



Yapay zekâ ve makine öğrenmesi yaklaşımları ile yürüyüş analizi

Gait analysis with artificial intelligence and machine learning approaches

Cemil Yıldız¹, Mehmet Ali Yılmaz², Yasemin Yılmaz³

¹SBÜ Gülhane Tıp Fakültesi, SBÜ TEKMER, Futuracy AŞ, Ankara

²Ankara TEKMER, Metakod Ltd. Şti., Ankara

³Hacettepe Üniversitesi, Hareket ve Antrenman Bilimleri Ana Bilim Dalı, YL Öğr., Ankara

Yürüyüş analizi (YA) bize kas iskelet sistemiyle ilgili akademik veya pratik olarak değerli bilgiler vermektedir. Özel olarak kurgulanmış sentetik laboratuvar koşullarında üç boyutlu (enstrümantal) veya günlük doğal ortamda farklı cihazlar ve yöntemlerle yapılabilmektedir. Son yıllarda sağlık bilgi teknolojilerinde birçok farklı alanda yapay zekâ (YZ) uygulamaları çözümler sunmaktadır. Aşağıdaki derleme makalede YZ ve makine öğrenmesi temelli YA yaklaşımları hakkında güncel literatürleri içeren bilgiler verilecektir. Ayrıca alternatif yöntemlerle karşılaştırmaları yapılarak avantajları, kısıtlılıkları tartışılacak ve günlük pratiğimizde nasıl yer alabileceği hakkında genel bir bakış sunulacaktır.

Anahtar sözcükler: yapay zekâ; makine öğrenmesi; yürüyüş analizi; sensör; görüntü analizi; uygulamalar

Gait analysis (GA) gives us valuable academic or practical information about the musculoskeletal system. It can be performed in three-dimensional (instrumental) or daily natural environment in specially designed synthetic laboratory conditions with different devices and methods. In recent years, artificial intelligence (AI) applications offer solutions in many different fields in health information technologies. In the following review article, information about AI and machine learning based gait analysis approaches will be given including current literature. We will also discuss their advantages and limitations by comparing them with alternative methods and give an overview of how they can be used in our daily practice.

Key words: artificial intelligence; machine learning; gait analysis; sensor; image analysis; applications

Teknoloji dünyasındaki hızlı gelişim süreci yapay zekâ (YZ) uygulamalarının sağlık sektörünün pek çok farklı alanında etkin biçimde kullanılmasını mümkün kılmıştır. Derin öğrenme tekniklerinden biri olan konvolüsyonel (evrimsel) sinir ağları sayesinde insan gücünün analiz kapasitesini aşan büyüklükte veri tabanlarını kısa süre içinde değerlendirmek mümkün olabilmektedir.^[1-3] Kas iskelet, sinir veya sistemik hastalıklar sonucu yürüyüşteki değişikliklerin kişilerin yaşam kalitesini etkilediği durumlarda uzun yıllardan beri kullanılan yürüyüş analizi (YA) özellikle son yıllardaki teknolojik gelişmeler sayesinde patolojilerin ortaya konulmasında, tedavi planlanmasında, rehabilitasyonda, izlemde tanı ve değerlendirmede önemli bir yöntem olarak yer edinmiştir (Tablo 1).^[4-10] Yüksek hızlı bilgisayarlar, gelişmiş sensörler, özel kameralar ve görüntü yakalama teknolojileri sayesinde YA'nın hem akademik hem de klinik pratikte kullanımı yaygınlaşmıştır.^[6,7]

Yürüyüş analizi gözlemsel ya da enstrümantal olarak yapılabilmektedir.^[8,9] Üç boyutlu (3D) enstrümantal YA özel olarak kurgulanmış laboratuvarlarda, video yakalama ve analiz temelli sistemler kullanarak eklem kinematik ve kinetiklerini bilgisayar yardımıyla sayısal olarak hesaplayabilmektedirler.^[10] Bu laboratuvarlarda kompleks yürüyüş verilerinin alınabilmesine rağmen gerek sistemin kuruluş maliyetlerinin yüksek olması gerek işletme giderlerinin pahalı olması ayrıca donanım ve yazılım güncellemelerinin de belli sürelerde ek maliyetler oluşturması sürdürülebilirliklerini ve yaygınlaşmasını oldukça kısıtlamaktadır. Ayrıca işletilmesi sırasında uzman ekip gereksinimi ve istihdamının sağlanması önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Örneğin YA testi sırasında diz eklemine işaretleyicilerin (*tracker*) orijinal merkezden 1 cm olarak farklı konumlandırılması bile gerek eklem açılarında gerek eklem momenti hesaplanmasında farklılıklara yol açar.

