

Rehabilitasyon Hizmetlerinde Yapay Zekâ Uygulamaları

Artificial Intelligence Applications in Rehabilitation Services

Betül Akalın¹ , Mehmet Beşir Demirbaş² 



ÖZ

Teknoloji dünyası hızlı bir gelişim süreci içerisinde. Bu süreçte birçok alana uyarlanan teknoloji ve beraberinde getirdiği yapay zekâ özellikle sağlık alanında oldukça kullanışlı hale gelmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışma, sağlığın bir alt dalı olan rehabilitasyon hizmetlerinde yaşanan teknolojik gelişmeler ile yapay zekanın hasta ve sağlık profesyonellerine ne gibi yararlar sağladığına sağlık yönetimi bakışıyla odaklanmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda rehabilitasyon sürecinde yapay zekâ kullanımının yönetim açısından zamansal, mekânsal ve maddi birçok yarar sağlamanın yanı sıra sağlık hizmetlerinde kalite ve verimliliği artırdığı görülmüştür. Bununla beraber, yapay zekâ uygulamaları hastalara evde rehabilitasyon imkânı sunarak bireyi sosyal hayata adapte etmekte de etkilidir. Rehabilitasyon hizmetlerinde yapay zekâ kullanımı ile sağlık hizmet sunucusu ve hasta için tedavinin zaman, yoğunluk, devamlılık, hız gibi değişkenlerin esnek bir biçimde yapılandırılmasının sağlanması, güvenilir ve geçerli kullanıcı algılama donanımı ile objektif veri katkısı, gerçek zamanlı geribildirim sağlanması, gerçek yaşam simülasyonu ile aktivite edilmiş eğitim kolaylığı sunması ve rehabilitasyon sürecinde hasta ile fizyoterapistin olası tükenmişliğini azaltması mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, Rehabilitasyonda yapay zekâ, Yapay zekâ uygulamaları

ABSTRACT

The world of technology is in a rapid development process. In this process, technology has adapted to many areas, and the artificial intelligence it brings with it has become particularly useful in the field of health. The study focuses on technological developments in rehabilitation services, which are a subbranch of health, and on the health management perspective of how AI benefits patients and health professionals. The study found that the use of artificial intelligence in the rehabilitation process has provided many benefits in terms of management, temporal, spatial and material, as well as improved quality and efficiency in health care. However, artificial intelligence practices are also effective in adapting the individual to social life by providing home rehabilitation to patients. The use of artificial intelligence in rehabilitation services will provide flexible structuring of variables such as time, intensity, continuity and speed of treatment for the healthcare provider and the patient, objective data contribution with reliable and valid user detection hardware, real-time feedback, and real-life simulation. It will be possible to provide ease of education and reduce the possible burnout of the patient and physiotherapist during the rehabilitation process.

Keywords: Artificial intelligence, Artificial intelligence in rehabilitation, Artificial intelligence applications

¹(Dr. Öğretim üyesi) Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

²(Doktora öğrencisi) Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

ORCID: B.A. 0000-0003-0402-2461;
M.B.D. 0000-0002-5137-0496

Corresponding author:

Mehmet Beşir DEMİRBAŞ
Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
E-mail address: mehmet_besir94@hotmail.com

Submitted: 05.02.2022

Revision Requested: 05.05.2022

Last Revision Received: 16.08.2022

Accepted: 18.08.2022

Published Online: 05.09.2022

Citation: Akalın, B. & Demirbas, MB. (2022). Rehabilitasyon hizmetlerinde yapay zekâ uygulamaları, 6(2), 141-161.
<https://doi.org/10.26650/acin.1068576>

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışıyla birlikte yaşlılık, kazalar, hastalıklar ve savaşlar gibi sebeplerden dolayı rehabilitasyon hizmetlerine duyulan ihtiyaç giderek daha çok önem kazanmıştır (Akdemir & Akkuş, 2006). Küresel olarak, yaklaşık 2,4 milyar insan şu anda rehabilitasyon hizmetlerinden faydalanarak yaşamına devam ederken gelecekte bu sayının artacağı tahmin edilmektedir. Dünya çapında nüfusun sağlığında ve özelliklerinde meydana gelen değişikliklerle birlikte, bu tahmini rehabilitasyon ihtiyacının önümüzdeki yıllarda artacağı öngörülmektedir (Cieza et al., 2020). Rehabilitasyon sürecinde uzuvların işler hale gelmesi ve kuvvet kazanmaları adına terapötik egzersizler son derece önemlidir. Bununla beraber teknoloji de son derece hızlı bir şekilde ilerlemekte ve sağlık sektöründe bu ilerlemeye paralel olarak birçok gelişme yaşanmaktadır (Akdemir & Akkuş, 2006).

Gelişen teknolojinin sağlık alanında daha aktif rol oynadığı son yıllarda, bireylerin hareket kabiliyetleri, sınırlılıkları ile günlük yaşama dair aktivitelerinin doğru bir şekilde analiz edilerek tedavi edilmesine yönelik keşifler sağlık profesyonellerine önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Rehabilitasyon alanında yapay zekâ kullanımı, klinik karar verme sürecinde hastalık ve tedavinin etki seviyesinin ölçümüne büyük katkı sağlayacak verilerin toplanması noktasında önemli avantajlar sunmaktadır. Bu kapsamda toplanan verilerin insan sinir ağlarına benzer bir formatta yorumlanması, bilgi üretmesi, analiz yapması ve kendi kendine bu bilgileri organize edebilme yeteneği ‘yapay zekâ’ olarak adlandırılabilir (Hazar, 2020; Poole et al., 1998).

Yapay zekâ sağlığın birçok alanında kullanıldığı gibi rehabilitasyonun hizmetlerinde tanı, tedavi ve sınıflandırma aşamalarında da kullanılmaktadır (Russell & Norvig, 2010). Özellikle de insan-bilgisayar etkileşiminin olduğu her yerde kullanılması mümkündür (Nicolas & Gil, 2012). Rehabilitasyonda yapay zekâ, simbiyotik nöroprotezler ile miyoelektrik kontrol, beyin bilgisayar arayüz teknolojisi, perioperatif tıp ve daha birçok alanda kullanılmaktadır (Anderson, 2019; Pokorny et al., 2013; Sanchez et al., 2009; van Dokkum et al., 2015). Özellikle hasta veri ölçümü ve klinik karar verme desteği gibi durumların makine öğrenmesi yöntemleriyle gündelik yaşamda kullanılabilir olması çok değerlidir. Yapay zekâ destekli sistemler, klinik değerlendirme alanlarından; denge, yürüme, günlük yaşam aktiviteleri ile alt ve üst ekstremitelerdeki becerileri gibi olguların etkilerini arttırabilmek amacıyla geliştirilmektedir. Bu kapsamda, hastaya ait çıktılar değerlendirilerek rehabilitasyon uygulamalarının gelişim düzeyi, klinik ilerleme tahmini ve devamlılık takibi mümkün olmaktadır (Köse, 2018).

Yapay zekâ temelli teknolojilerin rehabilitasyon hizmetlerinde kullanımı; kişinin düzeyine ve yeteneklerine göre uyarlanabilir olması, sağlık profesyoneli ve hasta için tedavinin zaman, yoğunluk, yaşanabilecek güçlükler gibi değişkenlerin sürekli yapılandırılmasının sağlanması, güvenilir ve geçerli kullanıcı algılama donanımı ile gerçek veri sağlanması, eş zamanlı geribildirim sağlanması, gerçek yaşam simülasyonu ile aktivite eğitim kolaylığı sunması ve rehabilitasyon sürecinde hasta ile terapistin olası tükenmişliğini azaltması gibi avantajlar sağlamaktadır (Tarakçı, 2021). Araştırma, rehabilitasyon hizmetlerinde yapay zekâ uygulamalarının kullanımı ile birlikte hangi teknolojilerin hayatımıza girdiği, ne amaçlarla kullanıldığı bununla beraber hasta ve sağlık profesyonellerine hangi noktalarda yarar sağladığına ilişkin incelemeyi içermektedir.

2. YAPAY ZEKÂ (Artificial Intelligence)

Zekâ, insanlara özgü olduğu düşünülen, akıl yürütme, kavramlar arası bağlantı kurma, algılama ve sonuca varabilme yeteneklerinin tümü olarak tanımlanmaktadır (TDK, 2021). Buna karşılık yapay zekâ ise insana özgü olduğuna inanılan bu özelliklerin makinelerle kazandırılması olarak tanımlanabilir (Yiğit, 2011).

Yapay zekâ her ne kadar tanımı ve işleyişi itibarı ile mühendislik alanının bir yan dalı olarak düşünülse de multidisipliner olarak psikoloji, felsefe, dil bilim ve nöroloji gibi birçok alanı da kapsamaktadır. Bunun sebebi bu disiplinlerin yapay zekânın bilişsel yapısını oluşturmalarıdır. Bu dallar yapay zekânın karakterini oluşturmak açısından oldukça değerlidir. Bu disiplinler ile olan ilişkisi yapay zekâyı diğer bilgisayar bilimi dallarından farklı bir yere taşımaktadır. Bu durum yapay zekânın formüle edilmemiş farklı durumlarla baş edebilmesi anlamına gelmektedir (Poole et al., 1998). Bu kapsamda yapay zekânın sağlık alanında kullanımının mümkün olduğu görülmüş ve birçok çalışma yapılmıştır. Yapay zekâ teknolojisi genel hatlarıyla makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleriyle tanınmaktadır.

