraların birbirine göre açısı, kalibrasyon hacmi, kare hızı, enstantane süresi ve seçilen poz kestirimi modelinin hareket türüne uygunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Spor hareketleri üzerinde yapılan doğrulamalar, iyi yapılandırılmış çoklu kamera kurulumlarının saha koşullarında anlamlı üç boyutlu kinematik üretebildiğini; ancak analiz zincirinin her basamağının ayrı kalite kontrolünden geçirilmesi gerektiğini göstermektedir (Pagnon vd., 2022).

Tek kamera ile iki boyutlu analiz, özellikle baskın hareket düzleminin önceden bilindiği görevlerde etkili olabilir. Sports2D gibi araçlar standart video veya web kamerasından iki boyutlu poz ve segment açılarını hesaplayarak eğitim, öğretim ve ön tarama uygulamalarına kolay erişilebilir bir çözüm sunar. Burada kritik koşul, kameranın hareket düzlemine mümkün olduğunca dik yerleştirilmesi ve perspektif bozulmasının azaltılmasıdır. İki boyutlu veriden elde edilen açıların anatomik üç boyutlu açı olarak yorumlanmaması; sonuçların "görüntü düzlemi açısı" şeklinde raporlanması gerekir (Pagnon ve Kim, 2024).

Giyilebilir ataletsel ölçüm birimleri; ivmeölçer, jiroskop ve bazen manyetometre verilerini birleştirerek segment yönelimi, açısal hız ve zamansal aktivite özellikleri sağlar. Kuvvet platformları dış kuvvetleri, basınç tabanlıkları plantar yük dağılımını, yüzey elektromiyografisi ise kasların elektriksel aktivasyon zamanlamasını ölçer. Bu kaynaklar görüntüyle birleştirildiğinde, yalnızca vücudun uzamsal konumu değil, hareketin hangi mekanik ve nöromüsküler stratejiyle üretildiği de incelenebilir. Ancak sensör füzyonu, zaman eşleştirmesi ve ortak koordinat sistemi kurulmadığında veri miktarı artsa da ölçüm geçerliği artmayabilir.

Tablo 1. Hareket analizinde kullanılan başlıca veri edinim teknolojilerinin karşılaştırılması

Teknoloji	Üretilen temel ölçümler	**Uygun kullanım**	**Başlıca sınırlılık**
İşaretleyici tabanlı optik sistem	3B işaretleyici koordinatları ve eklem kinematiği	Laboratuvar temelli ayrıntılı kinematik analiz ve referans ölçüm	Yüksek maliyet, uzun kurulum ve yumuşak doku artefaktı
RGB video ve poz kestirimi	2B/3B anatomik anahtar noktalar ve segment açıları	Saha ölçümü, geniş örneklem ve doğal hareket analizi	Örtüşme, aydınlatma, kamera açısı ve veri dağılımı farklılığı
Derinlik kamerası	Derinlik haritası ve iskelet koordinatları	Tek cihazla sınırlı hacimde üç boyutlu ölçüm	Çalışma mesafesi, görüş alanı ve dış ortam ışığı
Ataletsel ölçüm birimi	İvme, açısal hız ve segment yönelimi	Uzun süreli ve saha temelli hareket izlemi	Sürüklenme, sensör yerleşimi ve manyetik etkilenme
Kuvvet/basınç sistemi	Yer tepki kuvveti, basınç ve yük dağılımı	Kinetik analiz, temas ve yüklenme değerlendirmesi	Sınırlı ölçüm alanı ve ek donanım gereksinimi
Yüzey elektromiyografisi	Kas aktivasyon genliği ve zamanlaması	Nöromüsküler aktivasyonun değerlendirilmesi	Elektrot yerleşimi, çapraz konuşma ve normalizasyon

Not: *Teknoloji seçimi, hedeflenen ölçüm değişkeni ve kabul edilebilir hata sınırına göre yapılmalıdır. Sınıflandırma, güncel derleme ve doğrulama çalışmaları temelinde düzenlenmiştir (Adlou vd., 2025; Edriss vd., 2025; Uhlrich vd., 2023).*

4. YAPAY ZEKÂ TABANLI ANALİZ SÜRECİ

Analiz süreci, araştırma sorusunun ölçülebilir bir hedefe dönüştürülmesiyle başlar. "Tekniği değerlendirmek" gibi genel bir ifade yerine diz fleksiyon açısı, gövde eğimi, temas süresi, sağ-sol asimetrisi veya tekrarlar arası değişkenlik gibi önceden tanımlanmış ölçüm değişkenleri belirlenmelidir. Bu tanım; kamera sayısını, kayıt hızını, sensör yerleşimini, örneklem büyüklüğünü ve kullanılacak doğrulama yöntemini belirler. Bir hareketin keşif amaçlı sınıflandırılması ile klinik karar eşiği oluşturulması farklı kanıt düzeyleri gerektirir. Klinik veya performans kararı verilecekse ölçüm hatasının, beklenen gerçek değişimden küçük olması gerekir.

Kayıt aşamasında kamera çözünürlüğü kadar hareket bulanıklığı, enstantane süresi ve görüş alanı önemlidir. Hızlı sprint, tekme veya olimpik kaldırışlarda yüksek çözünürlüklü fakat düşük kare hızlı görüntü, kritik olayların zamanlamasını kaçırabilir. Kameralar sabitlenmeli, optik eksenler kayıt hacmini kapsamalı, kalibrasyon nesnesi hareket hacminin tamamında görünmeli ve senkronizasyon doğrulanmalıdır. Giyilebilir sensörlerde cihaz eksenleri anatomik eksenlerle eşlenmeli; gevşek yerleşim ve sensör kayması kaydedilmelidir. Standartlaştırılmış kıyafet, sabit aydınlatma ve arka plan ayrımı, görüntü modelinin kararlılığını artırır.

Ön işleme; bozuk karelerin belirlenmesi, zaman eşleştirme, lens distorsiyonu düzeltme, koordinat filtreleme ve eksik noktaların işlenmesini kapsar. Filtreleme parametreleri hareketin frekans içeriğine göre seçilmeli; aşırı yumuşatma tepe hızları ve hızlı yön değişimlerini ortadan kaldırmamalıdır. Eksik noktaların uzun aralıklar boyunca basit interpolasyonla doldurulması, biyomekanik olarak var olmayan yörüngeler oluşturabilir. Kalite kontrol sırasında her deneme için anahtar

nokta güven skoru, yeniden izdüşüm hatası, anatomik segment uzunluğu değişimi ve gözle görünür takip kaybı birlikte değerlendirilmelidir.

Modelleme aşamasında veri setinin nasıl bölündüğü, algoritmanın mimarisinden daha belirleyici olabilir. Aynı kişiye ait tekrarların hem eğitim hem test grubunda bulunması, modelin kişiyi tanımasını kolaylaştırarak performansı yapay biçimde yükseltir. Bu nedenle bölme işlemi katılımcı düzeyinde yapılmalı; mümkünse farklı merkez, kamera ve popülasyondan dış test seti kullanılmalıdır. Sınıf dengesizliği, seyrek görülen hata türleri ve tekrarlı ölçümler dikkate alınmalıdır. Spor alanında gerçek zamanlı yapay zekâ yöntemlerini inceleyen çalışmalar, çevrim içi geri bildirim için doğruluğun yanında hesaplama gecikmesi, enerji tüketimi ve sensör bağlantı kararlılığının da temel performans ölçütleri olduğunu göstermektedir (Vec ve vd., 2024).

Hareketin değerlendirilmesi kural tabanlı, veri temelli veya karma bir yaklaşımla yapılabilir. Kural tabanlı sistemler, örneğin diz valgusunun belirli bir eşiği aşması gibi açık ölçütler üretir; açıklanabilir olmakla birlikte karmaşık koordinasyonu basitleştirebilir. Veri temelli modeller, çok sayıda zaman serisini birlikte öğrenerek uzman sınıflandırması, beceri düzeyi veya klinik durum kestirimi yapabilir; buna karşılık kararın nedenini açıklamak daha güçtür. Kullanıcıya sunulan geri bildirim görsel iskelet, renk kodu, sesli uyarı, kısa metin veya dokunsal uyarı biçiminde olabilir. Geri bildirimin etkili olması için yalnızca doğru olması değil, uygun zamanda verilmesi, önceliklendirilmesi ve hatalı uyarı oranının düşük tutulması gerekir (Tharatipyakul vd., 2024).

Son aşama, analiz sonuçlarının uzman kararına aktarılmasıdır. Sistem, tüm değişkenleri tek bir genel değerlendirme puanına indirgemek yerine temel bulguyu, güven aralığını, ölçüm kalitesini ve önceki ölçüme göre değişimi birlikte sunmalıdır. Örneğin tek bir diz açısı değerinin yanında analiz edilen tekrar sayısı, denemeler arası dağılım, güven skoru ve minimal saptanabilir değişim belirtilmelidir. Böylece uygulayıcı,

ölçümdeki değişimin gerçek adaptasyondan mı yoksa sistem hatasından mı kaynaklandığını değerlendirebilir.

5. MOTOR PERFORMANS GÖSTERGELERİNİN BELİRLENMESİ

Motor performans, sonuç ve süreç göstergelerinin birlikte değerlendirilmesiyle anlam kazanır. Sonuç göstergeleri; süre, mesafe, hız, sıçrama yüksekliği, isabet oranı ve kaldırılan yük gibi görev performansının nicel sonucunu tanımlar. Süreç göstergeleri ise bu sonucun hangi hareket ve yüklenme stratejileriyle üretildiğini gösterir. Eklem açıları, açısal hızlar, segmentler arası faz ilişkisi, temas ve uçuş süreleri, vücut kütle merkezinin yörüngesi, kuvvet geliştirme hızı ve kas aktivasyon sırası bu gruptadır. Aynı performans sonucu farklı motor stratejilerle elde edilebildiğinden, yalnız sonuç puanına dayalı değerlendirme teknik etkinliği ve yüklenme biçimini açıklamakta yetersiz kalabilir.

Zamansal-mekânsal değişkenler yürüme hızı, adım uzunluğu, kadans, destek süresi, sprint ara zamanları ve hareket evrelerinin sürelerini içerir. Kinematik göstergeler eklem hareket açıklığı, tepe açı, açı-zaman eğrisi, segment yönelimi ve kütle merkezi hareketini kapsar. Kinetik göstergeler yer tepki kuvveti, eklem momenti, eklem gücü, mekanik iş ve yüklenme hızıdır. Yapay zekâ, bu yüksek boyutlu veriden temel bileşenler, zaman-frekans özellikleri, faz değişkenleri veya model tarafından otomatik belirlenen özellikler oluşturarak daha az sayıda fakat daha ayırt edici değişken elde edilmesini sağlayabilir.

Koordinasyon, tek bir eklemin mutlak açısıyla değil, eklemler ve segmentler arasındaki göreli zamanlama ile değerlendirilmelidir. Vektör kodlama, sürekli göreli faz, çapraz korelasyon ve dinamik zaman bükme gibi yöntemler, iki sinyalin birlikte nasıl değiştiğini gösterir. Beceri düzeyi arttıkça değişkenlik her zaman azalmaz; uzman performansında görev sonucunu koruyan işlevsel değişkenlik görülebilir. Bu nedenle standart sapma veya varyasyon katsayısı, hedef sonuç ve

çevresel koşullarla ilişkilendirilmeden "kararsızlık" şeklinde yorumlanmamalıdır.

Asimetri göstergeleri rehabilitasyon ve spora dönüş değerlendirmelerinde yaygındır; ancak iki tarafın farkını tek yüzdeye dönüştürmek yön bilgisini ve mutlak performans düzeyini gizleyebilir. Yapay zekâ temelli sistemler, yalnız tepe değer farkı yerine hareket boyunca elde edilen zaman serisindeki bölgesel asimetriyi, tekrarlar arası tutarlılığı ve yüklenme stratejisini birlikte inceleyebilir. Bunun için taraf etiketlerinin doğru tanımlanması, baskınlık bilgisinin kaydedilmesi ve ölçüm hatasının asimetri değerinden küçük olması gerekir.

Yorgunluk ve sporcunun performansa hazır olma durumunun tahmini, tek bir hareket değişkeninden ziyade çoklu göstergelerin zaman içindeki sapmasına dayanmalıdır. Temas süresinde artış, tepe hızda azalma, gövde kompansasyonunda yükselme ve teknik değişkenlikte artış aynı modelde birleştirilebilir. Bununla birlikte bireyler arası normal değer farkı yüksek olduğundan, grup normlarıyla çalışan modelin yanında kişiye özgü başlangıç profili oluşturulması daha uygundur. Kişisel eşikler, ardışık ölçümlerdeki normal dalgalanma hesaplandıktan sonra belirlenmelidir.