İletişim / Contact: Prof. Dr. Cemil Yıldız • E-posta / E-mail: cemilyildiz@icloud.com

ORCID ID: Cemil Yıldız, 0000-0001-7526-6071 • Mehmet Ali Yılmaz, 0009-0004-3941-3985 • Yasemin Yılmaz, 0000-0002-9578-1350

Geliş / Received: 1 Ekim 2023 • **Revizyon / Revised:** 30 Kasım 2023, 14 Aralık 2023 • **Kabul / Accepted:** 16 Aralık 2023

Tablo 1. Yürüyüş analizi (YA)'nin başlıca teknolojik gelişme basamakları^[4-10]

M.Ö. 384	Aristo	Eklem hareketlerinin kas kasılmaları sonucu olduğunu düşünmüş ve yürüyüşteki anormallikleri bir problem gibi düşünerek teorik olarak analiz etmeye başlamıştır.
1836	Eduard ve Wilhelm Weber	Yürüme hızının adım uzunluğu ve tempo üzerindeki etkisini göstermek için kronometre, ölçüm bandı ve teleskop kullanarak modern anlamda YA çalışmalarını başlatmışlardır.
1849-1892	Marey ve Carlet	Ayaktaki kuvvetleri ölçmek için basınç transdüserlerine sahip bir ayakkabı geliştirmişler ve ilk kez yer tepkime kuvvetinin karakteristik M-dalgasını ortaya koymuşlardır.
1861-1917	Otto Fischer	Alman matematikçidir. İlk üç boyutlu YA fikrini geliştirmiştir. Parlayan gaz deşarj tüplerini deneklere takarak karanlık ortamda seri fotoğraflar çekmiş ve bu fotoğraflar üzerinde her ampulün yer değişimini tek tek ölçerek hareketin grafiklerini kaydetmeyi başararak yürüyüşü analiz etmişlerdir. Ancak çok zaman alıcı, hantal olması, dolayısıyla günlük ve klinik uygulamalara uygun olmaması nedeniyle yaygınlaşmamıştır.
1872	Edward Muybridge	Döneminin en başarılı fotoğrafçılarından olan Muybridge Kaliforniya Valisi Leland Stanford tarafından tırıs giden bir atın dört ayağının da yerden kesilip kesilmediği iddiasını karara bağlamak üzere fotoğraf çekmeye çağırılmıştır. Bir dizi özel kamera aracılığıyla çektiği fotoğraflarla atın dört ayağının da aynı anda havada olduğu bir anı belgelemeyi başarmıştır. Daha sonra Pennsylvania Üniversitesi'nde hareket analizi araştırmalarını sürdürmüştür.
1930	Eberhart ve Inman	Fotoğraf makinasının objektifi önünde dönen delikli bir disk kullanarak YA'yı daha ayrıntılı olarak yapmayı başarmışlardır.
1950	Verne Inman ve Jacquelin Perry	Günümüzdeki anlamıyla bilimsel olarak yürüme analizini klinik kullanıma sokmuşlardır. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile klinik kullanıma yönelik yürüme analizi sistemleri geliştirilmiş ve dünyanın birçok ülkesinde kullanıma girmiştir.
1972	David Sutherland John Hagy	Video tabanlı bir yürüyüş ve hareket izleme sistemi geliştirdiler. O zaman uygulama ve veri işleme ile yaklaşık olarak 2,5 saatte yapılan analiz ile en hızlı değerlendirme sistemi olmuştur.

bilecektir. Teknik destek, bakım ihtiyacı ve gerek yazılım gerek donanım olarak sistemin güncellemelerinin yüksek maliyetleri sorun oluşturabilmektedir. İlave olarak YA çıktıları üzerinde değerlendirmeyi ve analizi yaparak karar önerisinde bulunacak uzman bir ekibin yetişmesi ve birlikteliklerinin sağlanması gerekmektedir. Bütün bunların sonucunda artan maliyetlerle periyodik olarak YA testlerinin tekrarlanabilirliğinin kısıtlılığı önemli dezavantaj oluşturmaktadır.^[11]

Son yıllarda hareket teknolojilerinde ve yürüme analizlerinin yorumlanmasında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bilgisayarların işlem kapasitesi ve hızındaki artış, hastalara hantal, ağır cihazlar ve kablolar takılma ihtiyacı olmadan hızlı bir şekilde, maliyet etkin, tekrarlanabilir şekilde yürüyüş ve hareket analizinin yapılabilmesini olanaklı hâle getirmiştir. Ayrıca laboratuvarında yaratılmış sentetik bir ortam olmadan kişilerin günlük yaşamdaki doğal ortamlarında herhangi bir sınırlama ve kısıtlamaların olmadığı koşullarda yürüyüşün izlenmesi ve kantitatif

olarak analiz edilmesi birçok potansiyel avantajlar ve klinik uygulama alanları yaratmaktadır.^[12]

Teknolojideki gelişmelerle YA'da kullanılan sensörler ve görüntü yakalama cihazları daha kolay ulaşılabilir hâle gelmiştir.^[13] Buralardan elde edilen büyük miktarlarda ve kompleks verilerin birbirleriyle olan ilişkileri, birbirine bağımlı birçok parametrelerin işlenmesi ve yorumlanması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Değerlendirmeyi kolaylaştırmak için makine öğreniminin (ML) biyomekanikle entegrasyonu umut verici bir çözüm olarak karşımıza çıkmıştır.^[14] Yapay zekâ teknikleriyle verilerden ve video görüntülerden yürüyüş paternlerini tanımlayacak matematik modellerin ve algoritmaların geliştirilmesi hastalıkların tanısında ve sınıflandırılmasında fayda sağlayacaktır. Yapay zekâ algoritmalarının YA'da kullanımının hâlen bazı kısıtlılıkları olmasına rağmen birçok avantajı nedeniyle pratiğimizde kullanımı giderek artmaktadır (Tablo 2).^[15]