2.1. Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi, genel anlamda bilgisayar sistemlerinin daha önce yaşanmış bir olay hakkında öğrendiklerini veya öğretilenleri ileride benzer bir olayda tekrar kullanabilecek kabiliyette olması olarak tanımlanabilir. Bu öğrenme tekniğinde, örneklerle birlikte bir öğreticinin varlığından da söz edilebilir. Öğrenme algoritmasını veri kaynakları, giriş bilgileri ve sonuçlar oluşturmaktadır. Makine öğreniminde arayüz, önceki olaylardan yola çıkılarak genelleme yapar. Bu kapsamda makine öğrenimi sistemi içinde eğitim kümelerinden oluşan veri setleri mevcuttur. Bu veri setleri örnek gözlem kodları ve bunların okunmasını sağlayan bir takım formlardan oluşmaktadır (Akgöbek & Çakır, 2009). Makine öğrenimi algoritmaları her biri farklı amaçlar için tasarlanan 4 kategoriye ayrılmıştır. Bunlar; denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme, kümeleme (sınıflandırma) ve regresyon öğrenmedir (Anderson, 2019).

2.2. Derin Öğrenme

Derin öğrenme, birden çok işleme katmanından oluşan hesaplama modellerinin, birden çok soyutlama düzeyiyle verilerin temsillerini öğrenmesine olanak tanır (Krizhevsky et al., 2012; Szegedy et al., 2015). Bu yöntemler, konuşma tanıma, görsel nesne tanıma, nesne algılama, ilaç keşfi ve genomik gibi diğer birçok alanda en son teknolojiyi önemli ölçüde geliştirmiştir (Helmstaedter et al., 2013). Derin öğrenme, bir makinenin önceki katmandaki temsilden her katmandaki temsili hesaplamak için kullanılan dâhili parametrelerini nasıl değiştirmesi gerektiğini belirtmek için geri yayılım algoritmasını kullanarak büyük veri kümelerinde karmaşık yapıyı keşfeder. Derin kıvrımlı ağlar görüntü, video, konuşma ve ses işlemede çığır açarken, tekrarlayan ağlar metin ve konuşma gibi sıralı verilere ışık tutmaktadır (Lecun et al., 2015).

Derin öğrenme teknikleri kullanılarak, sensörler aracılığı ile robotik uzuvların üretimi ile alakalı çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin giyilebilir el teknolojisi adı verilen protezlerin üretiminde yapay sinir ağları, sensörler ve derin öğrenme teknikleri kullanılmaktadır. Bu protez eller nesnelere kavrayabilmek amacıyla evrimsel sinir ağlarını (CNN) kullanmaktadır (Degol et al., 2016; Tang et al., 2016). Bu durum derin öğrenme tekniğinin sağlık hizmetlerinde birçok alanda kullanımına olanak tanırken özellikle rehabilitasyon hizmetlerinde kullanımı değerlendirilebilir.

Toplumlar her çağda sağlık hizmetlerinin geliştirilmesi, uzun yaşamın sırrı ve hastalıklardan korunmak istemişlerdir. Bu kapsamda her çağın kendi dinamikleri içerisinde o çağın imkanları kullanılarak sağlık hizmetlerine aktarılmıştır. Günümüzde ise bilgi toplumu ve süper akıllı toplum olarak adlandırılan çağlar yaşanmaktadır. Teknolojinin ve yapay zekanın hâkim olmaya başladığı bu çağda sağlık hizmetlerinin de teknoloji ile beraber farklı bir çağa doğru gittiği söylenebilir. Toplum 5.0 olarak adlandırılan günümüz teknolojisinin rehabilitasyon hizmetlerine de etkisi kaçınılmaz olacaktır.

3. SAĞLIKTA TOPLUM 5.0 KAVRAMI

Eski çağlardan bu yana toplum her zaman insan yaşamının merkezi olarak kabul edilmiştir. İnsan toplumunun evrimi her zaman, problem çözmek için yeni araçlar ve teknikler açısından özgürlük arayışı ve becerilerin geliştirilmesi yönünde ilerleme göstermiştir. Bu çerçevede Şekil 1, zaman içerisinde toplumda yaşanan ilerleme ve gelişimi göstermektedir. Toplum 1.0, avcı-toplayıcı bir toplum olarak tanımlanırken sulama tekniklerinin gelişmesi ile Toplum 2.0 yani tarım toplumunun ortaya çıkması sağlanmıştır. Sanayi devrimi, seri üretim ve buharlı lokomotifin icadı ile endüstriyel toplum olarak adlandırılan Toplum 3.0 ortaya konmuştur. Bilgisayarların icadı, verilerin dağıtımını yoluyla kullanımına yol açan etkisiyle beraber bilgi ve iletişim teknolojisinin uygulanması, Toplum 4.0 bilgi toplumunun ortaya çıkmasına neden olmuştur (Fukuyama, 2018). Tüm bu aşamaların bir sonucu olarak, fiziksel ve siber alanı entegre etmeyi ve sürdürülebilir yaşam için kısıtlamasız bir ortam yaratmayı planlayan, teknoloji odaklı, süper akıllı bir toplum olan Toplum 5.0'ın ortaya çıkması kaçınılmaz olmuştur (Ferreira & Serpa, 2018).



Şekil 1. Toplumsal Gelişim Süreçleri

Kaynak: (Kansal et al., 2021).

Toplum 5.0, gerçek ve sanal dünyanın birliğinin teknolojiler aracılığıyla gerçekleştirildiği modern, geleceğe yönelik ve insan merkezli bir toplum fikridir. Bu anlayışa göre toplumun amacı, refah ve sosyal zorlukların üstesinden gelmek böylece küresel toplumun refahına katkıda bulunarak eş zamanlı ekonomik büyüme ile birlikte, bölge, yaş, cinsiyet, dil farkı gözetmeksizin her zaman ve yerde herkese hizmet sunabileceği bir gerçeklik yaratmaktır (Vall, 2019).

Etkili bir sağlık sistemi kurmak ve sürdürmek, yaşlanan toplum, insanların sürekli hareketliliği ve yeni tıp teknolojilerinin maliyet yoğunluğu gibi durumlardan dolayı oldukça zordur. Bu sorunlar, finansal araçların etkin dağılımını sağlayacak ve bilgi akışını iyileştirecek ve böylece Toplum 5.0'da tüm sağlık sisteminin işleyişi üzerinde kontrol sağlayacak yenilikçi çözümlerin uygulanması için yeni yolların aranması gerektiği sonucuna yol açmaktadır (Jopkiewicz & Jopkiewicz, 2021).

4. REHABİLİTASYON HİZMETLERİ VE YAPAY ZEKÂ

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin işleyen süreçlerinden ilham alan verilerin analizi için uyarlanabilir modellerdir (Helmstaedter et al., 2013). YSA, insan beyninin öğrenme kanallarını taklit ederek, insana ait özellikler olan öğrenme, eski bilgiyi geri çağırma ve bilgiler arası bağlantılar kurarak çıkarımlarda bulunmayı kullanarak toplanan verilerden yeni datalar üreten bilgisayar yazılımları olarak tanımlanabilir (Öztürk & Şahin, 2018). Bir fonksiyon amacı ile ilgili olarak iç yapılarını değiştirebilen ve özellikle beklenmedik tipteki problemleri çözmek için uygun olan, belirli bir hedefle ilgili temel sorunu tanımlayan (spesifik tanı, sonuç vb.) veri setini ortaya koyan yaklaşık kuralları yeniden oluşturabilen sistemlerdir (Lecun et al., 2015). Kayıt altında tutulan verilerde eksiklikler olduğunda da çalışabilmeleri, örnek verilerden model oluşturarak görülmemiş örnekler ile ilgili bilgi üretebilmeleri, sınıflandırma yapabilmeleri ve kendi kendilerini organize edebilen sistemler olmaları sebebiyle özellikle son yıllarda rehabilitasyon alanında da kullanımları giderek artmaktadır (Grossi, 2011).

Yapay sinir ağları ile beraber rehabilitasyon alanında beklenmedik birçok problemin çözümü daha kolay hale gelmiştir. Bu yapay sinir ağları sayesinde kliniklerde yapılacak uygulamaları daha uygun maliyetlerle hayata geçirebilmek mümkün olmuştur. Bu amaçla rehabilitasyon alanında özellikle diagnostik, tahmin etme, sınıflandırma, problem çözme ve robotik kontrol sistemlerinin üretilmesi ve akıllı sistemlerin geliştirilmesi için kullanıldıkları görülmektedir (Ghwanmeh et al., 2013). Yapay sinir ağları sıklıkla; inme, spinal kord yaralanması, Parkinson, multiple sklerozis ve polinöropati türlerinde yürüme bozukluklarının sınıflandırılmasında, denge sorunlarının belirlenmesinde, bireylerin fizyoterapi ve rehabilitasyon sonrası fonksiyonel sonuçlarının tahmininde ve kognitif problemlerin belirlenmesinde değerlendirilmektedir (Moon et al., 2020).