Tablo 2. Yapay zekâ destekli motor performans değerlendirmesinde kullanılan temel boyutlar

Değerlendirme boyutu	**Temel göstergeler**	**Biyomekanik ve işlevsel yorum**
Sonuç performansı	Süre, hız, mesafe, yük ve isabet	Görev başarısı ve genel performans düzeyi
Zamansal-mekânsal	Temas/uçuş süresi, kadans ve adım uzunluğu	Hareketin zamanlaması, ritmi ve ilerleme özellikleri
Kinematik	Eklem açısı, açısal hız ve segment yörüngesi	Eklem ve segment hareketlerinin teknik özellikleri
Kinetik	Kuvvet, moment, güç ve yüklenme hızı	Mekanik talep, kuvvet üretimi ve yük dağılımı
Koordinasyon	Göreli faz, vektör kodlama ve eşzamanlılık	Segmentler arası zamanlama ve hareket organizasyonu

Değerlendirme boyutu	Temel göstergeler	Biyomekanik ve işlevsel yorum
Değişkenlik	Standart sapma, CV, entropi ve dalga benzerliği	Tekrarlar arası kararlılık ve uyarlanabilirlik
Asimetri	Taraf farkı, dalga asimetrisi ve yük oranı	Taraflar arası performans ve yüklenme farklılıkları
Yorgunluk ve hazır oluş	Temas süresi, hız kaybı, teknik sapma ve değişkenlik	Akut yüklenme yanıtı ve bireysel performans değişimi

Not: *Boyutlar birbirinin alternatifi değildir; kapsamlı bir değerlendirmede sonuç ve süreç göstergeleri birlikte yorumlanmalıdır.*

6. GEÇERLİK, GÜVENİRLİK VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

Bir sistemin doğruluk değeri, kullanılan referans yöntem, hareket görevi ve hata metriği belirtilmeden anlamlı değildir. Geçerlik, sistemin hedeflenen yapıyı ne ölçüde doğru ölçtüğünü; güvenirlik ise aynı koşullarda benzer sonuç üretme derecesini ifade eder. Kriter geçerliği için işaretleyici tabanlı hareket yakalama, kuvvet platformu veya uzman kodlaması referans alınabilir. Ancak karşılaştırılan sistemlerin koordinat tanımları, eklem modeli, filtreleri ve olay belirleme yöntemleri aynı değilse fark yalnız yapay zekâ hatasından kaynaklanmaz.

Yürüyüş analizinde işaretleyicisiz ve işaretleyici tabanlı sistemleri karşılaştıran sistematik inceleme ve meta-analizler, bazı zamansal-mekânsal ve sagital düzlem değişkenlerinde güçlü uyum elde edilebildiğini; frontal ve transvers düzlem kinematiğinde ise hata ve heterojenliğin arttığını göstermektedir. Bu bulgu, geçerliği sistem düzeyinde tek bir etiketle tanımlamak yerine değişken ve hareket düzlemi temelinde raporlamanın gerekliliğini ortaya koymaktadır (Scataglini vd., 2024).

Theia3D gibi ticari işaretleyicisiz sistemlere ilişkin çalışmaların sistematik değerlendirmesi, laboratuvar ve saha uygulamalarında umut verici sonuçlar bildirmekle birlikte protokoller arasında kamera sayısı, örnekleme hızı, işaretleyici seti ve analiz yazılımı bakımından önemli farklılıklar

bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle bir üreticinin genel doğruluk iddiası, kullanıcının kendi hareket görevinde pilot karşılaştırma yapma gereğini ortadan kaldırmaz. Özellikle yön değiştirme, hızlı rotasyon ve kısmi örtüşme içeren görevler, yürüyüş gibi ritmik görevlerden ayrı doğrulanmalıdır (Varcin ve Boocock, 2026).

Eşzamanlı işaretleyici tabanlı ve işaretleyicisiz yürüyüş ölçümleri, iki sistem arasında zaman serisi düzeyinde karşılaştırma yapılmasına olanak verir. Bu tür çalışmalar, bazı kinematik eğrilerin benzer biçimde izlenebildiğini; ancak sabit sapmaların, eklem koordinat sistemi farklarının ve hareket sınırlarındaki farklılıkların yalnız korelasyon katsayısıyla belirlenemeyebileceğini göstermiştir. Yüksek korelasyon, iki yöntemin aynı mutlak değeri ürettiği anlamına gelmez. Bu nedenle Bland-Altman analizi, kök ortalama kare hata, ortalama mutlak hata ve sürekli dalga biçimi karşılaştırmaları birlikte sunulmalıdır (Kanko vd., 2021).

Kinetik değişkenlerin görüntüden kestirilmesi, kinematik analize göre daha fazla varsayım içerir. Yer tepki kuvveti veya eklem momenti; vücut segment parametreleri, temas olayları ve dinamik denklemler üzerinden hesaplanır. İşaretleyicisiz hareket yakalamadan elde edilen segment hareketleri ile bütün-vücut dinamikleri kullanılarak farklı hareket görevlerinde yer tepki kuvvetlerinin yüksek doğrulukla kestirilebildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte kestirim sonuçları, kuvvet platformu verisiyle hareket görevi ve hız düzeyinde doğrulanmalı; yöntemin doğrulandığı koşulların dışındaki örneklerde belirsizlik açıkça raporlanmalıdır (Lichtwark vd., 2024).

Akıllı telefon tabanlı sistemlerin fonksiyonel görevlerdeki geçerliği, hareketin düzlemi ve hızına göre değişebilir. OpenCap üzerinde gerçekleştirilen alt ekstremite doğrulaması, bazı sagital düzlem kinematiklerinin uygulama için yeterli uyum gösterebildiğini; düzlem dışı değişkenlerin ise daha dikkatli yorumlanması gerektiğini bildirmiştir. Bu nedenle saha sistemi, hassas klinik açı ölçümünün genel ikamesi olarak değil,

belirli değişkenler için doğrulanmış bir ölçüm aracı olarak kullanılmalıdır (Svetek vd., 2025).

Güvenirlik değerlendirmesinde sınıf içi korelasyon katsayısı (ICC) tek başına yeterli değildir. ICC, örneklemdeki kişiler arası varyanstan etkilenir; birbirinden çok farklı katılımcılar yüksek ICC oluşturabilir. Standart ölçüm hatası (SEM), varyasyon katsayısı (CV) ve minimal saptanabilir değişim (MDC) mutlak ölçüm hatası hakkında bilgi verir. Ayrıca deneme içi, günler arası ve değerlendiriciler arası güvenirlik ayrı ayrı raporlanmalıdır. Model güncellendiğinde veya kamera yazılımı değiştiğinde ölçüm özellikleri yeniden test edilmelidir.

Makine öğrenmesi performansı için doğruluk, duyarlılık, özgüllük, F1 puanı ve ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) kullanılabilir; ancak klinik veya sportif karar eşikleri sınıf dengesine ve yanlış karar maliyetine göre seçilmelidir. Sürekli sonuçlarda MAE ve RMSE yanında kalibrasyon eğrisi ve hata dağılımı sunulmalıdır. Veri seti küçükse çapraz doğrulama katılımcı düzeyinde yapılmalı, hiperparametre seçimi iç içe çapraz doğrulamayla ayrılmalı ve nihai performans bağımsız test setinde raporlanmalıdır.

7. SPOR PERFORMANSINDA UYGULAMALAR

Sıçrama görevleri, yapay zekâ destekli hareket analizinin en yaygın spor uygulamalarındandır. Düşerek sıçrama ve dikey sıçrama; temas süresi, sıçrama yüksekliği, diz ve kalça açıları, gövde kontrolü, yer tepki kuvveti ve iniş asimetrisi gibi çok sayıda gösterge üretir. Büyük örneklemli düşerek dikey sıçrama değerlendirmelerinde işaretleyicisiz üç boyutlu sistemlerin kinematik ve kinetik değişkenleri otomatik olarak belirleyebildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte tepe değerlerin yanı sıra iniş evresinin tamamı incelenmeli; kamera görünümü, ayak teması ve hızlı fleksiyon anındaki takip kalitesi kontrol edilmelidir (Templin vd., 2024).

Karşı hareketli sıçramada otomatik analiz, test yükünü azaltarak sporcu gruplarının sık aralıklarla izlenmesini sağlar.

İşaretleyicisiz poz kestirimi ile üç boyutlu işaretleyici tabanlı sistem karşılaştırmalarında, belirli kinematik değişkenlerde kabul edilebilir uyum sağlanabilmekte; ancak küçük açı değişimlerini veya yüksek hızdaki eklem hareketlerini saptama duyarlılığı değişebilmektedir. Bu nedenle antrenman izleminde her ölçüm için aynı kamera düzeni ve standart hareket komutu korunmalı, kararlar tek tekrar yerine tekrar dağılımına dayandırılmalıdır (Aleksic vd., 2024).

Olimpik kaldırışlar, yüksek hız, bar-vücut örtüşmesi ve çok düzlemli hareket nedeniyle poz kestirimi açısından daha güç bir görevdir. Koparma hareketine yönelik video tabanlı derin öğrenme sistemlerinin doğrulaması, bazı bar ve vücut kinematiklerinin yararlı düzeyde kestirilebildiğini; ancak teknik evrelerin hassas zamanlaması ve küçük eklem farklılıkları için hata sınırlarının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Uygulamada sistem, antrenöre bar yolu, çekiş süreleri ve anahtar pozisyonlar hakkında hızlı geri bildirim sağlayabilir; nihai teknik karar antrenör gözlemiyle birleştirilmelidir (Thiele vd., 2024).

Sprint ve yön değiştirme analizinde başlangıç reaksiyonu, ivmelenme adımları, adım frekansı, destek süresi, gövde açısı ve frenleme-yeniden hızlanma stratejileri değerlendirilebilir. Yüksek hızlı hareketlerde kare hızı ve enstantane süresi, poz kestirimi modelinden bağımsız bir hata kaynağıdır. Çoklu kamera sistemi, sporcunun kayıt hacmi içinde kalmasını sağlayacak biçimde yerleştirilmelidir. Tek kamera kullanılıyorsa analiz, kamera düzlemindeki değişkenlerle sınırlandırılmalıdır. Sporcunun kameraya yaklaşması veya uzaklaşmasının belirgin olduğu görevlerde ise iki boyutlu analiz yerine kalibre edilmiş çoklu kamera, derinlik kamerası veya doğrulanmış üç boyutlu kestirim yöntemleri tercih edilmelidir.

Teknik sınıflandırma sistemleri, uzman puanını otomatikleştirebilir; fakat modelin yalnız "doğru/yanlış" etiketi üretmesi eğitim açısından sınırlıdır. Daha işlevsel yaklaşım, performansı evrelere ayırmak ve düzeltilebilir temel hataları önceliklendirmektir. Örneğin sıçrama inişinde ilk temas,

maksimum diz fleksiyonu ve stabilizasyon evresi ayrı incelenebilir. Model, yüksek güvenli birincil hatayı raporladıktan sonra ikincil ayrıntıları sunmalıdır. Böylece sporcu aynı anda çok sayıda uyarıyla karşılaşmaz.

Antrenman izleminde yapay zekâ analiz sonuçları akut performans, yüklenme yanıtı ve uzun dönem adaptasyon düzeylerinde kullanılabilir. Akut analiz tek oturumdaki teknik bozulmayı; yüklenme analizi tekrarlar boyunca yorgunluk gelişimini, boylamsal analiz ise haftalar içindeki kişisel değişimi gösterir. Aynı modelin bu üç amacı birlikte karşılayacağı varsayılmamalıdır. Boylamsal değerlendirme için yazılım sürümü, kamera düzeni ve işleme parametreleri sabitlenmeli; model güncellemesi ölçüm serisinde yöntem değişikliği olarak kaydedilmelidir.

8. KLİNİK, REHABİLİTASYON VE MOTOR GELİŞİM UYGULAMALARI

Üst ekstremite hareketleri, omuz ve dirsek açılarını belirlemede kamera görünümü, el-gövde örtüşmesi ve küçük segmentlerin takibi nedeniyle özel güçlükler içerir. İşaretleyicisiz sistemlerin üst ekstremite kinematiğine yönelik doğrulama çalışmaları, bazı temel hareketlerde kullanılabilir sonuçlar elde edildiğini; ancak rotasyonel bileşenler ve anatomik eksen tanımlarında daha yüksek belirsizlik bulunduğunu göstermektedir. Rehabilitasyon uygulamasında ölçüm, hareket açıklığı taraması ve belirgin kompansatuvar hareketlerin izlenmesi için yararlı olabilir; cerrahi karar veya küçük klinik değişim için referans sistemle doğrulanmış protokol gereklidir (Hansen vd., 2024).

MediaPipe gibi hafif modeller, dizüstü bilgisayar veya telefonda gerçek zamanlı çalışabildiği için ev egzersizlerinin izlenmesine uygundur. İki boyutlu üst ekstremite yörüngelerinde standart yöntemle benzerlik araştırmaları, genel hareket yolunun izlenebildiğini; ancak kamera açısı, derinlik hareketi ve anahtar nokta kararsızlığının hata üretebildiğini göstermektedir. Tele-rehabilitasyon sistemleri, hastaya kesin derece vermek

yerine hedef aralık, tekrar sayısı ve belirgin kompansasyon uyarısı sunacak şekilde tasarlanmalıdır (Wagh vd., 2024).

Motor becerilerin değerlendirilmesinde uzman gözlemine dayalı puanlama zaman alıcıdır ve değerlendiriciler arası farklılık gösterebilir. İp atlama gibi temel motor beceriler için geliştirilen yapay zekâ destekli puanlama yaklaşımları, hareket evrelerinin ve performans ölçütlerinin daha standart biçimde değerlendirilmesini sağlayabilir. Ancak puanlama modelinin yaş, deneyim ve beden yapısı bakımından farklı gruplarda doğrulanması gerekir. Modelin verdiği toplam puanın yanında hangi ölçütlerin karşılanmadığı da raporlanmalıdır (Makaruk vd., 2025).

Serebral palside yürüyüş değerlendirmesi, yüksek bireysel çeşitlilik ve atipik hareket özellikleri nedeniyle genel popülasyonda eğitilmiş modeller açısından eğitim veri dağılımı dışında kalan bir uygulama problemidir. Bilgisayarlı görüye dayalı metrik öğrenme ve güven kestirimi yaklaşımları, klinik sınıflandırmada yalnız tahmin üretmek yerine tahmin güvenini de sunmanın önemini göstermektedir. Güven düşük olduğunda sistem otomatik karar vermemeli, kaydı uzman incelemesine yönlendirmelidir. Bu yaklaşım, algoritmik hatayı gizlemek yerine güvenli kullanım sınırını görünür kılar (Zhao vd., 2024).