Tablo 2. Yapay zekânın (YZ) yürüyüş analizi (YA)'nde sağladığı avantajlar ve kısıtlılıklar^[15]

Avantajlar	Kısıtlılıklar
Yüksek boyutlu, zamansal ve karmaşık verileri işleyebilirler.	İyi sonuçların elde edilmesi için doğrulanmış, temiz ve güvenilir verilere ihtiyaç duyulur. Ancak iyi, yeni ve bol veriler sayesinde kusursuz kararlar alınabilir.
Çok hızlı ve gerçek zamanlı geri bildirimler sağlanabilir.	İnsanın sahip olduğu hisler ve yaratıcı akıl olmadığından bazı kararlar alınamaz.
Güncel veri tabanlarından otomatik olarak öğrenebilir ve doğru tahminler yapabilir.	Doğru ve güvenilir sonuçlar için sistemin sürekli güncel tutulması gerekmektedir. Bu durum teknolojik bağımlılık oluşturmaktadır.
Sürekli olarak öğrenerek tanı sonuçlarını zaman içinde iyileştirebilir ve hata oranı zaman içinde azalabilir.	Algoritmaların eğitimi için kullanılan veri setlerinde bulunan ön yargılar ve temsil eksiklikleri.

Makine öğrenmesi teknikleriyle büyük verilerin analizi, sağlık sektöründe klinik uygulamalarda özellikle tanı ve karar destek süreçlerinde kullanılmaktadır.^[16] Günlük klinik pratiğimizde hastaların yürüyüş paternlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve değerlendirilmesi için makine öğrenmesi algoritmalarıyla desteklenen YA uygulamaları umut vericidir. Artık teknik olarak daha basit ve düşük maliyetli sistemlerle yürüyüş değerlendirmesi yapılarak bazı hastalıklar için karar destek önerileri ve tedavi etkinliğinin takibi yapılabilmektedir (Şekil 1).^[17]

Yapay zekâ algoritmaları ve bilgisayar görüşü (*computer vision*) kullanarak işaretleyicisiz (*markerless*) görüntü ve hareket yakalama sistemleriyle yürüyüş ve hareket analizi yapılabilmektedir.^[18] Yapay zekâ destekli YA süreçleri sekiz ana basamak hâlinde özetlenebilir (Şekil 2);

1. Kamera ve/veya sensörler aracılığıyla verinin toplanması
2. Ön işleme
3. Nesne algılama
4. Poz tanımlama ve silüet çıkarma - pasif sistem
5. Özellik çıkarma (*pattern recognition*) - aktif sistem
6. Zaman serisi analizi

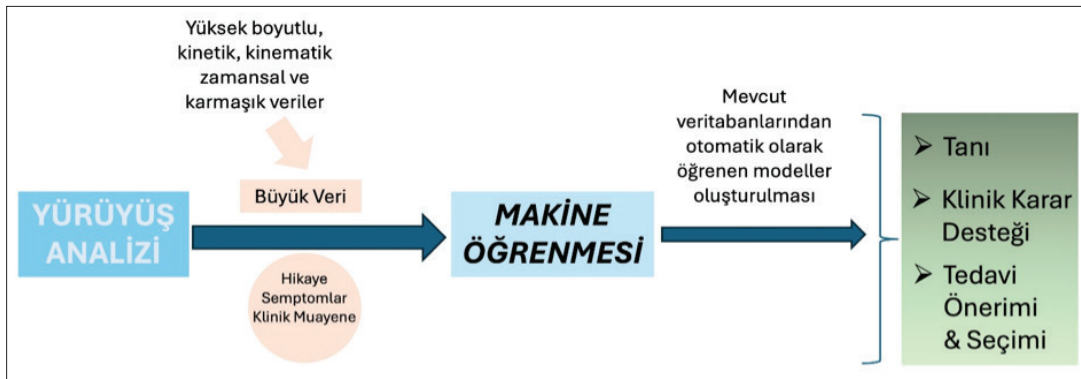
7. Derin öğrenme algoritmalarıyla sınıflandırma
8. Sonuç ve değerlendirme

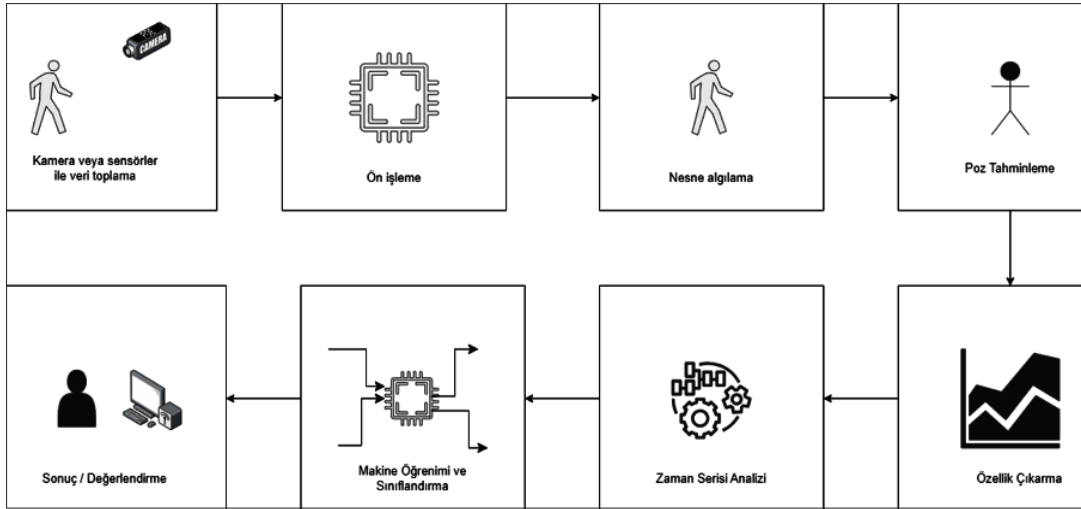
1. Kamera ve/veya Sensörler Aracılığıyla Verinin Toplanması