Denge, yürüme, fonksiyonel olma düzeyi, günlük rutin aktivitelere katılma düzeyi ve elin özel olarak kullanımı gibi beceriler için yapay zekâ geleneksel tedavilerin dışına çıkarak fayda sağlamayı vadetmektedir. Tedavi sürecinde hastanın ileride hangi düzeye gelebileceğinin tahmin edilebilmesi de klinik karar süreçleri bakımından büyük fayda sağlamaktadır (Kara, 2019). Son yıllarda bu alanda yapılmış çalışmalarla birlikte özel olarak rehabilitasyon sürecindeki hastaların tedaviye katılımını arttırmayı amaçlayan oyun ve rehabilitasyonun birlikteliğinin mümkün olduğu görülmektedir. Gerçek hayata katılım amacıyla sunulan artırılmış gerçeklik uygulamaları (VR) ve robotik sistemleri hastaya olduğu kadar uygulayıcı olan hekimlerin de işini kolaylaştırmaktadır (Krebs et al., 2007). Bu alana yönelik akıllı telefon uygulamalarının kullanımı da gerek hekimler gerek hastalar tarafından gün geçtikçe daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Yapay zekâ temelli uygulamalar ile beraber hasta takip ve tedavilerini desteklerken hekim de klinik değerlendirme noktasında kendine fayda sağlamaktadır (Tarakci, 2015).

İçinde birçok sensörü barındıran yapay zekâ ile donatılmış giyilebilir sistemler rehabilitasyon alanında özellikle araştırma geliştirme faaliyetlerinde sık sık kullanılmaktadır. Bu faaliyetler ham veri elde etmenin yanı sıra karar verme, hedef oluşturma

ve rehabilitasyonda tedavi yolu belirleme açısından avantaj sağlamaktadır. Bununla beraber giyilebilir teknolojilerin yapılarının diğer sistemlere kıyasla daha esnek ve kullanılabilir olması nörolojik hastaların kullanımını kolaylaştırmaktadır. Yapay zeka donanımlı giyilebilir teknolojiler ile birlikte mekan yetersizliği yaşanan rehabilitasyon üniteleri mekandan tasarruf etme noktasında oldukça fayda sağlamaktadırlar (Kara et al., 2020).

Tüm bu çalışmaların yanı sıra üzerinde çalışılan bir diğer alan ise akıllı çevre sistemleridir. Geliştirilen yapay zekâ uygulamaları ile beraber, rehabilitasyon hastalarının özellikle de yaşlı hastaların evlerinden tanı koyma ve takibinin yapılması gibi amaçları, farklı disiplinleri kullanarak gerçekleştirmektedir. Ortam destekli yaşam adı verilen bu sistemler ise şunları içermektedir (Geman et al., 2015);

- İnsanların özerkliklerini artırarak tercih ettikleri çevrede yaşayabilecekleri sürenin uzatılması
- Özgüven ve hareketlilik
- Yaşlı ve/veya engelli kişilerin sağlık ve işlevsel kapasitesinin artırılması
- Yaşlanan toplumlarda kullanılan kaynakların verimliliğini ve üretkenliğini arttırmayı içermektedir.

5. YAPAY ZEKÂ TEMELLİ AKILLI REHABİLİTASYON TEKNİKLERİ

Rehabilitasyonda yapay zekâ, simbiyotik nöroprotezler ile miyoelektrik kontrol, beyin bilgisayar arayüz teknolojisi, perioperatif tıp ve daha birçok alanda kullanılmaktadır (Anderson, 2019; Pokorny et al., 2013; Sanchez et al., 2009; van Dokkum et al., 2015). Özellikle hasta veri ölçümü ve klinik karar verme desteği gibi durumların makine öğrenmesi yöntemleriyle gündelik yaşamda kullanılabilir olması çok değerlidir. Yapay zekâ destekli sistemler, klinik değerlendirme alanlarından; denge, yürüme, günlük yaşam aktiviteleri ile alt ve üst ekstremitte becerileri gibi olguların etkilerini arttırabilmek amacıyla geliştirilmektedir. Bu kapsamda, hastaya ait çıktılar değerlendirilerek rehabilitasyon uygulamalarının gelişim düzeyi, klinik ilerleme tahmini ve devamlılık takibi mümkün olmaktadır (Köse, 2018).

Yapay zekâ temelli rehabilitasyonda teknoloji uygulamalarının avantajları; bireyin seviyesine ve yeteneklerine uygun dizayn edilebilir olması, terapist ve hasta için tedavinin süre, yoğunluk, zorluk, hız gibi parametrelerinin esnek olarak yapılandırılmasının sağlanması, güvenilir ve geçerli kullanıcı algılama donanımı ile objektif veri sağlanması, gerçek zamanlı geribildirim sağlanması, gerçek yaşam simülasyonu ile aktivite eğitim kolaylığı sunması ve rehabilitasyonun sürecinde hasta ve terapistin olası tükenmişliğini azaltmasıdır (Tarakçı, 2021).

Bu kapsamda Şekil 2'de 7 farklı yapay zeka temelli akıllı rehabilitasyon uygulamasından söz etmek mümkündür (Tarakçı, 2021).



Şekil 2. Yapay Zekâ Temelli Akıllı Rehabilitasyon Kullanım Alanları

Kronik hastalık yönetimi, hasta izleme tavsiyesi ve durum değerlendirmesi gerektirir. Bu, kronik hastalık yönetimi için daha iyi hizmetler yaratması ve sağlaması beklenen diğer mobil bilgi işlem ve sensör teknolojileriyle birlikte AI yöntemlerini keşfetmeye yönelik uygulama alanlarından biridir. Örneğin, diyabette, kan şekeri izleme, yaşam tarzı önerileri ve kendi kendini yönetme için AI yöntemleri kullanılmaktadır. Diyabet için bilgisayarlı karar destek sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler, diyet, egzersiz, ilaç kullanımı ve kan şekeri seviyeleri hakkındaki bilgileri kaydederek hastalık sonuçlarını izlemekte böylece hasta takibini mümkün kılmaktadır (Fernandez-Llatas & García-Gómez, 2014; Fico et al., 2016).

Klinik bir perspektiften, AI, uzman radyologlar tarafından yapılan analizlerle ön çapraz bağ yırtıklarını saptamak için kullanılmıştır (F. Liu et al., 2019). AI, menüsküs yırtıklarının teşhisinde olumlu sonuçlar gösterirken derin öğrenme teknolojisi sayesinde ayrıca akut ve kronik kırıklı lezyonların değerlendirilmesi mümkün olmuştur (Liu et al., 2018; Roblot et al., 2019). AI ayrıca kırıkları sınıflandırmak için kullanılmıştır. Kalça kırığı sınıflandırma doğruluğu %93,7, femur kırığı sınıflandırma doğruluğu %86, proksimal humerus kırığı sınıflandırma doğruluğu %65-86 ile diz çevresi ve ayak bileği kırıklarını sınıflandırmada başarılı performans gösteren birçok algoritma vardır (Chung et al., 2018; Krogue et al., 2020; Lind et al., 2021; Olczak et al., 2020; Tanzi et al., 2020).

AI, hasta bakımında gelişim ve sağlık bakım maliyetlerinde azalma potansiyeli sunmaktadır. Artan nüfusun sağlık hizmetlerine olan talebi teşvik etmesi beklenmektedir. Sağlık sektörü, aşırı harcama yapmadan nasıl daha etkili ve verimli olunacağını bulmak adına yenilikçi çözümlere ihtiyaç duymaktadır (Pee et al., 2019). Çözümler için teknolojinin geldiği son gelişmelerin merkezinde yapay zekâ teknolojisi yer almaktadır. Teknolojideki, özellikle yapay zeka ve robotik alanlarındaki hızlı gelişmeler, sağlık sektörünün tamamlanmasına yardımcı olmaktadır (Sunarti et al., 2021). Bu kapsamda AI, erken tanı ve teşhis için oldukça kullanışlıdır (Ardan et al., 2020).

Tüm bu avantajlarının yanında sağlık hizmetlerinde yapay zekâ teknolojisi kullanımına ilişkin çekinceler de mevcuttur. Sistem hatalarından dolayı hastaların yaralanması riski, yapay zekadan veri elde etme ve sonuçlar çıkarmada hasta mahremiyeti riski de dahil olmak üzere bazı riskler AI kullanımında endişe edilen bazı sorunlardır (Sunarti et al., 2021). Çalışmanın bu

kısımdan sonrası yapay zekâ, IOT tabanlı teknolojiler, derin öğrenme ve makine öğrenmesi tekniklerinin rehabilitasyon hizmetlerinde kullanımına ilişkin örnekler ile kullanım alanlarına yönelik bulgularla devam etmektedir.

5.1. Robot Yardımlı Terapi

Robot yardımlı terapi, yüksek oranda tekrarlayan, yoğun, uyarlanabilir ve ölçülebilir fiziksel eğitim sağlayan yenilikçi bir rehabilitasyon şeklidir. Özellikle üst ekstremitte paralizinden mustarip felçten kurtulanlarda motor fonksiyon kaybını düzeltmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır (Duret et al., 2019). Yoğunluk, etkili bir inme sonrası motor rehabilitasyon programında önemli bir bileşendir. Çok sayıda klinik çalışma, motor performansındaki önemli değişikliklerin yoğun uygulamalardan kaynaklandığını göstermiştir (Kwakkel et al., 2004; Nicolas & Gil, 2012; Page et al., 2012).

Robot yardımlı terapi, tekrarlayan rehabilitasyon hareketlerinin ihtiyacını karşılamak için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşımla robotik cihazlar, bir terapi seansı içinde uygulanan tekrar düzeyinin kolayca ölçülmesini sağlamaktadırlar. Bazı robotların kullanımı, robot destekli terapinin daha yüksek tekrarının, daha düşük tekrar düzeyine kıyasla motor sonuçları iyileştirdiğini göstermiştir (Burgar et al., 2011; Duret et al., 2019; Hsieh et al., 2011).