Bebek hareketlerinin sınıflandırılması, hızlı gelişimsel değişim, küçük anatomik boyutlar ve istemsiz hareket özellikleri nedeniyle ayrı bir modelleme alanıdır. Yapay zekâ tabanlı sınıflandırmaların zamanında doğmuş ve prematüre bebeklerde geçerlik ve güvenirliğini inceleyen çalışmalar, otomatik sistemlerin uzman değerlendirmesini destekleyebileceğini; ancak gelişim haftası, kayıt koşulu ve örneklem temsiliyetinin model performansını etkilediğini göstermektedir. Bebek verilerinde veli onamı, veri minimizasyonu ve uzun süreli saklama politikası özellikle açık biçimde tanımlanmalıdır (Lin vd., 2024).

Nörolojik bozukluklarda yürüyüş hızı, adım uzunluğu, simetri, pelvis ve alt ekstremite kinematiği tedavi yanıtını izlemek için önemlidir. Akıllı telefon tabanlı OpenCap

uygulamalarında sağlıklı bireylerle nörolojik hasta grupları arasında anlamlı zamansal-mekânsal ve kinematik farklılıkların belirlenebildiği gösterilmiştir. Buna rağmen patolojik yürüyüşte standart modellerin hata profili sağlıklı yürüyüşten farklı olabilir. Klinik kullanımda grup karşılaştırmasından önce bireysel ölçüm güvenirliği ve takipteki minimal değişim eşiği belirlenmelidir (Min vd., 2024).

Yaşlı bireylerde görüntü ve giyilebilir sensör verisinin birleştirilmesi, sarkopeni ve bilişsel gerileme gibi çok etkenli durumların taranmasında tek sensörden daha zengin bir temsil sağlar. Ayak ve bel sensörleri ile kamera temelli yürüyüş özelliklerini birleştiren modeller, hareket dinamiğinden klinik risk sınıfları üretilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte bu modeller tarama aracıdır; tanı koymaz. Yaş, yardımcı cihaz kullanımı, ilaçlar ve eşlik eden hastalıklar model performansını etkileyebileceği için sonuçlar klinik değerlendirme çerçevesinde yorumlanmalıdır (Aznar-Gimeno vd., 2024).

Düşme riski kestiriminde ortalama yürüyüş hızının yanında adımlar arası değişkenlik, çift destek süresi, dönüş davranışı ve zamansal bağımlılık önemlidir. Zaman serisi özellikleri ile makine öğrenmesini birleştiren yaklaşımlar, riskle ilişkili zamansal özelliklerin tek bir test skorundan daha ayrıntılı ele alınmasına olanak verir. Ancak düşük riskli ve yüksek riskli sınıfların dağılımı, veri sızıntısı ve geçmiş düşme bilgisinin doğruluğu model sonucunu etkileyebilir. Bu nedenle duyarlılık ile özgüllük birlikte raporlanmalı ve karar eşiği kullanım amacına göre seçilmelidir (Lim vd., 2024).

Fiziksel rehabilitasyonda derin öğrenme uygulamalarını inceleyen güncel sistematik değerlendirme; poz kestirimi, aktivite tanıma, egzersiz kalitesi ve kişiselleştirilmiş geri bildirim alanlarında hızlı bir genişleme bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte çalışmaların önemli bölümü küçük örneklem, tek merkez ve kısa süreli doğrulamayla sınırlıdır. Gelecekte teknik doğrulamanın yanında klinik etkililik, kullanıcı uyumu, istenmeyen olaylar ve maliyet-etkililik de değerlendirilmelidir (El Bouni ve Oughdir, 2026).

9. ERGONOMİ, GERÇEK ZAMANLI GERİ BİLDİRİM VE KARAR DESTEĞİ

Ergonomik risk değerlendirmesi; gövde eğimi, omuz yüksekliği, diz fleksiyonu, yükün vücuda uzaklığı ve tekrar süresi gibi göstergeleri kullanır. Geleneksel gözlem formları hızlı olsa da değerlendiriciye bağlıdır ve uzun vardiyalardaki değişimi sürekli kaydedemez. İşaretleyicisiz üç boyutlu sistemler, iş görevini kesintiye uğratmadan uzun süreli ölçüm yapabilir. Endüstriyel ergonomide işaretleyicisiz ve işaretleyici tabanlı sistemleri karşılaştıran sistematik inceleme, teknolojinin potansiyelini desteklemekle birlikte özellikle örtüşme, yük taşıma, kişisel koruyucu ekipman ve laboratuvar dışı ışık koşullarında daha fazla doğrulama gerektiğini ortaya koymaktadır (Scataglini vd., 2025).

Gerçek zamanlı geri bildirimde temel tasarım sorusu, sistemin ne kadar hızlı hesap yaptığı değil, gecikmenin motor öğrenme amacına uygun olup olmadığıdır. Eşzamanlı geri bildirim hareket sırasında verilir ve acil güvenlik uyarıları için uygundur; ancak sürekli kullanıldığında dış geri bildirime bağımlılık oluşturabilir. Sonuç bilgisi veya performans bilgisi hareketten sonra verilerek öz değerlendirmeye zaman tanır. Geri bildirim sıklığı, beceri düzeyi arttıkça azaltılabilir. Sistem, yalnızca en yüksek öncelikli ve güveni yüksek hatayı bildirmeli; düşük güvenli durumlarda uyarı üretmemelidir.

Karar destek ekranı, uzmanların veri yükünü azaltmalıdır. Etkili bir arayüz; ham video, temel olaylar, seçilmiş performans göstergeleri, normal aralık, kişisel önceki değer, değişimin güven aralığı ve veri kalitesi işaretini aynı ekranda sunar. Renk kodları tek başına kullanılmamalı; sayısal ve metinsel açıklama eklenmelidir. Tek bir açıklanamayan risk puanı yerine, puanı oluşturan temel özelliklerin ve modelin hangi popülasyonda doğrulandığının gösterilmesi karar kalitesini artırır.

Uzman denetimli sistemlerde algoritma öneri üretir; uzman öneriyi kabul eder, düzeltir veya reddeder. Bu etkileşim kaydedildiğinde model hatalarının türü ve sıklığı izlenebilir. Ancak uzman düzeltmelerinin yeni eğitim verisi olarak

kullanılabilmesi için tutarlı bir etiketleme protokolü gerekir. Farklı uzmanların anlaşamadığı örnekler, model için belirsiz sınıf olarak tutulmalı; zorunlu biçimde tek etikete dönüştürülmemelidir.

10. ETİK, VERİ YÖNETİŞİMİ VE HUKUKİ SORUMLULUK

Hareket videosu sıradan bir görüntü değildir. Yüz, beden biçimi, sağlık durumu, performans düzeyi ve zaman içinde kimliklendirmeye elverişli biyometrik hareket özellikleri içerebilir. Bu nedenle veri toplama öncesinde amaç, saklama süresi, erişim yetkisi, üçüncü taraf aktarımı ve model eğitimi için yeniden kullanım koşulları açıkça tanımlanmalıdır. Onam formu, yalnız kayıt iznini değil, otomatik analiz ve olası ikincil kullanım seçeneklerini de içermelidir. Çocuklar, hastalar ve profesyonel sporcular gibi güç dengesinin bulunduğu gruplarda onamın gönüllülüğü ayrıca güvence altına alınmalıdır.

Veri minimizasyonu ilkesi, hedef değişken için gereksiz görüntü ve kişisel bilginin toplanmamasını gerektirir. Yüz görüntüsü analiz için gerekli değilse maskeleme veya kadraj dışı bırakma uygulanabilir. Ham video ile türetilmiş iskelet verisinin risk düzeyi aynı değildir; ancak iskelet verilerindeki kişiye özgü hareket özellikleri de yeniden kimliklendirme potansiyeli taşıyabilir. Aktarım ve depolamada şifreleme, rol tabanlı erişim, işlem kaydı ve silme doğrulaması uygulanmalıdır. Bulut hizmetinde verinin hangi ülkede işlendiği ve sağlayıcının modeli geliştirmek için veriyi kullanıp kullanmadığı sözleşmede belirtilmelidir.

Algoritmik yanlılık, eğitim veri setinde yeterince temsil edilmeyen cinsiyet, yaş, beden yapısı, ten rengi, engellilik durumu, kıyafet ve hareket stilinde performans düşüşü olarak ortaya çıkabilir. Ortalama doğruluk yüksek olsa bile alt gruplardan birinde sistematik hata bulunabilir. Bu nedenle sonuçlar demografik ve hareket görevi temelli alt gruplara göre raporlanmalı; eşit performans sağlanamıyorsa kullanım sınırı

açıkça belirtilmelidir. Hata maliyeti yüksek kararlar için uzman denetimi zorunlu tutulmalıdır.

Türkiye'de 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu kapsamında hareket videoları ve bunlardan türetilen veriler, kimliği belirli veya belirlenebilir bir kişiyle ilişkilendirilebildiğinde kişisel veri niteliği taşır. Kişinin özgün biçimde tanımlanması veya kimliğinin doğrulanması amacıyla belirli teknik işlemlerden geçirilen davranışsal hareket özellikleri biyometrik veri; kişinin sağlık durumuna ilişkin bilgi ortaya koyan hareket verileri ise sağlık verisi olarak özel nitelikli kişisel veri kapsamına girebilir. Bu verilerin işlenmesinde Kanun'da öngörülen işleme şartları ile verilerin amaçla bağlantılı, sınırlı ve ölçülü olması; saklama süresi, veri güvenliği, yurt dışına aktarım ve silme, yok etme veya anonim hâle getirme yükümlülükleri dikkate alınmalıdır (Türkiye Cumhuriyeti, 2016).

Avrupa Birliği Yapay Zekâ Yasası, yapay zekâ sistemlerini risk temelli bir çerçevede ele almakta; şeffaflık, veri yönetişimi, teknik dokümantasyon, uzman gözetimi ve yaşam döngüsü boyunca risk yönetimi yükümlülüklerini vurgulamaktadır. Hareket analizi sistemi sağlık, istihdam, eğitim veya biyometrik değerlendirme amacıyla kullanıldığında hukuki sınıflandırma ve yükümlülükler kullanım amacına göre değişebilir. Bu nedenle araştırma protokolündeki deneysel kullanım ile gerçek dünyadaki karar desteği birbirinden ayrılmalı; sistemin amaç dışı kullanımına karşı teknik ve yönetsel önlemler geliştirilmelidir (Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Birliği Konseyi, 2024).

Bilimsel şeffaflık da etik sorumluluğun parçasıdır. Model sürümü, kod ve parametreler, veri dışlama ölçütleri, başarısız takip oranı ve ön işleme adımları raporlanmalıdır. Yalnız başarılı denemeleri analiz etmek, sistemin gerçek saha performansını olduğundan iyi gösterebilir. Araştırmacılar, kaç kaydın işlenemediğini ve bu başarısızlığın hangi katılımcı veya hareket özelliklerinde yoğunlaştığını bildirmelidir.

11. UYGULAMA İÇİN ÖNERİLEN PROTOKOL

Yapay zekâ destekli hareket analizinin güvenli ve bilimsel biçimde uygulanması için ilk adım kullanım amacı ve koşullarını sınırlandırmaktır. Hedef; araştırma, performans izleme, tarama, rehabilitasyon geri bildirimi veya klinik karar desteği olarak açıkça tanımlanmalıdır. Birincil ölçüm değişkeni ve karar eşiği önceden belirlenmeli, ölçümün hangi hata düzeyini tolere edebileceği hesaplanmalıdır. Örneğin yalnız grup düzeyinde ortalama karşılaştırması yapılacak bir araştırma ile tek sporcunun spora dönüş kararında kullanılacak sistem aynı doğrulama standardına tabi değildir.

İkinci adım, teknoloji ve kayıt protokolünün hedefe göre seçilmesidir. Hızlı ve çok düzlemli hareketler için çoklu yüksek hızlı kamera; uzun süreli saha izlemi için giyilebilir sensör; kinetik kararlar için kuvvet veya basınç referansı gerekebilir. Kamera yüksekliği, uzaklığı, odak ayarı, kare hızı, aydınlatma, kalibrasyon hacmi ve kıyafet standardı yazılı protokole dönüştürülmelidir. Her oturumda kısa bir kalite kontrol hareketi kaydedilerek sistemin önceki oturumlarla tutarlı çalıştığı doğrulanmalıdır.

Üçüncü adım, pilot geçerlik ve güvenirlik çalışmasıdır. Hedef popülasyondan yeterli sayıda katılımcı, gerçek kullanımda uygulanacak görevleri gerçekleştirmelidir. Yeni sistem ve referans yöntem eşzamanlı kaydedilmeli; olay tanımları ve koordinat sistemleri uyumlaştırılmalıdır. Ortalama hata yanında bireysel hata dağılımı, uç değerler ve başarısız kayıt oranı raporlanmalıdır. Test-tekrar test tasarımında kamera ve sensör kurulumu yeniden yapılarak gerçek kurulum değişkenliği ölçülmelidir.

Dördüncü adım, model geliştirme ve bağımsız doğrulamadır. Veri bölme katılımcı düzeyinde yapılmalı, model seçimi eğitim verisi içinde tamamlanmalı ve test setine yalnız son değerlendirmede erişilmelidir. Çok merkezli kullanım planlanıyorsa en az bir merkez tamamen dış test seti olarak ayrılmalıdır. Modelin yalnız genel ortalaması değil; yaş, beden yapısı, performans seviyesi ve hareket varyantlarına göre modelin

farklı katılımcı gruplarındaki doğruluğu incelenmelidir. Yüksek belirsizlik taşıyan örneklerde otomatik kararı durduran, kaydı işaretleyen ve uzman incelemesine yönlendiren bir güven eşiği mekanizması tasarlanmalıdır.