İlk aşamada kullanılan YA sisteminin özelliğine göre elde edilen veriler kayıt edilir. Verilerin toplanması aşamasında genel olarak dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıdaki gibidir:

A) Kamera ve sensör seçimi: Kamera seçiminde yüksek çözünürlüklü kameralar tercih edilmelidir. Yürüyüş analizi için kullanılan sensörler, genellikle hız, adım uzunluğu, adım sayısı gibi parametreleri ölçebilen ivmeölçerler, jiroskoplar veya basınç sensörleri gibi cihazlardır. Mobil cihazların gelişmesiyle birlikte mobil cihaz kameraları ve sensörlerini kullanan uygulamalar ile çözümler üretilmeye başlanmıştır.

B) Uygun yer seçimi: Kameralar ve sensörler, YA yapılacak alana doğru bir şekilde yerleştirilmelidir. Giyilebilen sensörlerin katılımcı üzerinde doğru bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Kullanılan cihazların doğru konumlandırılması ve kalibre edilmesi gerekmektedir.

**Şekil 1.** Yürüyüş analizi ve makine öğrenmesi.



Şekil 2. Yapay zekâ destekli YA'da işlem basamakları.

C) Veri toplama: İşlem sonucunda büyük veri oluşacaktır. Tercih edilen veri tabanı bu verilerin depolanmasına ve analizine uygun veri madenciliğinde kullanılan veri tabanları (*MongoDB, Cassandra, HBase* vb.) arasından seçilmelidir.

2. Ön İşleme

Bu aşamada elde edilen video kayıtları, bilgisayar görüşü (*computer vision*) algoritmaları tarafından analiz edilebilir hâle getirilir. Gereksiz bilgilerin filtrelenmesi, verilerin düzenlenmesi, kontrast artırma, renk düzeltme ve görüntü boyutunu düzenleme gibi ön işleme adımları gerçekleştirilir.

3. Nesne Algılama

Nesne algılama algoritmaları, görüntü içindeki nesnelere tespit etmek için kullanılır. Bu işlem genellikle derin öğrenme (*Deep Learning, DL*) temelli modelleri içeren algoritmalar ile yapılır. Yaygın olarak kullanılan nesne algılama algoritmaları arasında *You Only Look Once (YOLO)*, *Region-based Convolutional Neural Network (Faster R-CNN)* ve *Single Shot Multibox Detector (SSD)* gibi modeller bulunmaktadır. Görüntü üzerindeki belirli bölgeler tespit edilir ve bu bölgelerde etiketleme yapılır. Örneğin, bir insanın tespiti durumunda, algılama algoritması insanın olduğu bölgeyi belirler ve bu bölgeyi insan olarak etiketler. Eğer YA süreci, bir kişinin hareketini izlemeyi içeriyorsa, nesne takibi basamağı sürece dâhil edilir ve belirlenen nesnelere hareketi takip edilerek zaman içindeki konumları belirlenir.

4. Poz Tanımlama ve Silüet Çıkarma-Pasif Sistem

İşaretleyici kullanmadan kamera ile yakalanan görüntüler kompleks algoritmalar kullanılarak bilgisayar görüşüyle yürüyüşü tahmin etmeye ve tanıtmaya çalışan yeni

sistemlerdir. Laboratuvar ortamı olmadan doğal ortamda ölçümlerin yapılabilmesi en önemli avantajlarıdır.

Poz tanımlama adımı, bir kişinin beden duruşunu, konumunu ve genel pozisyonunu belirlemeyi içerir. Bu adımda, bir kişinin duruşunu tanımlayan önemli noktalar tespit edilir. Örneğin, baş, omuzlar, dirsekler, kalça ve ayaklar gibi. Bu adım sonrasında kişinin vücudundaki belirli noktaları belirlemek için anahtar nokta algılama algoritmaları kullanılır. Bu noktalar genellikle eklem ve önemli anatomik yapıları temsil eder. Algılanan anahtar noktalar, kişinin beden duruşunu tanımlayan bir vektör veya dizi oluşturmak için kullanılır.

Bazı durumlarda, özel poz tahminleme (*pose estimation*) modelleri kullanılabilir. Bu modeller ile bir kişinin vücut yapısının daha ayrıntılı bir şekilde tahmini yapılır. Derin öğrenme teknikleri kullanarak eğitilen bu modeller, özellikle karmaşık duruşları ve vücut konfigürasyonlarını daha iyi ele alabilir.

Silüet çıkarma, bir kişinin bedeninin dış çizgilerini belirleme sürecidir. Bu adımda, kişinin vücut yapısının genel hatları çizilir ve geri kalan arka plan silinir. Bu, kişinin fiziksel özelliklerini daha belirgin hâle getirerek, YA için gerekli ve bir sonraki adım olan özellik çıkarmaya yardımcı olur.