Robotik terapi, deney paradigmasını uygun şekilde kontrol etmemize ve çevresel koşulların felçten sonra motor performansı üzerindeki etkisini değerlendirmemize olanak tanır (Krebs et al., 2007). Günümüzde yapılan son araştırmalar, hareketli bir taban platform üzerinde akıllı robot uygulamaları kullanarak (Şekil 3) daha sık antrenman yapımına imkân sağlayan robotik platformların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu kapsamda üretilen Stewart Platformu; ayak bileği, diz ve eklemleri hareketlendirmek sağlığına kavuşturmak veya rehabilite etmek amacıyla kullanılmaktadır (Budaklı & Yılmaz, 2021; Joe et al., 2021; Kim et al., 2019; X. Liu & Wiersma, 2019; Yang et al., 2015).



Şekil 3. Alt Ekstremitte İçin Rehabilitasyon Robotu

Kaynak: (Budaklı & Yılmaz, 2021)

Omurilik yaralanmasını takiben üst ekstremitelerin nöro-rehabilitasyonu için şu anda kullanılan bir dizi farklı robotik cihaz vardır. Bu cihazlar tipik olarak omuz ve dirseği veya bilek ve parmakları hedeflemektedir. Cihazlar, dış iskeletler veya robotik uç efektörler olarak kategorize edilebilir. Dış iskeletler, hedeflenen eklem(ler)in eklemlesmesini destekleyen ve hizalanan cihazlarken robotik uç efektörler, kullanıcıların uzuvlarının distal kısmında basitçe temasa geçmektedir (Mekki et al., 2018; Pehlivan et al., 2014; Vanmulken et al., 2015). Bu robot türlerinin her ikisi de, fonksiyonel iyileşmeyi destekleyen ve potansiyel olarak uyarlanabilir plastisiteyi kolaylaştırabilen yüksek hacimli yüksek kaliteli hareket tekrarları sağlamak için kullanılabilir (Edgerton & Roy, 2009; Kadivar et al., 2011). Her ikisi de terapistin yükünü ve bakım maliyetini azaltma yeteneğine sahiptir (Mekki et al., 2018; Riener, 2012).

İnme sonrası hastaların rehabilitasyonunu geliştirmek için kas-kas arayüzüne sahip yeni bir robotik sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen robotik rehabilitasyon sistemi, hastalara evreye uygun fiziksel rehabilitasyon egzersizi ve kas stimülasyonu sağlamak için tasarlanmıştır. Geleneksel bimanuel robotik terapilerin pozisyon bazlı kontrolünün aksine, geliştirilen yeni sistem ile paretik uzuvdaki eklem hareketlerinin yanı sıra hedef kasların aktiviteleri de uyarılmaktadır. Robot

yardımlı hareket ve paretik taraf kaslarındaki elektriksel uyarı, paretik ve etkilenmemiş taraflar arasındaki hareket ve kas aktivitelerinin online karşılaştırılmasıyla kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen bu sistem ile rehabilitasyon egzersizi, hastanın inme sonrası motor toparlanma aşamasına bağlı olarak özelleştirilebilir ve modüle edilebilir (Bong et al., 2020; Lo et al., 2017).

Serebral palsi (SP), erken gelişimdeki ilerleyici olmayan nörolojik beyin bozukluğuna bağlı bir motor fonksiyon bozukluğudur (Baxter et al., 2007). Spastik SP'li birçok çocuk, günlük yaşamda yürümelerini engelleyen yürüme güçlüklerine sahiptir. Örneğin, SP'li çocukların çoğu, sendeleme veya çömelme yürüyüşü gibi anormal yürüyüş şekilleri ile yürür (Rodda & Graham, 2001). Bu anormal yürüyüş şekilleri ikincil bozukluklara ve düşük yaşam kalitesine yol açabilir (Sullivan & Barnes, 2007). Bu kapsamda yürüyüş sırasında kalça fleksiyonuna ve her iki uzvun ekstansiyonuna yardımcı olan mobil bir dış iskelet tipi robot Honda Walking Assist (HWA) geliştirilmiştir. Yapılan araştırmalar HWA kullanan hastaların uzun süreli kullanımda yürüyüş fonksiyonlarında önemli düzeylerde iyileşme sağlandığını göstermektedir (Jayaraman et al., 2019; Kawasaki et al., 2020; Tanaka et al., 2019).

Yapılan çalışmalar incelendiğinde robot destekli terapiler sağlık profesyonellerine daha kısa sürelerde daha fazla hastaya bakma imkânı sunduğu görülmektedir. Bu durum zamansal açıdan avantaj sağlarken ekonomik olarak daha fazla kazanç sağlamayı da desteklemektedir.

5.2. Beyin Bilgisayar Arayüzleri

Yakın zamana kadar, kişinin çevresini zihin gücüyle kontrol edebilme hayali bilim kurgu teması gibi görünmekteydi. Ancak, teknolojinin ilerlemesi yeni bir gerçekliği ortaya çıkarmıştır: Günümüzde insanlar, çevreleriyle iletişim kurmak, etkilemek veya değiştirmek için beyin aktivitelerinden gelen elektrik sinyallerini kullanabilmektedir. Gelişmekte olan beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) teknolojisi alanı, konuşamayan veya uzuvlarını istediği gibi kullanamayan hastaların, yardımcı cihazlar aracılığı ile nesnelere hareket ettirmesi ya da çalıştırmasına olanak tanımaktadır (Shih et al., 2012). Kısaca bir BCI, beyin sinyallerini alan, analiz eden ve istenen bir eylemi gerçekleştirmek için bir çıkış cihazına iletilen komutlara çeviren bilgisayar tabanlı bir sistemdir (Kübler & Birbaumer, 2008; Nicolas & Gil, 2012; Shih et al., 2012).

Beyin hastalıkları (Örneğin, İnme ve Amyotrofik Lateral Skleroz (ALS)) olan hastalar genellikle kas zayıflığına neden olan motor korteks hasarından etkilenir. Bu nedenle semptomların ilk evrelerinde bu hastalıklar hafifletilebildiği için sürekli fizyoterapi ile rehabilitasyona ihtiyaç duyarlar. Bu kapsamda beyin bilgisayar arayüzleri medikal uygulamalarda yol tutması, sigara ve alkolü önleme amaçlı, tümörler, beyin ve uyku hastalıklarını teşhis aşamasında; beyin felci, sakatlık ya da fizyolojik rahatsızlıkların rehabilitasyonunda kullanılabilir (Büyükgöze, 2021). Son yıllarda gelişen teknoloji ile beraber bu ihtiyaçlara yanıt verilebilmesi adına beyin bilgisayar arayüzleri çalışmaları artmıştır (Jumphoo et al., 2021).

Beden ve beyni yeniden bağlamak için, BCI sistemleri üç ana bileşen kullanır, bunlar; beyinden kayıt yapan ama aynı zamanda beyni uyaran nöral arayüzler, sinyal işleme ve hareketi uyandıran bununla birlikte duyuşal girdiyi iletebilen kod çözme algoritmaları ve efektörlerdir. Nöral arayüzler ve efektör cihazlar, giyilebilir, invaziv olmayan bileşenlerden uzun süreli kullanım için cerrahi olarak implante edilen cihazlara kadar invazivlik açısından değişebilmektedir (M. Bockbrader, 2019). Örneğin, üst ekstremité hareketiyle ilişkili elektriksel beyin sinyalleri, kafa derisi elektroensefalografisi (EEG), kafatası veya deri altına yerleştirilen yarı invaziv elektrokortikografik (ECoG) diziler veya intrakortikal implante edilmiş mikroelektrot dizileri (MEA) aracılığıyla invaziv olmayan bir şekilde tespit edilebilmektedir (Ajiboye et al., 2017; Branco et al., 2017; Müller-Putz et al., 2017; Soekadar et al., 2016; Thomas et al., 2019).

Klasik olarak EEG tabanlı motor BCI sistemleri, hareket durumları (açık-kapalı, yanal kavrama) arasında geçiş yapmak veya bir hareket sırasındaki adımlar arasında geçiş yapmak için bir anahtar olarak kullanılan EEG sinyalleri ile kavrama ortezini kontrol etmek için kullanılmıştır. Hibrit EEG-BCI sistemleri, örneğin eklem konum sensörleri veya binoküler göz izleme cihazları gibi diğer biyolojik sinyalleri dâhil ederek çok eklemli cihazları kontrol etme özelliği göstermiştir (Kreilinger et al., 2013; Onose et al., 2012).

Yeni çalışmalarda ise beyin bilgisayar arayüzleri fonksiyonel elektrik stimülasyonu (FES) ile eşleştirilerek hareketlerin istemli kontrolü sağlanabilir. FES klinik olarak kasları güçlendirmek, spastisiteyi azaltmak, felcin iyileşmesine yardım etmek

gibi amaçlarla kullanılmaktadır. BCI ile birleştirildiğinde FES uyarıları kullanıcı kontrolüne geçer; bu da öğrenme mekanizmalarını güçlendirebilir. Hareket oluşturuca mekanizma olarak FES her hasta için uygun değildir (Friedenberg et al., 2018; Pool et al., 2016). Örneğin, alt motor nöron hastalığı veya periferik sinir hasarı tarafından denervasyona (Bir organ veya oluşuma ait sinirin kesilmesi) uğrayan kas, tipik olarak FES'e yanıt veremez. Ek olarak, duyuusal hiperestezisi olan bazı kişiler, kas kasılmasına neden olan yoğunluktaki elektriksel uyarıyı tolere edemeyebilir. Bu durumlarda, etkilenen uzvun hareketi dış iskeletler veya robotlar aracılığıyla daha iyi sağlanabilir. Hedeflenen terapötik etkinin, örneğin ağrı durumlarını hafifletmek veya duyuusal bağımlı plastisiteyi devreye sokmak için, etkilenen uzuv hareket ettirmenin öznel deneyimi olduğu, amputasyon veya somatosensasyon kaybı durumlarında, sanal gerçeklik (VR) daha iyi son efektör olabilir (Bockbrader et al., 2018).