Beşinci adım, sistemin uzman uygulama sürecine entegrasyonudur. Rapor, karar için gerekli en az sayıda göstergeyi içermeli; ham veri, işlenmiş veriler ve kalite ölçütü izlenebilir biçimde ilişkilendirilmelidir. Uzmanların model önerisini kabul veya reddetme nedenleri kaydedilmeli; otomatik analiz sonucu hiçbir aşamada ölçüm kalitesi düşükken kesin bir yargı üretmemelidir. Kullanıcılara sistemin amaçlanan kullanımı, hata sınırları ve uygulanmaması gereken durumlar hakkında eğitim verilmelidir.

Altıncı adım, kullanım sonrası performans izlemidir. Kamera, işletim sistemi veya model güncellemesi sonrasında güncelleme sonrası performans doğrulama testi yapılmalı; aylık veya dönemsel olarak başarısız analiz oranı, alt grup hataları ve uzmanın analiz sonucuna katılmadığı durumlar incelenmelidir. Veri dağılımı eğitim döneminden uzaklaşıyorsa model yeniden doğrulanmadan otomatik karar üretmemelidir. Böylece yapay zekâ sistemi tek seferlik bir ürün değil, ölçüm özellikleri yaşam döngüsü boyunca denetlenen bir araç olarak yönetilir.

12. SINIRLILIKLAR VE GELECEK YÖNELİMLER

Mevcut sistemlerin başlıca sınırlılığı, kontrollü veri setlerinde yüksek performans gösterirken gerçek saha koşullarında eğitim ve uygulama verileri arasındaki dağılım farklılığından etkilenmesidir. Kamera açısı, zemin, kıyafet, ışık, hareket hızı ve spor dalına özgü teknikler eğitim verisinden farklılaştığında anahtar nokta hatası artabilir. Örtüşme ve görüntü dışına çıkma, özellikle takım sporları ve temaslı branşlarda çoklu kişi takibini güçleştirir. Aynı zamanda üç boyutlu hareketin tek kameradan kestirilmesi derinlik belirsizliği taşır. Bu sorunlar yalnız daha büyük modellerle değil, gerçek kullanım koşullarını temsil eden veri setleri ve fiziksel kısıtlarla ele alınmalıdır.

Gelecekte fizik bilgili makine öğrenmesi, öğrenilen poz bilgisini kas-iskelet geometrisi, eklem sınırları ve dinamik denklemlerle birleştirecektir. Böylece görüntüde kısa süreli kaybolan noktalar anatomik olarak olası yörüngelerle tamamlanabilir ve kuvvet ve eklem momenti tahminleri fiziksel tutarlılık denetiminden geçirilebilir. Çok modlu temel modeller; video, IMU, kuvvet, EMG ve metinsel antrenör notlarını ortak bir veri yapısında birleştirebilir. Ancak model büyüklüğünün artması, veri yönetişimi ve açıklanabilirlik gereksinimini azaltmaz.

Bireye özgü hareket profilleri, grup ortalamalarının ötesinde bireysel adaptasyonu izleme potansiyeline sahiptir. Model, sporcunun veya hastanın kendi normal değişkenliğini öğrenerek beklenmeyen sapmaları belirleyebilir. Böyle bir yaklaşım için uzun dönemli ve aynı protokolle toplanmış veri gerekir. Normatif veriler ile kişisel başlangıç referans düzeyi birlikte kullanılmalı; kısa süreli yorgunluk, büyüme, ağrı ve ekipman değişimi gibi bireysel ve çevresel etkenler modele dâhil edilmelidir.

Yerel işlem kapasitesine sahip cihazlarda çalışan modeller, ham videoyu buluta göndermeden analiz yaparak gecikmeyi ve mahremiyet riskini azaltabilir. Federatif öğrenme, farklı kurumların ham veriyi paylaşmadan ortak model geliştirmesine olanak tanıyabilir. Bununla birlikte kurumlar arası sensör, etiket ve popülasyon farklılıkları model birleştirmeyi zorlaştırır. Gelecek çalışmalar, yalnız algoritmik doğruluğu değil enerji tüketimi, bağlantı kesintisi, kullanıcı deneyimi ve bakım maliyetini de raporlamalıdır.

Alan için en kritik gereksinimlerden biri açık ve spor dalına özgü karşılaştırma veri setleridir. Veri setlerinde hızlı hareket, yön değişimi, ekipman, farklı beden yapıları, çeşitli kamera düzenleri ve başarısız takip örnekleri bulunmalıdır. Ortak ölçütler, ortak olay tanımları ve önceden kaydedilmiş analiz planları modellerin adil karşılaştırılmasını sağlar. Sonuç olarak gelecekteki ilerleme, yalnız yeni ağ mimarilerinden

değil; daha iyi veri, daha açık raporlama ve gerçek kullanım koşullarında çok merkezli doğrulamadan gelecektir.

13. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapay zekâ destekli hareket analizi, insan hareketini geniş örneklemlerde, doğal ortamlarda ve daha kısa işlem süresiyle inceleme olanağı sağlamaktadır. Bilgisayarlı görü ve giyilebilir sensörler sayesinde iki ve üç boyutlu kinematik, kuvvet, eklem momenti ve yüklerin tahmini, teknik kalite, koordinasyon, asimetri ve değişkenlik aynı değerlendirme çerçevesinde ele alınabilir. Bu kapasite spor performansı, rehabilitasyon, motor gelişim, yaşlılık ve ergonomi uygulamalarında nesnel karar desteğini güçlendirebilir.

Bununla birlikte erişilebilirlik, doğrulukla eş anlamlı değildir. Her sistem; hedef hareket görevi, popülasyon, kamera veya sensör düzeni ve karar eşiği için ayrı biçimde doğrulanmalıdır. Özellikle düzlem dışı hareketler, yüksek hız, örtüşme, atipik hareket özellikleri ve kuvvet ve eklem momenti tahminleride belirsizlik açıkça raporlanmalıdır. Korelasyon tek başına yöntemlerin birbirinin yerine kullanılabileceğini göstermediği için mutlak hata, güvenirlik, minimal saptanabilir değişim ve başarısız analiz oranı birlikte değerlendirilmelidir.

Profesyonel uygulamanın temel ilkesi, yapay zekâyı uzman kararının yerine değil, ölçüm ve yorumlama kapasitesini artıran uzman denetimli bir sistem olarak kullanmaktır. Standart kayıt protokolü, katılımcı düzeyinde bağımsız doğrulama, alt grup performans analizi, veri güvenliği, açıklanabilir sonuç raporlaması ve yaşam döngüsü boyunca performans izleme sağlandığında bu teknolojiler güvenilir bir değerlendirme altyapısına dönüşebilir. Gelecek çalışmaların teknik yenilik kadar klinik ve sportif etkililik, kullanıcı davranışı, eşitlik ve maliyet-etkililik sonuçlarına odaklanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Adlou, B., Wilburn, C., & Weimar, W. (2025). Motion capture technologies for athletic performance enhancement and injury risk assessment: A review for multi-sport organizations. *Sensors, 25*(14), 4384. https://doi.org/10.3390/s25144384

Aleksic, J., Kanevsky, D., Mesaroš, D., Knezevic, O. M., Cabarkapa, D., Bozovic, B., & Mirkov, D. M. (2024). Validation of automated countermovement vertical jump analysis: Markerless pose estimation vs. 3D marker-based motion capture system. *Sensors, 24*(20), 6624. https://doi.org/10.3390/s24206624

Aulton, C., Wakili, L., Strafford, B. W., Davids, K., & Chiu, C.-Y. (2025). The application of deep learning human pose estimation in sport: A systematic review. *Sports Medicine - Open, 11*(1), 155. https://doi.org/10.1186/s40798-025-00953-3

Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Birliği Konseyi. (2024). Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). *Official Journal of the European Union, L 2024/1689*. https://data.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj

Aznar-Gimeno, R., Perez-Lasierra, J. L., Pérez-Lázaro, P., Bosque-López, I., Azpíroz-Puente, M., Salvo-Ibáñez, P., Morita-Hernandez, M., Hernández-Ruiz, A. C., Gómez-Bernal, A., Rodrigalvarez-Chamarro, M. de la V., Alfaro-Santafé, J.-V., del Hoyo-Alonso, R., & Alfaro-Santafé, J. (2024). Gait-based AI models for detecting sarcopenia and cognitive decline using sensor fusion. *Diagnostics, 14*(24), 2886. https://doi.org/10.3390/diagnostics14242886

Edriss, S., Romagnoli, C., Caprioli, L., Bonaiuto, V., Padua, E., & Annino, G. (2025). Commercial vision sensors and AI-based pose estimation frameworks for markerless motion analysis in sports and exercises: A mini review. *Frontiers in Physiology, 16*, 1649330. https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1649330

El Bouni, F.-Z., & Oughdir, L. (2026). Systematic review of deep learning applications in physical rehabilitation for human movement analysis in compliance with PRISMA standards. *Discover Artificial Intelligence, 6,* 666. https://doi.org/10.1007/s44163-026-01142-1

Hansen, R. M., Arena, S. L., & Queen, R. M. (2024). Validation of upper extremity kinematics using markerless motion captu-

re. *Biomedical Engineering Advances, 7*, 100128. https://doi.org/10.1016/j.bea.2024.100128

Kanko, R. M., Laende, E. K., Davis, E. M., Selbie, W. S., & Deluzio, K. J. (2021). Concurrent assessment of gait kinematics using marker-based and markerless motion capture. *Journal of Biomechanics, 127*, 110665. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110665

Lichtwark, G. A., Schuster, R. W., Kelly, L. A., Trost, S. G., & Bialkowski, A. (2024). Markerless motion capture provides accurate predictions of ground reaction forces across a range of movement tasks. *Journal of Biomechanics, 166*, 112051. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112051

Lim, Z. K., Connie, T., Goh, M. K. O., & Saedon, N. I. B. (2024). Fall risk prediction using temporal gait features and machine learning approaches. *Frontiers in Artificial Intelligence, 7*, 1425713. https://doi.org/10.3389/frai.2024.1425713

Lin, S.-C., Chandra, E., Tsao, P.-N., Liao, W.-C., Chen, W.-J., Yen, T.-A., Hsu, J. Y.-J., & Jeng, S.-F. (2024). Application of artificial intelligence in infant movement classification: A reliability and validity study in infants who were full-term and preterm. *Physical Therapy, 104*(2), pzad176. https://doi.org/10.1093/ptj/pzad176

Makaruk, H., Porter, J. M., Webster, E. K., Makaruk, B., Tomaszewski, P., Nogal, M., Gawłowski, D., Sobański, Ł., Molik, B., & Sadowski, J. (2025). Artificial intelligence-enhanced assessment of fundamental motor skills: Validity and reliability of the FUS test for jumping rope performance. *Frontiers in Artificial Intelligence, 8*, 1611534. https://doi.org/10.3389/frai.2025.1611534

Min, Y.-S., Jung, T.-D., Lee, Y.-S., Kwon, Y., Kim, H. J., Kim, H. C., Lee, J. C., & Park, E. (2024). Biomechanical gait analysis using a smartphone-based motion capture system (OpenCap) in patients with neurological disorders. *Bioengineering, 11*(9), 911. https://doi.org/10.3390/bioengineering11090911

Pagnon, D., Domalain, M., & Reveret, L. (2022). Pose2Sim: An end-to-end workflow for 3D markerless sports kinematics—Part 2: Accuracy. *Sensors, 22*(7), 2712. https://doi.org/10.3390/s22072712

Pagnon, D., & Kim, H. (2024). Sports2D: Compute 2D human pose and angles from a video or a webcam. *Journal of Open Source Software, 9*(101), 6849. https://doi.org/10.21105/joss.06849

Roggio, F., Trovato, B., Sortino, M., & Musumeci, G. (2024). A comprehensive analysis of the machine learning pose estimation models used in human movement and posture analyses: A narrative review. *Heliyon, 10*(21), e39977. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39977

Ruescas-Nicolau, A. V., Medina-Ripoll, E., de Rosario, H., Sanchiz Navarro, J., Parrilla, E., & Juan Lizandra, M. C. (2024). A deep learning model for markerless pose estimation based on keypoint augmentation: What factors influence errors in biomechanical applications? *Sensors, 24*(6), 1923. https://doi.org/10.3390/s24061923

Scataglini, S., Abts, E., Van Bocxlaer, C., Vandenbussche, M., Meletani, S., & Truijen, S. (2024). Accuracy, validity, and reliability of markerless camera-based 3D motion capture systems versus marker-based 3D motion capture systems in gait analysis: A systematic review and meta-analysis. *Sensors, 24*(11), 3686. https://doi.org/10.3390/s24113686

Scataglini, S., Fontinovo, E., Khafaga, N., Khan, M. U., Khan, M. F., & Truijen, S. (2025). A systematic review of the accuracy, validity, and reliability of markerless versus marker camera-based 3D motion capture for industrial ergonomic risk analysis. *Sensors, 25*(17), 5513. https://doi.org/10.3390/s25175513

Souaifi, M., Dhahbi, W., Jebabli, N., Ceylan, H. İ., Boujabli, M., Muntean, R. I., & Dergaa, I. (2025). Artificial intelligence in sports biomechanics: A scoping review on wearable technology, motion analysis, and injury prevention. *Bioengineering, 12*(8), 887. https://doi.org/10.3390/bioengineering12080887

Svetek, A., Morgan, K., Burland, J., & Glaviano, N. R. (2025). Validation of OpenCap on lower extremity kinematics during functional tasks. *Journal of Biomechanics, 183*, 112602. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112602

Templin, T., Riehm, C. D., Eliason, T., Hulburt, T. C., Kwak, S. T., Medjaouri, O., Chambers, D., Anand, M., Saylor, K., Myer, G. D., & Nicolella, D. P. (2024). Evaluation of drop vertical jump kinematics and kinetics using 3D markerless motion capture in

a large cohort. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12*, 1426677. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1426677

Tharatipyakul, A., Srikaewsiew, T., & Pongnumkul, S. (2024). Deep learning-based human body pose estimation in providing feedback for physical movement: A review. *Heliyon, 10*(17), e36589. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36589

Thiele, F., Paternoster, F., Hummel, C., Stöcker, F., & Holzer, D. (2024). Assessment of the accuracy of a deep learning algorithm- and video-based motion capture system in estimating snatch kinematics. *International Journal of Exercise Science, 17*(1), 1629–1647. https://doi.org/10.70252/PRVV4165

Türkiye Cumhuriyeti. (2016). 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu. *Resmî Gazete,* (29677, 7 Nisan 2016).