5. Özellik Çıkarma (*Pattern recognition*)-Aktif Sistem

Poz tanımlama ve silüet çıkarma adımları sonucunda YA için önemli olan adım uzunluğu, adım simetrisi, yürüyüş hızı, adım sayısı gibi özellikler tespit edilir. İşaretleyicileri kullanmadan görüntüler kamera tarafından yakalanıp stereoskopik projeksiyonları kullanarak aralık görüntüleme, derinlik algısıyla referans paternleri karşılaştırarak basit, düşük maliyetle yürüyüş hakkında anlık ve devamlı bilgiler verilebilmektedir. Bu sistemlerin dezavantajı görüntü yakalama için belirli ışık koşullarına ve ortamlara ihtiyaç duyulmasıdır.

Tablo 3. Yeni teknolojileri ve yapay zekâ (YZ) destekli uygulamalarını içeren yürüyüş analizi (YA) sınıflandırması^[20-22]

Sınıflandırma	Örnek Teknoloji
1. Yürüyüş aktivitesi tespiti	İvmeölçer
2. Yürüyüş olayı tespiti	Makine öğrenmesi
3. Yürüme bozukluğu/anormalliği tespiti 3.1 Patoloji nedenli 3.2 Yaşlanma nedenli	İnersiyal ölçme ünitesi (IMU)
4. Yürüyüş asimetrisi tespiti	Yer reaksiyon kuvvetini ölçen iç taban sistemleri
5. Yürüyüşte nörolojik nedenli değişiklikler	Hareket yakalama teknolojisi/sistemleri

6. Zaman Serisi Analizi

Katılımcının yürüme modeli zaman içinde nasıl değişiyor, hangi aşamalarda belirli özelliklerde değişiklikler meydana geliyor gibi sorulara cevap aranır. Belirli bir zaman aralığı içindeki trendleri, desenleri ve değişiklikleri belirlemek için kullanılır. Bu analizlerde, hareketli ortalama, hızlı Fourier dönüşümü, (FFT) otomatik regresyon entegrasyon hareketli ortalama (ARIMA) gibi istatistiksel ve matematiksel yöntemler kullanılır. Belirli bir kişinin yürüyüşünde olası anormallikleri veya belirgin desenleri tespit etmeye yönelik olarak kullanılır. Örneğin, bir kişinin yavaşlaması, beklenmedik bir duraklama, düzensiz adımlar gibi durumlar analiz edilebilir.

7. Derin Öğrenme Algoritmaları ile Sınıflandırma

Elde edilen özellik vektörleri, makine öğrenimi modelleri kullanılarak sınıflandırılır. Bu modeller, sağlıklı yürüyüşü anlamak için eğitilir ve test verilerinde bireyin yürüme durumu sınıflandırılır (normal, düzensiz, patolojik vs.).

8. Sonuç ve Değerlendirme

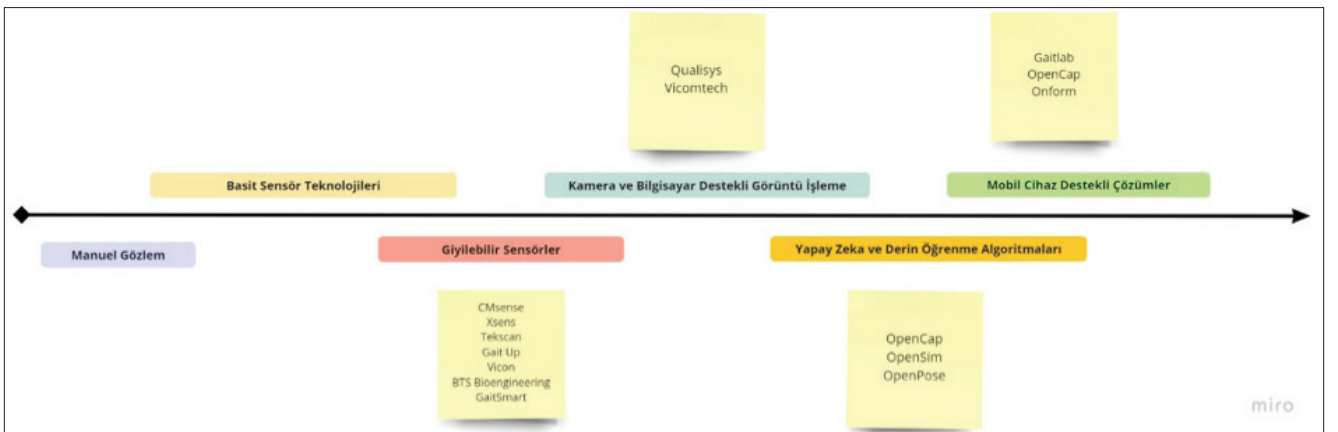
Elde edilen sonuçlar yorumlanır ve katılımcının YA değerlendirilir. Bu aşamada, herhangi bir sağlık durumu, yaralanma veya biyomekanik anormalliği tespit etmek mümkündür.