Yeni teknikler ile rehabilitasyon ve BCI ilişkisi geliştirilmektedir. Bu kapsamda Robot destekli motor görüntü (MI) ve beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) sistemi, inme sonrası rehabilitasyonda motor fonksiyon iyileşmesini hızlandırmak için gelişmiş yeni bir teknik olarak kullanılmaktadır. Motor görüntü, fiziksel uygulama olmaksızın hareketlerin hayal edilmesini sağlamak ve elektroensefalografi tabanlı beyin-bilgisayar arayüzleri (EEG-BCI'ler) beyin sinyallerini kullanarak çevre ile etkileşime olanak tanımaktadır. Beyin-bilgisayar arayüzü destekli motor görüntü (MI-BCI) sistemi, robot destekli MI ve BCI'yi birleştirerek, felçli hastaların robotik bir kol tarafından yönlendirilen engelli uzuvları, kolun motor görüntüsünden gelen nöral sinyaller yoluyla hareket ettirmesini sağlar ve çoklu duyuusal geri bildirim sağlamaktadır (Ang & Guan, 2015; Foong et al., 2020; Hu et al., 2021; Wang et al., 2019).

Kalp pilleri, koklear implantlar, elektroensefalogramlar (EEG'ler) ve elektromiyogramlar (EMG) gibi geleneksel biyoelektronik teknolojiler 50 yılı aşkın bir süredir kliniklerde yer alırken, nöropsikiyatrik tedavilerin, elektrosötiklerin ve kapalı döngü sistemlerinin gelişimi sadece son on yılda kliniklerde yer almaktadır (Portillo-Lara et al., 2021). Bu ilerlemeler, AB İnsan Beyin Projesi, ABD BRAIN girişimi, NIH SPARC girişimi gibi hükümet girişimleri ile NeuroLink ve Galvani Bioelectronics gibi yeni ticari girişimler de dâhil olmak üzere dünya çapında büyük fonlar tarafından desteklenmektedir (Mathieson et al., 2021; Society, 2019). Bu durum; epilepsi, depresyon, bağışıklık koşulları, titreme bozuklukları, körlük ve omurilik yaralanmalarını kapsayan bir dizi durumun tedavisi için onaylanmış, tıbbi olarak düzenlenmiş biyoelektronik terapilere yol açmıştır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin, sağlıklı insanlara yerleştirildiğinde gelişmiş biliş, gece görüşü ve diğer gelişmiş algı gibi olağanüstü yetenekler elde etmek için kullanılabileceği de öne sürülmektedir (Antonio Regalado, 2021; Green, 2021).

Beyin bilgisayar arayüzleri özellikle felçli bireylerin hayata entegrasyonunu kolaylaştıran, kişisel bazı ihtiyaçların karşılanmasını sağlayan ve gelecekte daha da gelişmesi muhtemel önemli bir teknolojidir.

5.3. Ortez ve Protez Teknolojileri

Ortez veya protez cihazlar gibi yardımcı teknolojiler yüzyıllardır varlığını sürdürmektedir. Ortez cihazları sadece immobilizasyon, destek, düzeltme veya koruma sağlamak için değil, aynı zamanda kas-iskelet sistemi yaralanmaları veya işlev bozukluklarını tedavi etmek için de yaygın olarak kullanılmaktadır (Muriel et al., 2020). 1970'li yıllarda, renkli kauçuk esaslı plastik film uygulanarak daha çekici bir görünüme sahip ortez cihazların talebi nedeniyle plastik kaplama gibi yeni teknikler geliştirilmiştir. 1980'lerin başında, popüler olarak 3D baskı teknolojileri olarak bilinen katmanlı üretim teknolojilerinin keşfinde kullanılan fotopolimer reçinenin ultraviyole lazerle ince tabakalar halinde kürlenmesine dayanan stereolitografi tekniği tanıtılmıştır. Bu gelişme ilerleyen yıllarda; 3D modeller, birikim modelleme (FDM), lamine nesne üretimi (LOM), seçici lazer sinterleme (SLS), 3D baskı ve değişken hızlı prototipleme (Polyjet Teknolojisi) gibi diğer katmanlı üretim teknolojilerinin üretilmesine sebep olmuştur (Bacek et al., 2017; Hausdorff, 2005; Lou et al., 2005; Tonet et al., 2008).

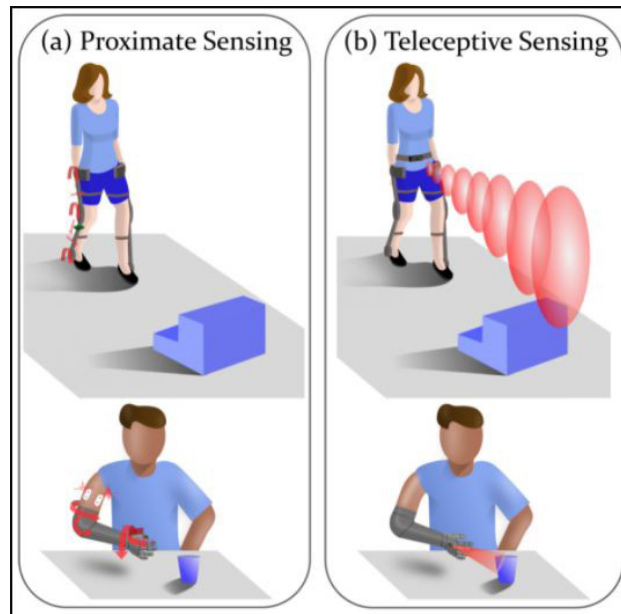
Katmanlı üretim teknolojileri, işleme süreci olmadan doğrudan üç boyutlu bir modelden tamamen işlevsel parçalar üreten hızlı prototipleme teknikleri (RPT) alanına dâhil edilmiştir. Son yıllarda RPT'nin katlanarak büyümesi nedeniyle ortez cihazlarının üretiminde birtakım değişiklikler meydana gelmiştir (Jiang et al., 2017). Biyomedikal mühendisliği bağlamında, hastanın anatomik özelliklerine uygun şekilde adapte olabilen kişiselleştirilmiş cihazlara duyulan ihtiyaç nedeniyle alanda hızlı bir ilerleşme yaşanmıştır (Singh & Ramakrishna, 2017; Thompson et al., 2016). Bu durum 3D yazıcılar yardımıyla

kişiselleştirilmiş tıp kapsamında hastaya özel ortezler üretilmesini sağlamıştır (Singh & Ramakrishna, 2017; Thompson et al., 2016).

Son yıllarda, fiziksel tıp ve rehabilitasyon alanı, fiziksel engelli bireylerin hareketliliğini, işlevini ve yaşam kalitesini iyileştirmek için tasarlanmış giyilebilir robotik cihazların çoğalmasında birçok çalışma gerçekleştirmiştir. Bu giyilebilir robotlar, amputasyonlu bireyler için güçlendirilmiş protez kol ve bacakları (Hasson et al., 2008) ayrıca parezi, felç ve diğer bozuklukları olan bireyler için güçlendirilmiş dış iskeletleri ve ortezleri içermektedir. Her bir yardımcı veya rehabilite edici robot sınıfının sayısız prototipi olmasına karşın, bu tür cihazlar henüz laboratuvar dışında yaygın olarak kullanılmamaktadır. Giyilebilir teknolojilerin laboratuvardan kliniğe ve dış dünyaya çevrilmesi, bu cihazları kullanmanın artan maliyeti ile kullanımlarındaki zorlukların yanı sıra yeterli dayanıklılık düzeyine erişememiş olmaları, sınırlı işlevsellik ve zayıf kontrol dâhil olmak üzere çeşitli faktörlerle sınırlıdır (Novak & Riener, 2015).

Telesepsiyon, uzaktan veya algılanan nesne ile fiziksel temas kurulmadan gerçekleşen algılama olarak tanımlanabilir (Nowakowski, 2017). Bazı hayvanlar çevreleri ve nesnelere iletişim kurabilmek için bu telesepsiyon yöntemlerini kullanmaktadırlar. Örneğin bir yarasa bu duyularını kullanarak yönünü bulurken elektrikli balık düşmanlarını bu duyuları sayesinde algılayabilmektedir. İnsanların da tıpkı hayvanlar gibi tatma, dokunma ve benzeri duyularına ek olarak görme, işitme ve koku da dâhil olmak üzere birçok teleseptif duyusu vardır. Bu kapsamda yapılacak veya yapılmış giyilebilir ortez-protez cihazları bu teleseptif duyuları örnek olarak çalışabilir. Etkili kontrol sistemlerinin hem yakın hem de teleseptif sensörleri içermesi ortamın durumunu ve nesnenin hareketinin doğruluğunu arttırmış olacaktır (Krausz & Hargrove, 2019).

Protezlerin ve dış iskeletlerin kontrolüne teleseptif algılamanın eklenmesi (Şekil 4'de) robotik ve yardımcı teknoloji arasındaki boşluğu kapatabilir ve kullanıcıların cihazlarıyla nasıl etkileşime girdiğini ve kontrolü bir robotla en iyi şekilde nasıl paylaşabileceklerini keşfetmeye olanak tanıyabilir. Bu nedenle, yardımcı ve rehabilitasyon cihazlarındaki telesepsiyon eksikliğini gidermek için yapılan çalışmalar artmıştır (Krausz & Hargrove, 2019).