Uhlrich, S. D., Falisse, A., Kidziński, Ł., Muccini, J., Ko, M., Chaudhari, A. S., Hicks, J. L., & Delp, S. L. (2023). OpenCap: Human movement dynamics from smartphone videos. *PLOS Computational Biology, 19*(10), e1011462. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011462

Varcin, F., & Boocock, M. G. (2026). The accuracy, validity and reliability of Theia3D markerless motion capture for studying the biomechanics of human movement: A systematic review. *Artificial Intelligence in Medicine, 173,* 103332. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2025.103332

Vec, V., Tomažič, S., Kos, A., & Umek, A. (2024). Trends in real-time artificial intelligence methods in sports: A systematic review. *Journal of Big Data, 11*, 148. https://doi.org/10.1186/s40537-024-01026-0

Wagh, V., Scott, M. W., & Kraeutner, S. N. (2024). Quantifying similarities between MediaPipe and a known standard to address issues in tracking 2D upper limb trajectories: Proof of concept study. *JMIR Formative Research, 8*, e56682. https://doi.org/10.2196/56682

Zhao, P., Alencastre-Miranda, M., Shen, Z., O'Neill, C., Whiteman, D., Gervas-Arruga, J., & Krebs, H. I. (2024). Computer vision for gait assessment in cerebral palsy: Metric learning and confidence estimation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 32*, 2336–2345. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3416159

6. BÖLÜM

İnsan mı Algoritma mı? Sporda Yapay Zekâ Destekli Karar Sistemleri

Kadir PEPE[1], Yunus ŞAHİNLER[2], Alperen PEPE[3]

1 Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Spor Bilimler Fakültesi, kpepe@mehmetakif.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3207-6726
2 İstanbul Gelişim Üniversitesi, Spor Bilimler Fakültesi, ysahinler@gelisim.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5268-020X
3 Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, avalperenpepe@gmail.com, ORCID: 0009-0005-2982-6548

1. Giriş

Sporun giderek dijitalleşmesi, karar verme süreçlerinde veri kullanımını daha görünür ve işlevsel hâle getirmiştir. Performans analizi, antrenman optimizasyonu, sakatlanmaların önlenmesi, yetenek tespiti ve spor yönetimi gibi farklı alanlarda veri odaklı karar destek sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu süreçte yapay zekâ destekli analitik uygulamalar, giyilebilir teknolojiler, bilgisayarlı görü sistemleri ve dijital ikizler; antrenörlere, sporculara ve yöneticilere gerçek zamanlı izleme, tahmine dayalı değerlendirmeler ve karar süreçlerini destekleyen öneriler sunan teknolojiler arasında öne çıkmaktadır. Bu gelişmeler, profesyonel liglerden federasyonlara ve genç sporcu gelişim sistemlerine kadar farklı düzeylerde, yalnızca sezgiye dayalı uygulamalardan kanıta ve veriye dayalı karar verme anlayışına doğru bir dönüşüme işaret etmektedir (Roumeliotis vd., 2025; Alkasasbeh vd., 2026; Wu vd., 2026; Maiden vd., 2023; Liang vd., 2026; Naughton vd., 2024; Palermi vd., 2026).

Modern karar destek sistemlerinin temelinde farklı kaynaklardan elde edilen çok modlu veriler bulunmaktadır. Giyilebilir sensörlerden elde edilen biyomekanik ve fizyolojik ölçümler, video görüntüleri, GPS ve takip verileri ile bağlamsal

bilgilerin bir arada değerlendirilmesi, sporcu durumu ve takım dinamiklerinin daha bütüncül biçimde ele alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu veri bütünleşmesi; sakatlanma riski, yorgunluk ve performans gelişimi gibi alanlarda tahmin yapılmasını mümkün kılarken, antrenman düzenlemeleri, oyuncu değişikliği zamanlaması ve taktiksel tercihlerin desteklenmesine yönelik çıktılar da üretebilmektedir (Roumeliotis vd., 2025; Wu vd., 2026; Suliman, 2026; Bin & Xu, 2021; Liang vd., 2026; Fathalla vd., 2023; Amawi vd., 2026).

Yapay zekâ destekli analizlerin spordaki kullanım alanları özellikle tahmine dayalı karar süreçlerinde belirginleşmektedir. Makine öğrenmesi yöntemleri; sakatlanma riski, yorgunluk, antrenman yükü yönetimi, taktiksel tahmin ve performans çıktılarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Geleneksel denetimli öğrenme yöntemlerinden derin öğrenme mimarilerine kadar uzanan farklı modeller, özellikle yüksek boyutlu ve çok modlu spor verilerinin gerçek zamanlı veya gerçek zamana yakın biçimde değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır (Roumeliotis vd., 2025; Grivas & Safari, 2025; Bin & Xu, 2021).

Bu teknolojiler, antrenörlerin karar verme süreçlerinde de önemli bir destek mekanizması oluşturmaktadır. Yapay zekâ destekli gösterge panelleri ve karar destek sistemleri, müsabaka ve antrenman süreçlerinde taktiksel değerlendirmeler, yorgunluk ve hazırlık göstergeleri ile rakip davranış örüntülerine ilişkin bilgiler sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, bu sistemlerden elde edilen çıktıların antrenörler tarafından yorumlanabilir olması ve gerektiğinde otomatik önerilerin insan yargısıyla yeniden değerlendirilebilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Liang vd., 2026; Alkasasbeh vd., 2026; Wu vd., 2026; Maiden vd., 2023; Palermi vd., 2026; Amawi vd., 2026). İnsan merkezli ve ortak yaratıcı yapay zekâ yaklaşımları da yapay zekânın antrenörün yerine karar vermesinden çok, farklı seçenekler üreterek antrenörün bu seçenekleri değerlendirmesine, uyarlamasına ve kendi stratejik yaklaşımıyla bütünleştirmesine odaklanmaktadır (Maiden vd., 2023).

Sporcular açısından bakıldığında yapay zekâ destekli analizler, fizyolojik, biyomekanik ve çevresel verilerin birlikte değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda antrenman programlarının kişiselleştirilmesi, iş yükünün izlenmesi, yorgunluk belirtilerinin belirlenmesi ve toparlanma süreçlerinin düzenlenmesi gibi uygulamalar ön plana çıkmaktadır (Alkasasbeh vd., 2026; Fathalla vd., 2023; Bin & Xu, 2021). Dijital ikiz uygulamalarında ise beslenme, psikolojik durum ve antrenman verilerinin birlikte ele alınmasıyla sporcunun hazırlık düzeyinin değerlendirilmesi ve bireyselleştirilmiş müdahalelerin desteklenmesi amaçlanmaktadır (Grivas & Safari, 2025; Amawi vd., 2026).

Yapay zekânın etkisi yalnızca antrenör ve sporcu düzeyiyle sınırlı değildir. Spor yöneticileri ve federasyonlar açısından yapay zekâ analitiği; yetenek belirleme, oyuncu değerlendirme, performans tahmini, stratejik planlama, pazarlama analitiği ve taraftar etkileşimi gibi farklı alanlarda karar desteği sağlayabilmektedir. Bunun yanında federasyonlar, verilerin güvenli biçimde yönetilmesi, erişimde eşitliğin sağlanması ve yapay zekâ destekli karar süreçlerinde hesap verebilirliğin korunmasına yönelik yönetişim modelleri üzerinde çalışmaktadır (Roumeliotis vd., 2025; Shariatmadar vd., 2026; Glebova vd., 2024; Waśkiewicz vd., 2025; Madsen & Glebova, 2025).

Yapay zekâ ve veri odaklı sistemlerin sunduğu imkânların yanında çeşitli sınırlılıklar ve tartışmalar da bulunmaktadır. Model performansının veri kalitesine, doğrulama süreçlerine, dış uygulanabilirliğe ve kullanılan özelliklere bağlı olduğu; geliştirilen tahmin modellerinin farklı spor dalları, performans düzeyleri ve sporcu gruplarında aynı başarıyla çalışmayabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle modellerin farklı örneklemler ve koşullar altında dış doğrulamaya tabi tutulması önem taşımaktadır (Grivas & Safari, 2025; Hammes vd., 2022; Palermi vd., 2026; Bin & Xu, 2021). Çok modlu verilerin kullanıldığı sistemlerde ise veri hizalama, senkronizasyon, sensör güvenilirliği ve bağlamsal yorumlama gibi sorunlar, insan gözetiminin gerekliliğini sürdürmektedir (Wu vd., 2026; Suliman, 2026; Bin & Xu, 2021).

Yapay zekâ destekli kararların benimsenmesinde açıklanabilirlik ve güven de temel konular arasındadır. Özellikle sakatlanmaların önlenmesi ve hakemlik gibi sonuçları doğrudan etkileyebilecek alanlarda, yapay zekâ sistemlerinin hangi gerekçelerle belirli tahmin veya öneriler ürettiğinin anlaşılabilir olması önem taşımaktadır. Bu nedenle açıklanabilir yapay zekâ uygulamaları, belirsizliği dikkate alan yöntemler, yorumlanabilir modüller ve şeffaf gösterge panelleri; antrenörler ve sporcular açısından güvenilir karar süreçlerinin geliştirilmesiyle ilişkilendirilmektedir (Shariatmadar vd., 2026; Wu vd., 2026; Zhi vd., 2025; Bin & Xu, 2021).

Yapay zekânın spor ortamlarında yaygınlaşması beraberinde etik ve yönetişimle ilgili sorunları da getirmektedir. Veri sahipliği, rıza, gizlilik, erişim eşitliği, şeffaflık ve algoritmik adalet, sorumlu yapay zekâ kullanımının temel unsurları arasında gösterilmektedir. Özellikle sporculardan elde edilen verilerin nasıl kullanıldığı ve kimler tarafından kontrol edildiği, sporcu haklarının korunması açısından önem taşımaktadır (Suliman, 2026). Benzer şekilde sporcu verilerinin gizliliği, sahipliği ve özerkliği, yapay zekâ destekli izleme ve karar süreçlerinde dikkate alınması gereken başlıca etik konular arasında değerlendirilmektedir (Waśkiewicz vd., 2025; Suliman, 2026).

Bu çerçevede güncel literatür, yapay zekâ destekli karar verme sistemlerini insan uzmanlığının tamamen yerine geçen bir yapıdan çok, insan kararını güçlendiren ve destekleyen bir araç olarak ele almaktadır. Hibrit insan–yapay zekâ sistemlerinde antrenör uzmanlığının korunması, yapay zekâ tarafından oluşturulan önerilerin yorumlanabilir olması ve gerektiğinde insan müdahalesine izin verilmesi ön plana çıkmaktadır (Maiden vd., 2023; Zhi vd., 2025; Bin & Xu, 2021). Dolayısıyla sporda yapay zekâ kullanımına ilişkin temel tartışma, insan ile algoritma arasında mutlak bir tercih yapmaktan çok, bu iki karar verme kapasitesinin hangi koşullarda ve nasıl bir arada kullanılabileceği üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Bu bölümde, sporda yapay zekâ destekli karar sistemlerinin temel yapısı ve işleyişi ele alınarak; performans,

antrenman, sakatlanma yönetimi, taktiksel kararlar, yetenek seçimi ve yönetim süreçlerindeki kullanım alanları değerlendirilecektir. Bunun yanında insan ve algoritmik karar verme süreçlerinin güçlü ve sınırlı yönleri incelenecek; açıklanabilirlik, güven, etik, veri gizliliği ve insan müdahalesi gibi konular üzerinden insan–yapay zekâ iş birliğine dayalı karar destek yaklaşımı tartışılacaktır.

2. Sporda Yapay Zekâ Destekli Karar Sistemleri

2.1. Yapay Zekâ ve Karar Destek Mantığı

Yapay zekâ; algılama, öğrenme, akıl yürütme ve karar verme gibi insan zekâsıyla ilişkilendirilen görevlerin bilgisayar sistemleri tarafından gerçekleştirilebilmesini sağlayan geniş bir yöntem ve teknikler bütününü ifade etmektedir. Spor alanında yapay zekâ, farklı veri kaynaklarından örüntülerin belirlenmesi, tahminlerin oluşturulması ve antrenörler, yöneticiler ile analistlerin karar süreçlerinde kullanabileceği çıktılar üretilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu yönüyle yapay zekâ, yalnızca geçmiş performansın tanımlanmasına değil, geleceğe yönelik tahminlerin ve karar seçeneklerinin oluşturulmasına da katkı sağlamaktadır (Chmait & Westerbeek, 2021; Adeyemo vd., 2025; Dahlbom & Riveiro, 2014).

Yapay zekânın önemli alt alanlarından biri olan makine öğrenmesi ise geçmiş verilerdeki ilişkileri ve örüntüleri öğrenerek tahmin, sınıflandırma ve öneri üretmeye yönelik veri odaklı algoritmaları kapsamaktadır. Spor analitiğinde makine öğrenmesi; maç sonuçlarının, oyuncu performansının, sakatlanma riskinin ve taktiksel durumların değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir. Bu amaçla sınıflandırma, regresyon, topluluk yöntemleri ve derin öğrenme yaklaşımlarından yararlanılmaktadır (Kim vd., 2023; Ishi vd., 2022; Bhattacharjee vd., 2023; Friligkos vd., 2023). Bununla birlikte, model çıktılarının antrenörler ve diğer uygulayıcılar tarafından anlaşılabilir olması, bu sistemlere duyulan güven açısından önemli görülmektedir (Kim vd., 2025).