Bu işlemler sonucunda aynı zamanda modelin doğruluğu ve performansı değerlendirilebilir. Modelin, YA'da sınıflandırma görevini yerine getirme başarısı incelenir. Modelin performansını arttırmak için hiperparametre ayarlamaları veya modelin tekrar eğitilmesi gibi düzenlemeler yapılabilmektedir.^[19]

YÜRÜYÜŞ ANALİZİNDE KULLANILAN YENİ TEKNOLOJİLER VE UYGULAMA ALANLARI

Yürüyüş analizinde kullanılan yeni teknolojiler, daha etkin değerlendirme ve takip için önemli avantajlar sunmaktadır. Yeni teknolojiler sayesinde yürüme paternlerini kaydedebilmek için yüksek hızlı kameralar, mobil cihazlar ve gelişmiş sensörler kullanıma girmiştir (Tablo 3).^[20-22] Gerek sentetik laboratuvar ortamlarında gerek doğal yaşam koşullarında kayıt altına alınabilen büyük verilerin çözülmesi ve değerlendirilmesi için YZ yazılımları çözüm olarak ortaya çıkmıştır.^[20-22]

Yürüyüş değerlendirmesinde zaman içinde kullanılan teknolojilerin değişimiyle birlikte YZ destekli geliştirilen uygulamalar son yıllarda artış göstermiştir (Şekil 3, Tablo 4).

**Şekil 3.** Yeni teknolojilerin YA'da kullanımı; şematik görünüm.

Tablo 4. Yürüyüş ve hareket değerlendirmesinde kullanılan veri toplama şekilleri ve yapay zekâ (YZ) algoritmalarına göre son yıllarda yapılan bazı çalışmalar.^[23-32]

Makale	Yapay Zekâ Algoritması (Bildirilen en iyi doğruluk)	Veri Toplama Şekli	Görev
Russell ve ark. (2021) ^[23]	CNN (%97,8)	Göğüs çevresine ivmeölçer takılır, konum takibi için GPS saati kullanılır.	Tanımlanabilen Aktiviteler: Tırmanma/Yatma/Oturma/Yürüme/Koşma. Ortama bağlı yorgunluk belirlenir.
Baghdadi ve ark. (2021) ^[24]	DTW ile MHTSCA	Sağ ayak bileğine inersiyal ölçme ünitesi (IMU) takılır.	Zamana bağlı oluşan yorgunluğun tespiti yapılır.
Maghded ve ark. (2020) ^[25]	CNN/RNN	Akıllı telefonun kamerasından görüntü ve videolar elde edilir ve sensörleri kullanılır.	Kovid-19'a bağlı yorgunluğun tespiti yapılır.
Taborri ve ark. (2021) ^[26]	Linear SVM (%96)	İnersiyal ölçme ünitesi (IMU) ve optoelektronik çubuklar kullanılır.	<i>Landing error scoring system</i> /yere iniş hata puanlama (LESS) skoru ile kadın basketbol oyuncularında ÖÇB risk tahmini yapılır.
Guo ve Wang, (2021) ^[27]	TS-DBN	KTH ve UCF videolarının genel veri setleri kullanılır.	Aktivite tanıma/sportif davranışı tanıma yapılır.
Kang ve ark. (2018) ^[28]	FFT	Akıllı telefonlar	Telefonun nasıl taşındığından bağımsız olarak yürüyüşün algılanması ve adımların sayılması yapılır.
Chang ve ark. (2021) ^[29]	<i>OpenPose</i> ile HMM	İki adet kamera	Düşme riski tahmin edilir. Yürüyüşteki denge bozukluğu (imbalsans) değerlendirilir.
Shioiri ve ark. (2021) ^[30]	SVM, %79 CNN, %73	Mikro-Doppler radar	Düşme riski ile ilişkili yürüyüş farklılıklarının sınıflandırılması yapılır.
Chelli ve Pätzold, (2019) ^[31]	ANN, KNN, QSVM, EBT, (%97,7) Düşüş tahmini: %100 Yanlış tahmin: 0	Giyilebilir sensörler	Günlük yaşam aktivitelerini tanıma ve düşme riski tespiti yapılır.
Sandhu ve ark. (2021) ^[32]	RF	El bileğine takılan güneş pili	İnsan aktiviteleri tanınır.

*CNN, MHTSCA RNN, SVM, TS-DBN, FFT, HMM, ANN, KNN, QSVM, EBT, RF, DTW ifadeleri algoritmaların özel isimidir.

CNN: *Convolutional neural networks*, MHTSCA: *Multivariate hierarchical time series clustering algorithm*, RNN: *Recurrent neural network*, SVM: *Support vector machines*, TS-DBN: *Time-space deep belief network*, FFT: *Fast Fourier transform*, HMM: *Hidden Markov model*, ANN: *Artificial neural network*, KNN: *K-nearest neighbors*, QSVM: *Quadratic SVM*, EBT: *Ensemble bagged tree*, RF: *Random forest*, DTW: *Detecting fatigue from*.