Şekil 4. Teleseptif Sensör Uygulaması

Kaynak: (Krausz & Hargrove, 2019)

Şekil 4'de (a) Yakın Algılama veya (b) Teleseptif Algılama kullanan Giyilebilir Yardımcı Cihazlar. Her algılama türü için, bu sensör tipini kullanan bir alt ekstremite ortezinin (altta) ve bir üst ekstremite protezinin (üstte) çizimi gösterilmektedir. Yakın algılama, Elektromiyogram (EMG) sensörleri, yük hücreleri, motorlardaki kodlayıcılar veya potansiyometreler veya IMU'lar (çoklu sensör kartı) gibi bireyin veya yardımcı cihazın davranışını doğrudan ölçen herhangi bir sensörü içermektedir. Teleseptif algılama, RGB kamera (Red (kırmızı), Green (yeşil), Blue (mavi) renklerinden oluşmuş, bir renk sistemidir), Kızılötesi (IR)

sensör, Ultrasonik sensör veya Radar gibi kullanıcı dışındaki şeylerin ortamını veya davranışını dolaylı olarak ölçen herhangi bir sensörü içermektedir (Krausz & Hargrove, 2019).

Avusturya'da yapılan bir çalışmada (Şekil 5) pratiklik ve performans arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurarak bazı gereksinimleri ele almışlardır. Bu gereksinimlerden kasıt, parmak tasarımlarında membranla çevrili bükülme bağlantılarını içeren yumuşak malzemelerin monolitik 3D baskısından yararlanılarak elde edilmesidir. Önerilen el protezinde sinerji tabanlı başparmak hareketi ve kablo tahrikli çalıştırma sistemidir. X-Limb adı verilen bu ürün günlük yaşam aktiviteleri için gereken kavrama görevini yerine getirme kapasitesini değerlendirmek için Üst Ekstremité Amputelerinde standart bir Aktivite Ölçümü kıyaslama testi yapılmıştır. Sonuçlar, tüm pratik tasarım gereksinimlerinin karşılandığını göstermiştir (Mohammadi et al., 2020).



Şekil 5. Çok Eklemlili Yeteneklere Sahip Pratik Bir 3D Baskılı Yumuşak Robotik Protez El

Kaynak: (Mohammadi et al., 2020)

Ortez ve protez teknolojisindeki gelişmeler yapay zekâ ile birleştirildiğinde ortaya kişinin dokusuna ayak uydurabilen, kişinin fizyolojik yapısına uygun protezlerin çıkmasını sağlayacaktır. Amerikan filmlerine konu olan biyonik insanların aslında pek de uzak bir gelecekte olmadıkları, biyonik el ve ayakların günümüzde de üretilebildiği bilinmektedir. Bu kapsamda sağlık bilimleri açısından ortez ve protez ihtiyacı duyan hastanın kaliteli bir hayat sürmesi, sosyal hayata adaptasyonu ve öz güven açısından bu teknolojilerin kullanımı oldukça değerlidir.

5.4. Telerehabilitasyon Teknolojileri

Telesağlık, uzun mesafeli klinik sağlık hizmetlerini, hasta ve profesyonel sağlıkla ilgili eğitimi, halk sağlığı ve sağlık yönetimini desteklemek için elektronik bilgi ve telekomünikasyon teknolojilerinin kullanılmasıdır (Dorsey & Topol, 2016). Telefonlar, akıllı telefonlar ve mobil kablosuz cihazlar dâhil olmak üzere çeşitli telekomünikasyon araçları aracılığıyla video bağlantısı olsun veya olmasın sağlık hizmetlerinin uzaktan sağlanması olarak tanımlanabilir. Telerehabilitasyon (TR) nispeten yeni ve gelişen bir telesağlık alanıdır. TR, rehabilitasyon hizmetlerini sunmak ve desteklemek için telekomünikasyon

teknolojisinin kullanılmasıdır ve iki yönlü veya çok yönlü etkileşimli telekomünikasyon teknolojisi aracılığıyla danışmanlık, önleyici, teşhis ve tedavi hizmetlerinin klinik uygulamasıdır. (Dorsey & Topol, 2016; Peretti et al., 2017). Bu hizmetler, değerlendirme, izleme, müdahale, denetim, eğitim, danışma ve danışmanlığı içerir ancak bunlarla sınırlı değildir. TR hizmetlerinin iki ana bileşeni vardır bunlar: rehabilitasyon hizmeti (klinik uygulama) ve telekomünikasyon/bilgi teknolojisi. Bu sayede, hastalarla uzaktan etkileşim kurmak, muayene etmek, teşhis koymak ve tedavi etmek mümkün olmaktadır (Sarsak, 2020).

Geleneksel rehabilitasyon merkezi müdahaleleriyle karşılaştırıldığında, ulaşımın üstesinden gelmek de dahil olmak üzere, telerehabilitasyonun çeşitli avantajları vardır. Dezavantaj olarak ise takip seansı planlamasının optimize edilmesinin ve hastaların ortamının değerlendirilmesinin zor olduğu düşünülmektedir. Engelliler arasında yapılan telerehabilitasyon hakkında sistematik bir incelemede, müdahalelerin %71'inin başarılı olduğunu ortaya konmuştur (Hailey et al., 2011), böylece uzaktan çevrimiçi sağlık müdahalesinin uygulanmasına yönelik kanıta dayalı uygulama önerileri desteklenmiştir (Lorenzini & Wittich, 2019). Bu kapsamda geliştirilen ev tabanlı rehabilitasyon sistemleri, makine öğrenmesi algoritması ile donanmış akıllı saat ve akıllı telefon uygulamaları ile kişiye evinin rahatlığında gerekli egzersizleri yapma, kayıtları tutma ve hekim takibini mümkün kılmaktadır (Chae et al., 2020).

Klasik rehabilitasyon seansları hastalar açısından çoğu zaman can sıkıcı olarak değerlendirilir ve ilgi gösterilmez. Bu durumda telerehabilitasyon sistemleri hastayı teşvik edici olabilmektedir. Bu anlamda, birkaç çalışmada “Sanal Gerçeklik” (VR) ile oyun tabanlı telerehabilitasyonun eğlenceli ve ilgi çekici olarak algılandığını böylece rehabilitasyonun yoğun süreci de dahil olmak üzere tedavi süreçlerinin daha verimli geçebileceği sonucuna varılmıştır (Cikajlo et al., 2011; Lewis et al., 2011; Rizzo & Kim, 2005). Telerehabilitasyon programlarının bir diğer avantajı da sağlık profesyonellerinin hastalardan toplanan verilere internet ve mobil cihazlar aracılığıyla kolayca erişebilmesidir (Bidargaddi & Sarela, 2008; Fan et al., 2014; Hamida et al., 2015). Telerehabilitasyon seansları sırasında sensörler aracılığıyla toplanan veriler, daha etkili sağlık müdahaleleri sağlamak için işlenebilir (Benharref & Serhani, 2014; Rolim et al., 2010). Son olarak, telerehabilitasyon, hem fizyoterapistler hem de hastalar açısından sağlık hizmetlerine ulaşım süresi de hesaba katıldığında oldukça tasarruflu bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Koh et al., 2017).

Bu kapsamda çalışmalar incelendiğinde, telerehabilitasyon sistemlerinde yapay zekânın kullanımı ile beraber hastalar ev konforunda tedavilerine devam ederken, sağlık kuruluşu da mekân tasarrufu sağlayarak daha fazla hastaya hizmet edebilme imkânına sahip olabilmektedir.

5.5. Mobil Uygulama Temelli Teknolojiler

Rehabilitasyonda mobil uygulamaların kullanımı kişilerin telefon, tablet ve bilgisayar gibi mobil cihazları yanında taşımaları ve bireylerin kendi yaşam koşullarında veri toplama yoluyla veri tabanı oluşturabilme özelliği sayesinde büyük önem kazanmaktadır. Bu durum hasta takip ve değerlendirmesinde kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Bireylerin postür değerlendirmesi eklem hareket açıklığı ölçümü, fiziksel aktivite takip ve eğitimi, egzersiz, aktivite yapmasını sağlayan uygulamalar bulunmaktadır (Tarakçı, 2021). Ayrıca Sağlık bilimleri alanında simülasyon uygulamaları, teknolojinin de gelişmesiyle birlikte kaliteli bir eğitim anlayışının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Fizyoterapi ve rehabilitasyon lisans eğitiminde en sık kullanılan simülasyon yöntemleri; anatomik modeller, görev eğiticiler, oyunlaştırma ve standart hastalardır. Ülkemizde fizyoterapistlik mesleği lisans eğitiminde simülasyon yöntemlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Kinikli et al., 2017).

Son yıllarda yapılan birtakım araştırmalar, kronik felçli bireylerin üst ekstremité hareketliliğini iyileştirmek için evde mobil rehabilitasyon uygulamaları kullanıp kullanamayacaklarını incelemeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda mobil uygulamalar, 3D baskılı ev eşyalarıyla birleştirilmiş bir akıllı telefonda oluşan: kupa, kâse, anahtar ve kapı kolu oluşturulmuştur. Akıllı telefon özel uygulaması, görev odaklı etkinliklere rehberlik ederek hem bir etkinliği tamamlanma süresini hem de hareket kalitesini (pürüzsüzlük/doğruluk) ölçmektedir. Bu uygulamalar sayesinde, üst ekstremité hareketliliğinde iyileşmeler olduğu, akıllı telefon tabanlı taşınabilir teknolojinin, felç gibi kronik durumlarda ev rehabilitasyon programlarını destekleyebileceği düşünülmektedir (Langan et al., 2020).