Sporda makine öğrenmesinin kullanım biçimleri genel olarak tahmin, sınıflandırma ve öneri sistemleri üzerinden ele alınabilir. Tahmin modelleri; maç sonuçları, skorlar, performans olasılıkları ve oyuncuların gelecekteki performanslarına ilişkin öngörüler oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Farklı spor dallarında rastgele orman, yapay sinir ağları, lojistik regresyon ve gradyan artırma gibi yöntemlerin kullanıldığı ve bazı çalışmalarda bu modellerin geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek tahmin başarısı gösterebildiği bildirilmektedir. Bununla birlikte, model performansının kullanılan veri setine, spor dalına ve problem yapısına göre değişebildiği de belirtilmektedir (Roumani, 2023; Liu vd, 2026; Ishi vd., 2022; Li, 2026; Bhattacharjee vd., 2023; Sanjaykumar vd., 2024).

Sınıflandırma sistemleri, belirli sportif durumların önceden tanımlanmış kategoriler içerisinde değerlendirilmesine dayanmaktadır. Kazanma, kaybetme veya beraberlik gibi maç sonuçlarının sınıflandırılması ile farklı oyun içi durumların kategorilere ayrılması bu kullanım biçimine örnek olarak gösterilebilir. Bu süreçte yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, rastgele ormanlar ve topluluk sınıflandırıcıları gibi çeşitli yöntemlerden yararlanılmaktadır (Kim vd., 2023; Ishi vd., 2022; Li, 2026; García-Méndez & Arriba-Pérez, 2025). Öneri sistemlerinde ise makine öğrenmesi çıktıları, doğrudan karar vermekten çok, antrenör veya uzman tarafından değerlendirilebilecek eyleme dönük seçenekler üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Sporcu gelişimi, antrenman önerileri ve taktiksel değerlendirmeler bu kapsamda öne çıkan kullanım alanlarıdır (Dahlbom & Riveiro, 2014; Liu vd., 2021).

Karar destek sistemleri, yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamalarının spor ortamında nasıl konumlandırılması gerektiğini açıklayan temel yapılardan biridir. Bu sistemlerin amacı, insan karar vericinin yerine geçmek değil; tahminleri, risk değerlendirmelerini ve olası eylem seçeneklerini karar sürecine dâhil ederek insan kararını desteklemektir. Sporda oyuncu seçimi, oyun planlaması, performans yönetimi ve kaynak kullanımı gibi farklı alanlarda kullanılan bu sistemlerde insan gözetiminin ve sorumluluğunun korunması temel

bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Dahlbom & Riveiro, 2014).

Bu nedenle güncel literatürde yapay zekâ ve makine öğrenmesi, insan yargısının yerine geçen bağımsız karar vericilerden çok karar destek araçları olarak ele alınmaktadır. Antrenörlerin ve yöneticilerin model tarafından üretilen çıktıları anlayabilmesi, değerlendirebilmesi ve gerektiğinde farklı bir karar verebilmesi için açıklanabilirlik ve yorumlanabilirlik önemli görülmektedir (Roumani, 2023; Kim vd., 2025). Dolayısıyla yapay zekânın spordaki temel işlevi, nihai kararın sorumluluğunu üstlenmek yerine insan uzmanlığını veri ve analitik çıktılarla desteklemektir. Kadro seçimi, antrenman planlaması, sakatlanma riskinin değerlendirilmesi ve performans optimizasyonu gibi alanlarda yapay zekâ önemli bilgiler sağlayabilmekte; ancak nihai kararın alan bilgisi, etik değerlendirmeler ve stratejik hedefler doğrultusunda insan uzmanlar tarafından verilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Das & Awais, 2021; Fu vd., 2025; Chmait & Westerbeek, 2021).

2.2. Spor Verisinin Algoritmik Karara Dönüşümü

Spor ortamlarında algoritmik karar süreçlerinin başlangıç noktasını farklı kaynaklardan elde edilen veriler oluşturmaktadır. GPS ve giyilebilir teknolojiler; sporcunun hareket özellikleri, antrenman yükü ve fizyolojik durumuna ilişkin sürekli veri sağlayarak performansın izlenmesi ve iş yükünün değerlendirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır (Seshadri vd., 2021; Nassis vd., 2023). Video analizi ve bilgisayarlı görü uygulamaları ise sporcu hareketlerinin, biyomekanik özelliklerin ve taktiksel davranışların incelenmesine olanak sağlayarak sensörlerden elde edilen verileri tamamlamaktadır (Shariatmadar vd., 2026).

Spor ortamından elde edilen ham verinin tek başına karar verme açısından yeterli olması beklenemez. Toplanan verilerin öncelikle işlenmesi, farklı kaynaklardan gelen bilgilerin bir araya getirilmesi ve karar sürecinde kullanılabilecek göstergelere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu süreçte GPS, giyilebilir

sensörler, video ve diğer performans verilerinin birlikte değerlendirilmesi, sporcunun durumu hakkında tek bir veri kaynağına kıyasla daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına imkân sağlamaktadır (Hudson vd., 2023; Claudino vd., 2019).

Verilerin işlenmesi sonucunda antrenman yükü, yorgunluk, performans değişimi ve sakatlanma riski gibi alanlarda anlamlı göstergeler ve tahminler üretilebilmektedir. Böylece veri toplama süreci yalnızca sporcunun mevcut durumunun kaydedilmesiyle sınırlı kalmamakta; elde edilen bilgiler gelecekte ortaya çıkabilecek durumların değerlendirilmesinde de kullanılabilmektedir. Bu noktada modeller tarafından üretilen sonuçların anlaşılır biçimde sunulması, algoritmik çıktının uygulamada kullanılabilmesi açısından önem taşımaktadır (Salim vd., 2024).

Algoritmik sürecin son aşamasında ise üretilen tahmin ve öneriler antrenör, spor bilimci veya sağlık personelinin değerlendirmesine aktarılmaktadır. Bu çıktılar antrenman planlaması, performans yönetimi, sakatlanma riskinin değerlendirilmesi veya spora dönüş gibi kararlarda uzmanlara ek bilgi sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, algoritmik çıktılar uzman değerlendirmesinin yerine geçmemekte; mevcut verilerin daha sistematik biçimde yorumlanmasına yardımcı olan bir karar desteği işlevi görmektedir (Herring vd., 2024; Claudino vd., 2019).

3. Sporda Yapay Zekâ Destekli Kararların Kullanım Alanları

3.1. Performans, Antrenman ve Sakatlık Yönetimi

Yapay zekâ destekli sistemler, sporcuların antrenman yükünün daha ayrıntılı biçimde izlenmesine ve gerektiğinde yeniden düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. GPS, giyilebilir sensörler ve fizyolojik ölçümlerden elde edilen veriler aracılığıyla dış ve iç yük göstergeleri birlikte değerlendirilebilmekte; böylece antrenman hacmi ve şiddetinin sporcunun mevcut

durumuna göre ayarlanması mümkün hâle gelmektedir (Alkasasbeh vd., 2026; Tsenos vd., 2026).

Performans tahmini açısından yapay zekâ, farklı veri kaynaklarından elde edilen bilgileri birlikte işleyerek sporcunun hazır oluşu ve olası performans düzeyi hakkında öngörüler üretebilmektedir. Kalp atım hızı değişkenliği, uyku, beslenme, psikolojik hazır oluş ve çevresel koşullar gibi değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi; performansın planlanması ve antrenman kararlarının desteklenmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır (Amawi vd., 2026; Grivas & Safari, 2025).

Yorgunluk ve toparlanma süreçlerinin değerlendirilmesinde de yapay zekâ temelli analizlerden yararlanılmaktadır. Giyilebilir teknolojilerden elde edilen fizyolojik ve davranışsal göstergeler kullanılarak yorgunluk düzeyi ve toparlanma durumu hakkında tahminler yapılabilmekte, bu sonuçlar antrenmanın sürdürülmesi, azaltılması veya toparlanmaya daha fazla zaman ayrılması gibi kararlara katkı sağlayabilmektedir (Dhahbi vd., 2026).

Sakatlanma riskinin belirlenmesi, yapay zekânın spor alanındaki önemli uygulamalarından bir diğeridir. Önceki sakatlık öyküsü, antrenman yükü, hareket özellikleri, nöromüsküler göstergeler ve fizyolojik veriler birlikte değerlendirilerek sporcuya özgü risk profilleri oluşturulabilmektedir. Bununla birlikte, model başarısının spor dalına, veri kalitesine ve örneklem özelliklerine bağlı olarak değişebildiği belirtilmekte; bu nedenle tahminlerin uzman değerlendirmesiyle birlikte ele alınması önerilmektedir (Michel vd., 2023).

Bu gelişmeler, antrenman süreçlerinin daha bireysel biçimde planlanmasına da olanak sağlamaktadır. Yapay zekâ destekli sistemler aracılığıyla sporcuların fizyolojik, biyomekanik ve psikolojik özelliklerine göre antrenman yükü, toparlanma süreci ve koruyucu uygulamalar farklılaştırılabilmektedir. Ancak bu tür sistemlerin temel işlevi doğrudan karar vermek değil, antrenör ve sağlık profesyonellerinin karar sürecini desteklemektir (Palermi vd., 2026).

3.2. Taktik ve Maç İçi Kararlar

Yapay zekâ ve bilgisayar görüşü uygulamaları, rakiplerin oyun anlayışını çözümleme ve maç sırasında ortaya çıkan taktiksel değişimleri daha hızlı değerlendirme açısından önemli olanaklar sunmaktadır. Video akışları, konumsal veriler ve sensör çıktıları üzerinden rakip dizilişleri, pas yolları, pres yapıları ve savunma eğilimleri belirlenebilmekte; bu bilgiler oyun içi karşı hamlelerin planlanmasına katkı sağlayabilmektedir (Naik vd., 2022; Chen vd., 2025).

Oyuncu ve takım hareketlerinin değerlendirilmesi de maç içi karar desteğinin temel bileşenlerinden biridir. Bilgisayar görüşü ve makine öğrenmesi yöntemleri, oyuncuların saha içindeki konumlarını, hareket yörüngelerini ve takımın kolektif davranışını analiz edebilmekte; böylece alan kullanımı, takım mesafeleri, topsuz hareketler ve geçiş davranışları hakkında daha ayrıntılı bilgiler üretilebilmektedir (Munoz-Macho vd., 2024; Rajšp & Fister, 2020).

Bu analizler aynı zamanda tekrar eden oyun örüntülerinin belirlenmesine de imkân tanımaktadır. Topa sahip olma yapıları, geçişler, kontra atak eğilimleri ve belirli taktiksel dizilerin algoritmik olarak tanımlanması, rakibin olası davranışlarına yönelik daha sistematik değerlendirmeler yapılmasını desteklemektedir. Özellikle takviyeli öğrenme ve tahmine dayalı modelleme yaklaşımları, değişen oyun koşullarına göre farklı taktik seçeneklerin değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir (Xu & Wang, 2024).

Maç içi karar desteğinin bir diğer boyutu ise oyuncu değişiklikleri ve taktiksel düzenlemelerdir. Oyuncuların performans durumu, yorgunluk göstergeleri, iş yükü ve eşleşme avantajlarına ilişkin veriler; oyuncu değişikliğinin zamanlaması veya takım dizilişinin değiştirilmesi gibi kararlara ek bilgi sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, algoritmik çıktılar doğrudan uygulanması gereken kararlar olarak değil, antrenörün oyun bağlamı ve oyuncuya özgü koşullarla birlikte değerlendireceği destekleyici bilgiler olarak ele alınmalıdır (Claudino vd., 2019; Zhao vd., 2025).

3.3. Yetenek Seçimi ve Transfer Kararları

Yapay zekâ, yetenek seçimi süreçlerinde oyuncuların çok boyutlu biçimde profillenmesine ve farklı performans özelliklerinin karşılaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Fiziksel, teknik-taktik, psikolojik ve bağlamsal değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi, oyuncuların yalnızca mevcut performanslarına göre değil, daha geniş bir özellik seti üzerinden incelenmesine olanak tanımaktadır. Özellikle makine öğrenmesi tabanlı modellerin, oyuncu ve transfer özelliklerini birlikte işleyerek karşılaştırmalı profiller oluşturabildiği ve transfer başarısına ilişkin tahminler üretebildiği gösterilmiştir (Ćwiklinski vd., 2021; Larkin vd., 2023).

Potansiyel tahmini açısından yapay zekâ, oyuncunun gelecekteki gelişim düzeyini yalnızca mevcut performans göstergelerine dayalı olarak değil, zaman içerisinde değişebilen çok sayıda değişkeni birlikte ele alarak değerlendirebilmektedir. Bu yaklaşım, yetenek gelişiminin doğrusal olmayan yapısını dikkate alan modellerle uyumludur ve oyuncuların gelecekteki performans kapasitelerine ilişkin daha dinamik öngörüler geliştirilmesini desteklemektedir (Yakob, 2026; Boone vd., 2025).

Scouting süreçlerinde yapay zekâ, geleneksel gözlem ve uzman değerlendirmesini veri temelli analizlerle destekleyen bir araç olarak kullanılmaktadır. Video analizleri, performans verileri ve dijital oyuncu profilleri sayesinde aday sporcuların güçlü ve sınırlı yönleri daha sistematik biçimde değerlendirilebilmekte, geniş oyuncu havuzları içerisinden belirli kriterlere uygun adayların belirlenmesi kolaylaşmaktadır. Bununla birlikte, yapay zekâ destekli scouting uygulamalarının etkinliği, elde edilen verilerin doğru yorumlanması ve insan merkezli karar süreçleriyle bütünleştirilmesine bağlıdır (Ribeiro vd., 2025; Frost vd., 2025).