*Tablo hazırlanırken *A Survey of Human Gait-Based Artificial Intelligence Applications* isimli makaleden faydalanılmıştır.^[33]

SONUÇ

Günümüzde YA, pratik, ucuz ve doğal ortamda günlük giyilebilir cihazlarla yapılan yöntemlerden karmaşık, pahalı ve sentetik laboratuvar ortamlarında yapılan enstrümantal üç boyutlu analiz uygulamalarına kadar farklılıklar göstermektedir (Tablo 5).^[8-10,12,33]

Sensör teknolojileri ve makine öğrenmesi gibi YZ teknikleri kullanarak hızlı, doğru, gerçek zamanlı (anlık)

ve sürekli, ortamdaki bağımsız, ekonomik olarak yürüyüş bozukluklarının tanı ve sınıflandırmalarının pratik kullanımını giderek artmaktadır. Çeşitli YZ modelleri kullanılarak bireylerin günlük yaşamdaki hareketlerinin doğru biçimde analiz edilmesi tanı, tedavi ve takip süreci ile rehabilitasyonda zaman, mekan ve maliyet avantajıyla sağlık hizmetinin kalite ve verimliliğini arttıracaktır.

Tablo 5. Gözlemsel, enstrümantal ve yapay zekâ (YZ) destekli yürüyüş analizi (YA) yöntemlerinin karşılaştırılması^[8-10,12,33]

	Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar
Gözlemsel YA	Bir uzman ya da gözlemci tarafından yürüyüş çıplak gözle izlenerek oluşturulan formlar üzerinde değerlendirme ve skorlamalar yapılır.	Hızlı, özel laboratuvar ortamı gerektirmeyen düşük maliyetli tekrarlanabilir bir YA yöntemidir.	Subjektiftir. Yürüyüş analiz sonuçları gözlemcinin deneyimine bağlıdır. Yürüyüşün tüm komponentleri çıplak gözle aynı anda değerlendirilemeyeceğinden doğruluğu kısıtlıdır.
Enstrümantal YA	Özel olarak hazırlanan laboratuvar ortamında kişilerin yürüyüşleri farklı teknolojiler (video kayıt ve analizi, üç boyutlu kinematik, elektromiyografi, kinetik vb.) kullanılarak analiz edilir.	Objektiftir. Sayısal çıktılar ve grafikler elde edilir. Bilgisayarlı ve üç boyutlu yürüme analizi sistemleri yürüyüş kinematiği ve kinetiği ile ilgili yürüyüşün her anına ait sayısal veriler sağlar. Akademik çalışmalar için farklı faydalar sunar. Uzun yıllardır bu alanda çalışan firmalar kompleks biyomekanik analiz sistemleri çeşitlilik sunar.	Yürüyüş analiz laboratuvarının kurulması önemli miktarda sermaye yatırımı ve alanında uzmanlaşmış eğitimli personel gerektirir. Sentetik bir ortamda özel personel gerektirerek kayıtların alınması, günlük pratikte ve rutin klinik kullanımında kolay erişilebilir ve tekrarlanabilirliğini kısıtlamaktadır. Ayrıca yüksek maliyet ve teknoloji değişimde güncelleme önemli bir sorundur.
Yapay Zekâ Destekli YA	Yapay zekâ algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilir.	Derin öğrenme becerisi sayesinde daha karmaşık modelleri anlama ve tanı koyma becerisine sahiptir. Makine ve derin öğrenimi teknikleriyle büyük veri setlerinden hızlı ve objektif sonuçlar elde edilebilir. Katılımcının gerçek zamanlı ve sürekli takibi yapılabilir. Algoritmanın öğrenebilme yetisi sayesinde kolay uyarlanabilir. Gelişmeye açıktır.	Verilen eğitimin kalitesi algoritmanın başarısını etkileyebilir. Daha doğru sonuçlar için büyük veri setlerine gereksinim olabilir.

KAYNAKLAR

1. Yıldız C, Özsezen AM. Konvolüsyonel sinir ağlarının total kalça artroplasisinde kullanımı. TOTBİD Dergisi 2022; 21: 95-10. [Crossref](#)
2. Yıldız C, Ersönmez H, Şahin S, Arı M, Özsezen AM, Sanal HT. Yapay zekâ yöntemlerinden derin öğrenme ile intertrokanterik femur kırıklarının tanısı. Kemik Eklem Cerrahisi Derneği Kongresi; 13-16 Ekim 2021.
3. Özsezen AM, Yıldız C. Yapay zekâ ve derin öğrenme teknolojileri ile kalça eklemi radyografilerinde femoral komponentin tanınması. 30. Ulusal Ortopedi ve Travmatoloji Kongresi; 9-13 Kasım 2021.
4. Baker R. The history of gait analysis before the advent of modern computers. Gait Posture 2007;26(3):331-42. [Crossref](#)
5. Kirkup J. Wilhelm Weber and Eduard Weber, Mechanics of the human walking apparatus, Berlin and New York, Springer-Verlag, 1992.
6. Zago M, Kleiner AFR, Federolf PA. Editorial: Machine learning approaches to human movement analysis. Front Bioeng Biotechnol 2021;8:638793. [Crossref](#)
7. Mobbs RJ, Perring J, Raj SM, Maharaj M, Yoong NKM, Sy LW, et al. Gait metrics analysis utilizing single-point inertial measurement units: A systematic review. Mhealth 2022;8:9. [Crossref](#)
8. Krebs DE, Edelstein JE, Fishman S. Reliability of observational gait analysis. Physical Therapy 1985;65(7):1027-33. [Crossref](#)
9. Wren TAL, Tucker CA, Rethlefsen SA, Gorton GE 3rd, Öunpuu S. Clinical efficacy of instrumented gait analysis: Systematic review 2020 update. Gait Posture 2020;80:274-9. [Crossref](#)
10. Carse B, Meadows B, Bowers R, Rowe P. Affordable clinical gait analysis: An assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3D motion analysis system. Physiotherapy 2013;99(4):347-51. [Crossref](#)