Boyun ağrısı olan ofis çalışanları için gömülü kendi kendini sınıflandırma algoritması ile yeni geliştirilen akıllı telefon tabanlı bir egzersiz programının ağrı yoğunluğu, fonksiyonel sakatlık, yaşam kalitesi, korkudan kaçınma ve servikal

üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Bu kapsamda gömülü bir kendi kendini sınıflandırma algoritmasına sahip akıllı telefon tabanlı egzersiz programı, boyun ağrısı olan ofis çalışanlarının zihinsel ve duygusal durumlarını etkilemek için yeterli olmasa da ağrı yoğunluğunu ve algılanan fiziksel sağlığını iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Bulut, 2019; Lee et al., 2016). Başka bir çalışmada ise Tinnitus tedavisi için ses terapisi sağlayan bir akıllı telefon uygulaması geliştirilmek hedeflenmiştir. Bu kapsamda iOS ve Android platformlarında kullanılabilen, 8 haftalık tinnitusa özel kişiselleştirilmiş ve frekans uyumlu ses terapisi sağlayan interaktif bir akıllı telefon uygulaması hayata geçirilmiştir. Uygulama ile kulak çınlaması tedavisi için akıllı telefon tabanlı bir bilişsel davranışçı terapi ve ses terapi platformunun potansiyel olarak umut verici biçimde etkin olduğu görülmüştür böylece bu tedavi yönteminin gelecekte randomize kontrollü çalışmaları teşvik edeceği düşünülmektedir (Abouzari et al., 2021).

5.6. Sanal Gerçeklik Temelli Uygulamalar/ Video Bazlı Oyun Terapi Sistemleri

Ortopedik rehabilitasyon, bir travma veya ameliyattan sonra bozulmuş işlevi düzeltmek için büyük önem taşımaktadır. Başarılı bir terapi, fiziksel işlevi iyileştirmek için eklem mobilizasyonunu ile kas güçlendirmesini iyileştirmek için uygun kombinasyon ve egzersizlerin ilerlemesini gerektirir (Khor et al., 2016). Rehabilitasyon programı ameliyattan hemen sonra hastane ortamında başlar ve daha sonra özel/ev ortamında devam eder (Eriksson et al., 2011). Mevcut rehabilitasyon yöntemleri hem denetimli hem de denetimsiz egzersizleri içerir, ancak teknolojiye gelişmeler bu alanda yeni ufuklar açmaktadır. Sanal gerçeklik (VR), artırılmış gerçeklik (AR), video bazlı oyunlaştırma ortopedik hastaların rehabilitasyonu için önemli kaynaklardır (Berton et al., 2020). Sanal gerçeklik tedavisi, alışılmış egzersizlerden farklı olarak, sanal ortam içerisinde gerçekleşen yeni bir rehabilitasyon yöntemidir. Bu yöntem günümüzde üst ekstremitte kullanımı rehabilitasyonu, alt ekstremitte eğitimi ve yürüme eğitimi alanlarında kullanılmaktadır. Sanal gerçeklik, uyarıcı ve eğlenceli ortamlar oluşturarak, kişilerin ilgi ve motivasyonlarını kullanarak, görev bazlı tekniklerle çalışma imkânı sunan bir yöntemdir (Holden, 2005).

VR ve AR, kullanıcıların zihninde gerçeklik algısını etkileyerek farklı bir ortamda oldukları konusunda onları ikna etme yoluyla aldatmayı amaçlamaktadır (Negrillo-Cárdenas et al., 2020). VR’de hasta sanal bir ortamla etkileşime girer ve gerçek hayatın aktivitesini simüle eder. Bu teknolojinin riski, yaralanmalara neden olabilecek gerçek tehlikeleri tanımanın imkânsız olmasıdır. AR’de sanal ve gerçek gerçeklik örtüşür ve hasta potansiyel tehlikelerin farkındadır (Chan et al., 2019). Oyunlaştırma kavramı, katılımı motive etmek için “oyun dışı bir bağlamda oyun tasarım öğelerinin” uygulanmasına dayanmaktadır (Allam et al., 2015). Video bazlı oyun terapilerinin çeşitli engellilik alanlarında (örneğin, idiyopatik skolyoz ve inme rehabilitasyonu) faydalı etkileri olduğu bilinmektedir (Negrillo-Cárdenas et al., 2020).

Gerçekten de VR’a dayalı deneysel yaklaşımlar, hastada gerçekçi algılar ve tepkiler ortaya çıkarabilen gerçek gibi üç boyutlu (3B) ortamlar yaratma olasılığı da dâhil olmak üzere terapiste (deneysel ortamlardaki araştırmacının yanı sıra gözlemciye) birçok avantaj sunmaktadır. Ancak, hastaların rehabilitasyonu neden gerçek bir ortam yerine sanal bir ortamda gerçekleştirmesi gerektiği noktasında farklı görüşlere sahip olsalar da çalışmalar, hastaların bilişsel ve motor yönlerinin rehabilitasyonunda VR kullanımının faydalı olduğunu göstermektedir (Knight et al., 2002; Laver et al., 2012).

İnme rehabilitasyonu; tekrarlayan, yoğun, amaca yönelik tedavi gerektirmektedir. Sanal gerçeklik (VR) bu gereksinimleri karşılama potansiyeline sahiptir. Oyun temelli terapi, hastaların rehabilitasyon terapisine katılımını daha ilginç ve motive edici bir araç olarak teşvik edebilir bir sistemdir. Akıllı telefonlar ve tablet PC’ler gibi mobil cihazlar, hastalar ve klinisyenler arasında etkileşimli iletişim ile kişiselleştirilmiş ev tabanlı terapi sağlayabilir (Lohse et al., 2014).

Bu teknolojiler, hastaların hastanede kalış sürelerini ve maliyetlerini azaltmakta ve aynı anda tedavi edilebilecek hasta sayısını artırmaktadır (Doiron-Cadrin et al., 2016). Bu rehabilite edici modların bir başka olumlu yönü, hasta ile sağlık hizmeti sağlayıcısı arasında tedaviye uyumu artıran doğrudan ve sürekli etkileşimdir (Kuether et al., 2019). Çalışmalar, uzaktan sanal rehabilitasyonun hastanın motivasyonunu iyileştirdiğini ve tedaviye uyumu geliştirdiğini göstermiştir (Then et al., 2020).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülke ekonomileri açısından sağlık hizmetleri insan hayatını merkezine aldığı için oldukça önemlidir. Teknoloji ve bilimde yaşanan olumlu gelişmeler, diğer sektörlerde olduğu gibi (sanayi, hizmet, eğitim ve üretim) sağlık sektörünü de hayal edilenin

ötesine taşımaktadır. Bu kapsamda yapay zekâ olarak adlandırılan sistemler, sağlıkta akıllı çözümleri ortaya çıkarmıştır. Sağlık hizmetlerinde yapay zekâ uygulamaları tüm alt dallarda kullanılmaktadır (Akalin & Veranyurt, 2020). Yapay zekâ sağlığın birçok alanında kullanıldığı gibi rehabilitasyonun çoğu alanında tanı, tedavi ve sınıflandırma aşamalarında da kullanılmaktadır (Russell & Norvig, 2010). Özellikle de insan-bilgisayar etkileşiminin olduğu her yerde kullanılması mümkündür (Nicolas & Gil, 2012).

Rehabilitasyonda yapay zekâ, simbiyotik nöroprotezler ile miyoelektrik kontrol, beyin bilgisayar arayüz teknolojisi, perioperatif tıp ve daha birçok alanda kullanılmaktadır (Anderson, 2019; Pokorny et al., 2013; Sanchez et al., 2009; van Dokkum et al., 2015). Özellikle hasta veri ölçümü ve klinik karar verme desteği gibi durumların makine öğrenmesi yöntemleriyle gündelik yaşamda kullanılabilir olması çok değerlidir. Yapay zekâ destekli sistemler, klinik değerlendirme alanlarından; denge, yürüme, günlük yaşam aktiviteleri ile alt ve üst ekstremiteler becerileri gibi olguların etkilerini arttırabilmek amacıyla geliştirilmektedir. Bu kapsamda, hastaya ait çıktılar değerlendirilerek rehabilitasyon uygulamalarının gelişim düzeyi, klinik ilerleme tahmini ve devamlılık takibi mümkün olmaktadır (Köse, 2018).

Rehabilitasyon hizmetlerinde yapay zekâ temelli akıllı teknolojilerin kullanılması sağlık hizmetleri yönetimi bakış açısıyla incelendiğinde birçok fayda sağlamaktadır. Örneğin; bireyin seviyesine ve yeteneklerine uygun dizayn edilebilen giyilebilir teknolojilerin olması üretim maliyetlerinin düşmesini sağlayabilir. Diğer taraftan, terapist ve hasta için tedavinin zaman, yoğunluk, zorluk, hız gibi parametrelerinin esnek olarak yapılandırılmasının sağlanması, güvenilir ve geçerli kullanıcı algılama donanımı ile objektif veri sağlanması, eş zamanlı geribildirim sağlanması, gerçek yaşam simülasyonu ile aktivite eğitim kolaylığı sunması ve rehabilitasyonun sürecinde hasta ve terapistin olası tükenmişliğini azaltması açısından oldukça yararlıdır (Tarakçı, 2021).