Transfer kararlarında ise algoritmik destek, kulüplerin aday oyuncuları performans, gelişim potansiyeli, takım ihtiyaçları ve bütçe gibi farklı ölçütler üzerinden değerlendirmesine yardımcı olabilmektedir. Makine öğrenmesi tabanlı modeller transfer başarısının tahmin edilmesinde ve

aday oyuncuların önceliklendirilmesinde kullanılabilirken, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları bu önerilerin karar vericiler tarafından daha anlaşılır biçimde değerlendirilmesini sağlayabilmektedir. Bu nedenle algoritmik sistemlerin transfer kararlarını tek başına belirleyen mekanizmalar olarak değil, scouting ekibi ve teknik yöneticilerin değerlendirmelerini destekleyen araçlar olarak konumlandırılması daha uygun görülmektedir (Beal vd., 2019; Xu & Fong, 2025).

4. İnsan mı Algoritma mı?

İnsan karar verme süreci; deneyim, sezgi ve bağlamsal değerlendirme gibi yalnızca sayısal verilerle açıklanması güç unsurları içermektedir. Özellikle belirsizliğin yüksek olduğu, koşulların hızla değiştiği veya etik değerlendirmelerin önem kazandığı durumlarda insanın alan bilgisi ve deneyimi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, insan kararlarının bilişsel yük, yorgunluk ve geçmiş deneyimlerden kaynaklanan örtük yanlılıklardan etkilenebilmesi, kararların her zaman tutarlı ve nesnel olmayabileceğini göstermektedir (Nasir vd., 2024; Hertwig vd., 2024).

Algoritmik sistemler ise büyük miktardaki veriyi kısa sürede işleyebilme, karmaşık ilişkileri ve tekrar eden örüntüleri belirleyebilme ve aynı ölçütleri tutarlı biçimde uygulayabilme açısından önemli avantajlara sahiptir. Buna karşılık algoritmaların başarısı büyük ölçüde kullanılan verinin niteliğine ve temsil gücüne bağlıdır. Yanlı veya eksik verilerle geliştirilen modeller mevcut yanlılıkları yeniden üretebilir ve bağlamsal açıdan önemli bazı unsurların gözden kaçmasına neden olabilir (De-Arteaga vd., 2022; Schwartz vd., 2021; Lepri vd., 2018).

Bu nedenle insan ve algoritmik karar verme arasında mutlak bir üstünlük ilişkisi kurmak yerine, her iki yaklaşımın güçlü yönlerinden birlikte yararlanılması daha işlevsel görünmektedir. İnsanlar bağlamı yorumlama, deneyim ve etik değerlendirme açısından öne çıkarken; algoritmalar veri işleme, örüntü belirleme ve tutarlılık bakımından avantaj sağlamaktadır. Bu anlayış, yapay zekâ çıktılarının insan uzmanlığıyla

birlikte değerlendirildiği hibrit karar verme yaklaşımını ön plana çıkarmaktadır (Hertwig vd., 2024; Nasir vd., 2024).

Hibrit karar verme yaklaşımında yapay zekâ, nihai kararı veren bağımsız bir aktör olarak değil, insan kararını destekleyen bir araç olarak konumlandırılmaktadır. Algoritmalar büyük veri kümelerinden riskleri ve örüntüleri belirleyebilirken, insan karar vericiler bu çıktıları alan bilgisi, bağlamsal koşullar ve etik değerlendirmeler doğrultusunda yorumlayabilmektedir. Bu yaklaşım literatürde sıklıkla human-in-the-loop olarak ifade edilmekte ve insanın algoritmik önerileri değerlendirme, doğrulama ve gerektiğinde geçersiz kılma yetkisini korumasını öngörmektedir (Barkat & Busuioc, 2020; De-Arteaga vd., 2022; Wang vd., 2020).

İnsanın karar sürecinde bulunması tek başına hatasız bir yapı anlamına gelmemektedir. Karar vericilerin algoritmik çıktılara gereğinden fazla güvenmesi otomasyon yanlılığına yol açabilmektedir. Bu nedenle algoritmik önerilerin açıklanabilir olması, karar vericinin çıktıyı sorgulayabilmesi ve nihai sorumluluğun açık biçimde insanda kalması önem taşımaktadır (Schwartz vd., 2021; Barkat & Busuioc, 2020).

Bu çerçevede temel mesele, insan ile algoritma arasında bir seçim yapmaktan çok, iki farklı karar kapasitesinin nasıl bir araya getirileceğidir. Yapay zekâ veriye dayalı tahmin ve öneriler sağlarken, insan uzmanlığı bağlamı yorumlama ve nihai sorumluluğu üstlenme işlevini sürdürmektedir.

5. Yapay Zekâ Destekli Kararlarda Güven ve Etik

Yapay zekâ destekli karar sistemlerinin spor alanında yaygınlaşması, bu sistemlerin ne ölçüde anlaşılabilir ve güvenilir olduğu sorusunu da beraberinde getirmektedir. Özellikle karmaşık modellerin "kara kutu" niteliği taşıması, antrenörlerin ve uzmanların bir önerinin hangi gerekçelerle üretildiğini anlamasını güçleştirebilmektedir. Bu nedenle açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, model çıktılarının anlaşılması ve uzmanlar tarafından sorgulanabilmesi açısından önemli görülmektedir.

Kararların hangi değişkenlerden etkilendiğinin açıklanabilmesi, yapay zekâ sistemlerine duyulan güvenin artmasına katkı sağlayabilmektedir (Zhao vd., 2025).

Etik açıdan bir diğer önemli konu, sporculardan elde edilen biyometrik, fizyolojik ve performans verilerinin korunmasıdır. Bu verilerin kimler tarafından toplandığı, nasıl saklandığı ve hangi amaçlarla kullanılabileceği açık biçimde belirlenmelidir. Sporcu onayının bilgilendirilmiş ve gönüllü olması, veri sahipliği ve kullanım haklarının şeffaf biçimde tanımlanması da sporcu özerkliğinin korunması açısından önem taşımaktadır (Waśkiewicz vd., 2025; Chen & Dai, 2024).

Algoritmik kararların adil olması ise kullanılan veri setlerinin niteliğiyle yakından ilişkilidir. Geçmişteki eşitsizlikleri veya belirli grupların yetersiz temsilini içeren veriler, yapay zekâ modellerinin bu yanlılıkları yeniden üretmesine neden olabilir. Bu durum özellikle yetenek seçimi ve transfer gibi sporcuların kariyerlerini doğrudan etkileyen süreçlerde önem kazanmaktadır. Bu nedenle farklı sporcu gruplarını yeterli biçimde temsil eden verilerin kullanılması ve modellerin düzenli olarak yanlılık açısından değerlendirilmesi gerekmektedir (Suliman, 2026; Roumeliotis vd., 2025).

Yapay zekâ destekli bir önerinin hatalı olması durumunda sorumluluğun kime ait olduğu da önemli bir etik ve yönetsel sorundur. Yanlış bir sakatlık riski tahmini, hatalı oyuncu seçimi veya adaletsiz bir yetenek değerlendirmesi sporcu sağlığı ve kariyeri üzerinde doğrudan sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle antrenör, kulüp ve teknoloji sağlayıcısının veri kullanımı, modelin uygulanması ve kararın sonuçlarına ilişkin sorumluluklarının açık biçimde tanımlanması gerektiği vurgulanmaktadır (Sethi & Talvelkar, 2024).

Bu çerçevede insan gözetimi, yapay zekâ destekli spor sistemlerinin güvenilir ve etik biçimde kullanılmasının temel unsurlarından biri olmaya devam etmektedir. Yapay zekâ tarafından üretilen çıktılar karar sürecini destekleyebilir; ancak özellikle sporcu sağlığı, gelişimi ve kariyerini etkileyen yüksek etkili kararlarda nihai değerlendirmenin insan uzmanlar

tarafından yapılması gerekmektedir. Böylece algoritmik çıktılar bağlamsal bilgi, etik değerlendirme ve sporcuya özgü koşullarla birlikte ele alınabilir (Grivas & Safari, 2025).

6. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Gelecekte bu dönüşümün önemli bileşenlerinden birinin gerçek zamanlı karar destek sistemleri olması beklenmektedir. Giyilebilir teknolojiler, görüntüleme ve takip sistemleri ile fizyolojik ve bağlamsal verilerin eş zamanlı olarak işlenebilmesi, antrenör ve uzmanların değişen koşullara daha hızlı yanıt vermesine imkân sağlayabilir. Bununla birlikte, gerçek zamanlı sistemlerin gelişmesi karar sürecinin tamamen otomatikleşmesi anlamına gelmemektedir. Yapay zekâ tarafından üretilen çıktıların antrenör ve diğer uzmanların değerlendirmesiyle birlikte ele alınması, spor ortamlarında güvenilir karar desteğinin temel unsurlarından biri olarak görülmektedir (Liang vd., 2026; Naughton vd., 2024).

Çok modlu veri entegrasyonu ve dijital ikiz gibi teknolojiler de gelecekte spor alanındaki karar destek sistemlerinin kapsamını genişletebilecek gelişmeler arasında yer almaktadır. Fizyolojik, biyomekanik, psikolojik ve performansa ilişkin farklı veri türlerinin aynı yapı içerisinde değerlendirilmesi, sporcuya özgü daha kapsamlı değerlendirmelerin ve bireyselleştirilmiş önerilerin geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Bununla birlikte, bu sistemlerin güvenilir biçimde kullanılabilmesi için model çıktılarının açıklanabilir olması, verilerin güvenli biçimde yönetilmesi ve insan gözetiminin karar sürecinde korunması önem taşımaktadır (Shariatmadar vd., 2026; Amawi vd., 2026).

Teknolojik kapasite arttıkça insan uzmanlığının öneminin azalacağı düşüncesi ise spordaki mevcut yaklaşımlarla örtüşmemektedir. Yapay zekâ sistemleri yüksek hacimli verilerin işlenmesi, örüntülerin belirlenmesi ve karar seçeneklerinin oluşturulmasında önemli avantajlar sağlarken; sporcuya ve müsabakaya özgü bağlamın yorumlanması, beklenmeyen durumların değerlendirilmesi ve nihai kararın sorumluluğunun

üstlenilmesi insan uzmanlığının temel işlevleri olmaya devam etmektedir. Bu nedenle gelecekte daha işlevsel olan yaklaşım, insan ve yapay zekâyı birbirinin alternatifi olarak görmekten çok, farklı güçlü yönlere sahip iki karar bileşeni olarak birlikte değerlendirmektir (Maiden vd., 2023; Hammes vd., 2022).

Sonuç olarak, sporda yapay zekâ destekli karar sistemlerinin geleceği "insan mı, algoritma mı?" sorusuna taraflardan birini seçerek yanıt vermekten çok, insan ile algoritmanın hangi koşullarda daha etkili biçimde birlikte çalışabileceğinin belirlenmesine bağlıdır. Yapay zekâ; veriyi işleyen, örüntüleri ortaya çıkaran, riskleri tahmin eden ve alternatifler üreten güçlü bir karar destek aracı olarak konumlandırılmalıdır. Nihai değerlendirme, bağlamsal yorum ve sorumluluk ise insan uzmanlığının merkezinde kalmalıdır. Bu nedenle yapay zekânın spordaki temel amacı insanın yerini almak değil, insanın daha bilinçli, tutarlı ve nitelikli kararlar verebilmesine katkı sağlamak olmalıdır.

Kaynakça

Alkasasbeh, W. J., Amawi, A. T., Grivas, G. V., Orhan, B. E., & Alawamleh, T. (2026). Artificial intelligence and wearables in sport: Performance, injury risk, and wellbeing. *Frontiers in Artificial Intelligence, 9*. https://doi.org/10.3389/frai.2026.1838507

Amawi, A. T., Grivas, G. V., & AlKasasbeh, W. J. (2026). Digital twin for Taekwondo athletes: Integrating sports nutrition and psychological readiness using artificial intelligence. *Frontiers in Public Health, 14*. https://doi.org/10.3389/fpubh.2026.1822194

Barkat, S. A., & Busuioc, M. (2020). Policy-makers' processing of AI algorithmic advice: 'Automation bias' versus selective adherence. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.3794660

Beal, R., Norman, T. J., & Ramchurn, S. D. (2019). Artificial intelligence for team sports: A survey. *The Knowledge Engineering Review, 34*. https://doi.org/10.1017/S0269888919000225

Bhattacharjee, B., Bhattacharjee, D., & Bhattacharjee, B. (2023). Performance assessment of the machine learning algorithms for first inning score prediction in cricket. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3385887/v1

Bin, L., & Xu, X. (2021). Application of artificial intelligence in basketball sport. *Journal of Education, Health and Sport, 11*(7), 54–67. https://doi.org/10.12775/jehs.2021.11.07.005

Boone, R. T., Zambrotta, N. S., Manocchio, A. M., & Bowman, J. K. (2025). Head in the game: The impact of cognitive abilities on performance of National Football League quarterbacks. *Frontiers in Psychology, 16*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1540498

Chen, C., Gou, W., & Yao, X. (2025). Quantitative analysis and evaluation of research on the application of computer vision in sports since the 21st century. *Frontiers in Sports and Active Living, 7*. https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1604232

Chen, Z., & Dai, X. (2024). Utilizing AI and IoT technologies for identifying risk factors in sports. *Heliyon, 10*(11), e32477. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32477

Chmait, N., & Westerbeek, H. (2021). Artificial intelligence and machine learning in sport research: An introduction for non-data scientists. *Frontiers in Sports and Active Living, 3*. https://doi.org/10.3389/fspor.2021.682287