11. Uhlrich SD, Falisse A, Kidziński Ł, Muccini J, Ko M, Chaudhari AS, et al. OpenCap: Human movement dynamics from smartphone videos. *PLoS Comput Biol* 2023;19(10):e1011462. **Crossref**
12. Saboor A, Kask T, Kuusik A, Alam MM, Le Moullec Y, Niazi IK, et al. Latest research trends in gait analysis using wearable sensors and machine learning: A systematic review. *IEEE Access* 2016;4:1-35.
13. Gouwanda D, Senanayake SMNA. Emerging trends of body-mounted sensors in sports and human gait analysis. In 4th Kuala Lumpur International Conference on Biomedical Engineering , BIOMED 2008 Kuala Lumpur, Malaysia Springer Berlin Heidelberg. 2008:715-8. **Crossref**
14. Boyd, JE, Little JJ. Biometric gait recognition. In *Advanced Studies in Biometrics: Summer School on Biometrics*, Alghero, Italy, June 2-6, 2003. Revised Selected Lectures and Papers Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2005:19-42.
15. Abiodun OI, Kiru MU, Jantan A, Omolara AE, Dada KV, Umar A. M. comprehensive review of artificial neural network applications to pattern recognition. *IEEE Access* 2019;7:158820-46. **Crossref**
16. Mc Kinsey. Erişim adresi: <https://www.mckinsey.com/industries/healthcare/our-insights/transforming-healthcare-with-ai>.
17. Katmah R, Al Shehhi A, Jelinek, HF, Hulleck AA, Khalaf, K. A systematic review of gait analysis in the context of multimodal sensing fusion and ai. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2023. **Crossref**
18. André, J, Lopes J, Palermo M, Gonçalves D, Matias A, Pereira F, et al. Markerless gait analysis vision system for real-time gait monitoring. In 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC) IEEE, Nisan 2020:269-74. **Crossref**
19. Probst P, Boulesteix AL, Bischl B. Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *JMLR* 2019;20(1):1934-65.
20. Klöpfer-Krämer I, Brand A, Wackerle H, Müßig J, Kröger I, Augat P. Gait analysis - Available platforms for outcome assessment. *Injury* 2020;51Suppl2:S90-S96. **Crossref**
21. Zhang Y, Ma Y. Application of supervised machine learning algorithms in the classification of sagittal gait patterns of cerebral palsy children with spastic diplegia. *Comput Biol Med* 2019;106:33-9. **Crossref**
22. Márquez, JS, Atri R, Siddiquee MR, Leung C, Bai O. A mobile, smart gait assessment system for asymmetry detection using machine learning-based classification. *J Biomed Eng Med Devic* 2018;3(1):135. **Crossref**
23. Russell B, McDaid A, Toscano W, Hume P. Moving the lab into the mountains: A pilot study of human activity recognition in unstructured environments. *Sensors (Basel)* 2021;21(2):654. **Crossref**
24. Baghdadi A, Megahed FM, Esfahani ET, Cavuoto LA. A Machine learning approach to detect changes in gait parameters following a fatiguing occupational task. *Ergonomics* 2018;61:1116-29. **Crossref**
25. Maghded HS, Ghafoor KZ, Sadiq AS, Curran K, Rawat, DB, Rabie K. A novel ai-enabled framework to diagnose coronavirus covid-19 using smartphone embedded sensors: Design study. in 2020 IEEE 21st International Conference on Information Reuse and Integration for Data Science (IRI) Las Vegas, NV, USA: IEEE 2020;180-7. **Crossref**
26. Taborri J, Molinaro L, Santospagnuolo A, Vetrano M, Vulpiani MC, Rossi S. A machine-learning approach to measure the anterior cruciate ligament injury risk in female basketball players. *Sensors (Basel)* 2021;21:3141. **Crossref**
27. Guo Y, Wang X. Applying TS-DBN model into sports behavior recognition with deep learning approach. *J Supercomput* 2021;77:12192-208. **Crossref**
28. Kang X, Huang B, Qi GA. Novel walking detection and step counting algorithm using unconstrained smartphones. *Sensors (Basel)* 2018;18:297. **Crossref**
29. Chang WJ, Chen LB, Su JP, Chen MC, Yang, TC. A fall risk prediction system based on 3d space human skeleton torso images. in 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2021;1-2. **Crossref**
30. Shioiri K, Saho K, Fujimoto M, Kobayashi Y. Radar-based gait classification of elderly non-fallers and multiple fallers using machine learning. in 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), 2021;399-400. **Crossref**
31. Chelli A, Patzold M. A machine learning approach for fall detection and daily living activity recognition. *IEEE Access* 2019;7:38670-87. **Crossref**
32. Sandhu MM, Khalifa S, Geissdoerfer K, Jurdak R, Portmann M. SolAR: energy positive human activity recognition using solar cells. in 2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2021;1-10. **Crossref**
33. Harris EJ, Khoo IH, Demircan E. A survey of human gait-based artificial intelligence applications. *Front Robot AI* 2022;8:749274. **Crossref**