Claudino, J. G., Capanema, D. de O., Souza, T. V. de, Serrão, J. C., Pereira, A. C. M., & Nassis, G. P. (2019). Current approaches to the use of artificial intelligence for injury risk assessment and performance prediction in team sports: A systematic review. *Sports Medicine - Open, 5*(1). https://doi.org/10.1186/s40798-019-0202-3

Ćwiklinski, B., Giełczyk, A., & Choraś, M. (2021). Who will score? A machine learning approach to supporting football team building and transfers. *Entropy, 23*(1), 90. https://doi.org/10.3390/e23010090

Dahlbom, A., & Riveiro, M. (2014). Situation modeling and visual analytics for decision support in sports. *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications and 10th International Conference on Information Visualization Theory and Applications*, 539–544. https://doi.org/10.5220/0004973105390544

Das, K., & Awais, M. (2021). A predictive analysis of PSL match winner using machine learning techniques. *UMT Artificial Intelligence Review, 1*(1), 74–85. https://doi.org/10.32350/umtair.11.05

De-Arteaga, M., Feuerriegel, S., & Saar-Tsechansky, M. (2022). Algorithmic fairness in business analytics: Directions for research and practice. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.10991

Dhahbi, W., Jebabli, N., Souaifi, M., Ceylan, H. İ., Saad, H. B., Chamari, K., Pyne, D. B., & Chaabène, H. (2026). Application of artificial intelligence for predicting sports injuries and customizing personalized prevention strategies: A scoping review. *Bioengineering, 13*(6), 692. https://doi.org/10.3390/bioengineering13060692

Fathalla, A., Salah, A., Bekhit, M., Eldesouky, E., Talha, A., Zenhom, A., & Ali, A. (2023). Real-time and automatic system for performance evaluation of karate skills using motion capture sensors and continuous wavelet transform. *Internatio-*

nal Journal of Intelligent Systems, 2023, 1561942. https://doi.org/10.1155/2023/1561942

Friligkos, G., Papaioannou, E., & Kaklamanis, C. (2023). A framework for applying the logistic regression model to obtain predictive analytics for tennis matches. *Technium Romanian Journal of Applied Sciences and Technology, 15*, 60–74. https://doi.org/10.47577/technium.v15i.9616

Frost, W., Groom, R., & Nicholls, S. (2025). The use of performance analysis and data-driven approaches within senior men's football recruitment. *International Journal of Sports Science & Coaching, 20*(2), 604–616. https://doi.org/10.1177/17479541251315948

Fu, Z., Wu, Y., & Zhong, Q. (2025). Econometric framework for analyzing NBA player contracts through quantitative methodologies. *Intelligent Decision Technologies, 19*(5), 3088–3106. https://doi.org/10.1177/18724981251355446

García-Méndez, S., & de Arriba-Pérez, F. (2025). Explainable e-sports win prediction through machine learning classification in streaming. *Entertainment Computing*, 101027.

Glebova, E., Madsen, D. Ø., Mihaľová, P., Géczi, G., Mittelman, A., & Jorgić, B. (2024). Artificial intelligence development and dissemination impact on the sports industry labor market. *Frontiers in Sports and Active Living, 6*. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1363892

Grivas, G. V., & Safari, K. (2025). Artificial intelligence in endurance sports: Metabolic, recovery, and nutritional perspectives. *Nutrients, 17*(20), 3209. https://doi.org/10.3390/nu17203209

Hammes, F., Hagg, A., Asteroth, A., & Link, D. (2022). Artificial intelligence in elite sports—A narrative review of success stories and challenges. *Frontiers in Sports and Active Living, 4*. https://doi.org/10.3389/fspor.2022.861466

Herring, S. A., Putukian, M., Kibler, W. B., LeClere, L. E., Boyajian-O'Neill, L. A., Day, M. A., Franks, R. R., Indelicato, P. A., Matuszak, J., Miller, T. L., O'Connor, F., Poddar, S., Svoboda, S. J., & Zaremski, J. L. (2024). Team physician consensus statement: Return to sport/return to play and the team physician: A team physician consensus statement—2023 update. *Current Sports Medicine Reports, 23*(5), 183–191. https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000001169

Hertwig, R., Herzog, S. M., & Kozyreva, A. (2024). Blinding to circumvent human biases: Deliberate ignorance in humans, institutions, and machines. *Perspectives on Psychological Science, 19*(5), 849–859.

Hudson, D., Hartigh, R. J. R. D., Meerhoff, L. A., & Atzmueller, M. (2023). Explainable multi-modal and local approaches to modelling injuries in sports data. *2023 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, 949–957. https://doi.org/10.1109/ICDMW60847.2023.00126

Ishi, M., Patil, J., Patil, N. N., & Patil, V. M. (2022). Winner prediction in one day international cricket matches using machine learning framework: An ensemble approach. *Indian Journal of Computer Science and Engineering, 13*(3), 628–641. https://doi.org/10.21817/indjcse/2022/v13i3/221303043

Kim, J. W., Magnusen, M., & Jeong, S. (2023). March Madness prediction: Different machine learning approaches with non-box score statistics. *Managerial and Decision Economics, 44*(4), 2223–2236. https://doi.org/10.1002/mde.3814

Kim, J. W., Yoon, Y., & Jeong, S. (2025). Advancing NFL win prediction: From Pythagorean formulas to machine learning algorithms. *Frontiers in Sports and Active Living, 7*. https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1638446

Larkin, P., Sanford, M., Talpey, S., Gorman, A. D., & Reeves, M. J. (2023). Talent identification in youth basketball: Talent scouts' perceptions of the key attributes for athlete development. *International Sport Coaching Journal, 10*(2), 163–171. https://doi.org/10.1123/iscj.2022-0052

Lepri, B., Oliver, N., Letouzé, E., Pentland, A., & Vinck, P. (2018). Fair, transparent, and accountable algorithmic decision-making processes: The premise, the proposed solutions, and the open challenges. *Philosophy & Technology, 31*(4), 611–627.

Li, X. (2026). Research on predictive modelling of volleyball game outcomes using machine learning techniques and data analytics. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9967646/v1

Liang, Y., Guo, X., Zhang, J., & Du, X. (2026). NeuroPlayNet: A multimodal AI framework for real-time cognitive-aware strategy optimization in professional basketball. *Scientific Reports, 16*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-026-41140-y

Liu, A., Mahapatra, R. P., & Mayuri, A. V. R. (2023). Hybrid design for sports data visualization using AI and big data analytics. *Complex & Intelligent Systems, 9*(3), 2969–2980.

Liu, R., Gao, Y., Zhuang, Y., & Wang, L. (2026). A multi-algorithm machine learning framework for predicting career longevity in professional basketball: Integrating draft combine measurements and early-career performance.

Madsen, D. Ø., & Glebova, E. (2025). Sports Industry 5.0: Reimagining sport through technology, humanity, and sustainability. *Frontiers in Sports and Active Living, 7*. https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1640362

Maiden, N., Lockerbie, J., Zachos, K., Wolf, A., & Brown, A. (2023). Designing new digital tools to augment human creative thinking at work: An application in elite sports coaching. *Expert Systems, 40*(3), e13194.

Michel, M.-F., Girard, O., Guillard, V., & Brechbuhl, C. (2023). Well-being as a performance pillar: A holistic approach for monitoring tennis players. *Frontiers in Sports and Active Living, 5*. https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1259821

Munoz-Macho, A. A., Domínguez-Morales, M., & Sevillano, J. L. (2024). Performance and healthcare analysis in elite sports teams using artificial intelligence: A scoping review. *Frontiers in Sports and Active Living, 6*. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1383723

Naik, B. T., Hashmi, M. F., & Bokde, N. D. (2022). A comprehensive review of computer vision in sports: Open issues, future trends and research directions. *Applied Sciences, 12*(9), 4429. https://doi.org/10.3390/app12094429

Nasir, S., Khan, R. A., & Bai, S. (2024). Ethical framework for harnessing the power of AI in healthcare and beyond. *IEEE Access, 12*, 31014–31035. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3369912

Nassis, G. P., Verhagen, E., Brito, J., Figueiredo, P., & Krustrup, P. (2023). A review of machine learning applications in soccer with an emphasis on injury risk. *Biology of Sport, 40*(1), 233–239. https://doi.org/10.5114/biolsport.2023.114283

Naughton, M., Salmon, P. M., Compton, H. R., & McLean, S. (2024). Challenges and opportunities of artificial intelligence implementation within sports science and sports medicine te-

ams. *Frontiers in Sports and Active Living, 6*. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1332427

Palermi, S., Pucciatti, R., Regnard, N.-E., Guermazi, A., Araujo, F., Demeco, A., Mekki, Y., D'Antona, G., Guarnera, A., Cerciello, S., Guzzini, M., & Vecchiato, M. (2026). Artificial intelligence in sports medicine: A decision-centered framework for the future sports physician. *Diagnostics, 16*(10), 1448. https://doi.org/10.3390/diagnostics16101448

Rajšp, A., & Fister, I. (2020). A systematic literature review of intelligent data analysis methods for smart sport training. *Applied Sciences, 10*(9), 3013. https://doi.org/10.3390/app10093013

Ribeiro, S., Casanova, F., Afonso, J., Pompeo, A., Cirillo, E. L. R., González-Víllora, S., … Williams, A. M. (2025). What does research tell us about scouting in football? A scoping review with evidence gap-map. *International Journal of Sports Science & Coaching, 20*(6), 2709–2728.

Roumani, Y. F. (2023). Sports analytics in the NFL: Classifying the winner of the Super Bowl. *Annals of Operations Research, 325*(1), 715–730.

Roumeliotis, K. I., Mastrogeorgiou, Y., Kokios, V., Papadopoulos, S., Tsekeris, C., Choustoulakis, E., Γιαννακόπουλος, Θ., Mandenaki, K., Tzomaka, A., Giatsoglou, N., & Kipreos, G. (2025). A review of artificial intelligence in sports: Applications, ethical concerns, and legal frameworks. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7182432/v1

Salim, F. A., Postma, D. B. W., Haider, F., Luz, S., van Beijnum, B.-J. F., & Reidsma, D. (2024). Enhancing volleyball training: Empowering athletes and coaches through advanced sensing and analysis. *Frontiers in Sports and Active Living, 6*. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1326807

Sanjaykumar, S., Udaichi, K., Rajendiran, G., Creţu, M., & Козіна, Ж. (2024). Cricket performance predictions: A comparative analysis of machine learning models for predicting cricket player's performance in the One Day International (ODI) World Cup 2023. *Health Sport Rehabilitation, 10*(1), 6–19. https://doi.org/10.58962/hsr.2024.10.1.6-19

Schwartz, R., Down, L., Jonas, A., & Tabassi, E. (2021). A proposal for identifying and managing bias in artificial intelligence.

National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1270-draft

Seshadri, D. R., Thom, M. L., Harlow, E. R., Gabbett, T. J., Geletka, B. J., Hsu, J. J., Drummond, C. K., Phelan, D., & Voos, J. E. (2021). Wearable technology and analytics as a complementary toolkit to optimize workload and to reduce injury burden. *Frontiers in Sports and Active Living, 2*. https://doi.org/10.3389/fspor.2020.630576

Sethi, S. P., & Talvelkar, S. (2024). A comprehensive review of emerging trends in sports management. *Multidisciplinary Reviews, 7*(4), 2024068. https://doi.org/10.31893/multirev.2024068

Shariatmadar, K., Osman, A., & Rey, R. (2026). FST.ai 2.5: Explainable and uncertainty-aware AI for Olympic and Para-Taekwondo decision support, athlete digital twins, and federation-scale analytics. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2607.16597

Suliman, M. (2026). Digital athlete sovereignty: Navigating the commodification and ethics of youth football data in a globalized ecosystem. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-10229564/v1

Tsenos, M., Kokkotis, C., Draganidis, D., Alibertis, N., Pantazis, D., Tsimeas, P., Poulios, A., Zaras, N., Malliou, P., Tsaousidis, I., Michalopoulou, M., Tsakalidis, D., Avloniti, A., Fatouros, I. G., & Chatzinikolaou, A. (2026). Injury prediction and risk modelling in team sports using artificial intelligence and sensor-based monitoring: A scoping review. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology, 11*(2), 204. https://doi.org/10.3390/jfmk11020204

Wang, R., Harper, F. M., & Zhu, H. (2020). Factors influencing perceived fairness in algorithmic decision-making: Algorithm outcomes, development procedures, and individual differences. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.09604

Waśkiewicz, Z., Słomka, K. J., Grzywacz, T., & Juras, G. (2025). Ethical bias in AI-driven injury prediction in sport: A narrative review of athlete health data, autonomy and governance. *AI, 6*(11), 283. https://doi.org/10.3390/ai6110283

Wu, A., Zhang, A., & Zhou, C. (2026). AI and big data personalized training protocol for Chinese youth basketball. *Scientific Reports, 16*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-34512-3

Xu, C., & Wang, Y. (2024). Tactical intelligent decision modelling in sports competitions based on reinforcement learning algorithms. *Journal of Electrical Systems, 20*(6), 2092–2101.

Xu, W., & Fong, N. H. B. (2025). Apply topological data analysis in football scouting. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7756175/v1

Yakob, R. (2026). Towards a dynamic state-change assessment model of talent development. *International Journal of Sports Science & Coaching, 21*(3), 1403–1417. https://doi.org/10.1177/17479541251364730

Zhao, W. X., Zheng, H., & Zhang, Q. (2025). Modern advances in artificial intelligence across the athletic domain. *Concurrency and Computation: Practice and Experience, 37*(9–11). https://doi.org/10.1002/cpe.70068

Zhi, Y., Zhi, X., & Jiang, Y. (2025). Applications of deep reinforcement learning in smart sports training. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7586675/v1