Bir sağlık hizmeti kurumunun en önemli kalemi ekonomi olarak düşünülmektedir. Bu kapsamda rehabilitasyon hizmetlerinde yapay zekâ kullanımı ekonomik açıdan hem hastaya hem de hizmet sağlayıcı kuruma yarar sağlamaktadır. Ayrıca rehabilitasyon hizmetleri için kullanım alanlarının yetersiz kalma durumu olabilmektedir. Telerehabilitasyon hizmetleri ile evde takip ve gerekli egzersiz programlarının planlanabilmesi mekândan tasarrufu sağlamaktadır. Bununla beraber tüm dünyanın mücadele içinde olduğu Covid-19 pandemisi dolayısıyla sağlık kurumlarına gitme noktasında çekinceler vardır. Bu noktada uzaktan rehabilitasyon hizmetlerinin mobil olarak verilmesi, planlanması, kontrol ve değerlendirmesi hastanın güvenli bir şekilde tedavisine devam etmesini sağlar. Ortez ve protez üretiminde 3D yazıcıların kullanılması kişiselleştirilmiş sağlık hizmetini öne çıkararak hastanın fiziksel özelliklerine yönelik üretimin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Yapay zekâ kullanımı ile hasta verileri depolamak mümkün olacak bu sayede klinik karar verme süreci hızlanacaktır. Makine öğrenimi ile beraber benzer rahatsızlıklar belki de çok önceden tahmin edilebilir olacak bu sayede hem zaman hem de ekonomi açısından tasarruf sağlanacaktır. Sanal gerçeklik ve oyunlaştırarak tedavi yöntemleri ile hasta sıkıcı rutin egzersizleri eğlenerek yapabilmektedir. Bu durum, hizmet veren kurumun pahalı cihazlar kullanmasının önüne geçerek parasal ve mekânsal tasarruf imkânı tanıyacaktır.

Araştırma kapsamında rehabilitasyon hizmetlerine birçok fayda sağladığı değerlendirilen yapay zekâ uygulamalarının daha çok desteklenmesi, bu alanda yapılacak projelerin devlet tarafından daha fazla fonlanması gerektiği düşünülmektedir. İnsan hayatına dokunarak, bireyleri rehabilite eden fizik tedavi uzmanları yapay zekânın rehabilitasyonda kullanılmasıyla beraber daha çok insanın hayatına dokunabileceklerdir

Hakem Değerlendirmesi: Dış bağımsız.

Çıkar Çatışması: Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemişlerdir.

Finansal Destek: Yazarlar finansal destek beyan etmemişlerdir.

Yazar Katkıları: Çalışma Konsepti/Tasarım- B.A., M.B.D.; Veri Toplama- M.B.D.; Veri Analizi/Yorumlama- B.A.; Yazı Taslağı- M.B.D.; İçeriğin Eleştirel İncelemesi- B.A.; Son Onay ve Sorumluluk- B.A., M.B.D.

Peer-review: Externally peer-reviewed.

Conflict of Interest: The authors have no conflict of interest to declare.

Grant Support: The authors declared that this study has received no financial support.

Author Contributions: Conception/Design of Study- B.A., M.B.D.; Data Acquisition- M.B.D.; Data Analysis/Interpretation- B.A.; Drafting Manuscript- M.B.D.; Critical Revision of Manuscript- B.A.; Final Approval and Accountability- B.A., M.B.D.

Kaynaklar/References

- Abouzari, M., Goshtasbi, K., Sarna, B., Ghavami, Y., Parker, E. M., Khosravi, P., Mostaghni, N., Jamshidi, S., Saber, T., & Djalilian, H. R. (2021). Adapting Personal Therapies Using a Mobile Application for Tinnitus Rehabilitation: A Preliminary Study. *Annals of Otolaryngology, Rhinology and Laryngology*, 130(6), 571–577. <https://doi.org/10.1177/0003489420962818>
- Ajiboye, A. B., Willett, F. R., Young, D. R., Memberg, W. D., Murphy, B. A., Miller, J. P., Walter, B. L., Sweet, J. A., Hoyen, H. A., Keith, M. W., Peckham, P. H., Simeral, J. D., Donoghue, J. P., Hochberg, L. R., & Kirsch, R. F. (2017). Restoration of reaching and grasping movements through brain-controlled muscle stimulation in a person with tetraplegia: a proof-of-concept demonstration. *The Lancet*, 389(10081), 1821–1830. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30601-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30601-3)
- Akalin, B., & Veranyurt, Ü. (2020). Sağlıkta Dijitalleşme ve Yapay Zeka. *SDÜ Sağlık Yönetimi Dergisi*, 2(2), 128–137.
- Akdemir, N., & Akkuş, Y. (2006). Rehabilitasyon ve Hemşirelik. *Hacettepe Üniversitesi Hemşirelik Fakültesi Dergisi*, 13(1), 82–91.
- Akgöbek, Ö., & Çakır, F. (2009). Veri Madenciliğinde Bir Uzman Sistem Tasarımı. *Akademik Bilişim'09 - XI. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri*, 809–813. http://ab.org.tr/ab09/kitap/akgobek_cakir_AB09.pdf
- Allam, A., Kostova, Z., Nakamoto, K., & Schulz, P. J. (2015). The effect of social support features and gamification on a web-based intervention for rheumatoid arthritis patients: Randomized controlled trial. *Journal of Medical Internet Research*, 17(1), e14. <https://doi.org/10.2196/jmir.3510>
- Althoff, T., Sosič, R., Hicks, J. L., King, A. C., Delp, S. L., & Leskovec, J. (2017). Large-scale physical activity data reveal worldwide activity inequality. *Nature*, 547(7663), 336–339. <https://doi.org/10.1038/nature23018>
- Anderson, D. (2019). Artificial Intelligence and Applications in PM&R. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 98(11), e128–e129. <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000001171>
- Ang, K. K., & Guan, C. (2015). Brain-computer interface for neurorehabilitation of upper limb after stroke. *Proceedings of the IEEE*, 103(6), 944–953. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2415800>
- Antonio Regalado. (2021). *Elon Musk's Neuralink is neuroscience theater | MIT Technology Review*. Technology Review. <https://www.technologyreview.com/2020/08/30/1007786/elon-musks-neuralink-demo-update-neuroscience-theater/>
- Ardan, M., Rahman, F. F., & Geroda, G. B. (2020). The influence of physical distance to student anxiety on COVID-19, Indonesia. *Journal of Critical Reviews*, 7(17), 1126–1132. <https://doi.org/10.31838/jcr.07.17.141>
- Bacek, T., Moltedo, M., Langlois, K., Prieto, G. A., Sanchez-Villamañan, M. C., Gonzalez-Vargas, J., Vanderborght, B., Lefeber, D., & Moreno, J. C. (2017). BioMot exoskeleton - Towards a smart wearable robot for symbiotic human-robot interaction. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 1666–1671. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2017.8009487>
- Bai, J., Song, A., Xu, B., Nie, J., & Li, H. (2017). A Novel Human-Robot Cooperative Method for Upper Extremity Rehabilitation. *International Journal of Social Robotics*, 9(2), 265–275. <https://doi.org/10.1007/s12369-016-0393-4>
- Barrios-Muriel, J., Romero-Sánchez, F., Alonso-Sánchez, F. J., & Salgado, D. R. (2020). Advances in orthotic and prosthetic manufacturing: A technology review. *Materials*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/ma13020295>
- Baxter, P., Morris, C., Rosenbaum, P., Paneth, N., Leviton, A., Goldstein, M., Bax, M., Colver, A., Damiano, D., Graham, H. K., Brien, G. O., & Shea, T. M. O. (2007). The Definition and Classification of Cerebral Palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49, 1–44. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00001.x>
- Benharref, A., & Serhani, M. A. (2014). Novel cloud and SOA-based framework for E-health monitoring using wireless biosensors. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 18(1), 46–55. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2013.2262659>
- Berton, A., Longo, U. G., Candela, V., Fioravanti, S., Giannone, L., Arcangeli, V., Alciati, V., Berton, C., Facchinetti, G., Marchetti, A., Schena, E., De Marinis, M. G., & Denaro, V. (2020). Virtual reality, augmented reality, gamification, and telerehabilitation: Psychological impact on orthopedic patients' rehabilitation. *Journal of Clinical Medicine*, 9(8), 1–13. <https://doi.org/10.3390/jcm9082567>
- Bidargaddi, N. P., & Sarela, A. (2008). Activity and heart rate-based measures for outpatient cardiac rehabilitation. *Methods of Information in Medicine*, 47(3), 208–216. <https://doi.org/10.3414/ME9112>
- Blumrosen, G., Miron, Y., Intrator, N., & Plotnik, M. (2016). A Real-Time Kinect Signature-Based Patient Home Monitoring System. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/s16111965>
- Bockbrader, M. (2019). Upper limb sensorimotor restoration through brain-computer interface technology in tetraparesis. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 11(Figure 1), 85–101. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2019.09.002>
- Bockbrader, M. A., Francisco, G., Lee, R., Olson, J., Solinsky, R., & Boninger, M. L. (2018). Brain Computer Interfaces in Rehabilitation Medicine. *PM and R*, 10(9), S233–S243. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.05.028>
- Bong, J. H., Jung, S., Park, N., Kim, S. J., & Park, S. (2020). Development of a Novel Robotic Rehabilitation System With Muscle-to-Muscle Interface. *Frontiers in Neurobotics*, 14(February), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.00003>
- Branco, M. P., Freudenburg, Z. V., Aarnoutse, E. J., Bleichner, M. G., Vansteensel, M. J., & Ramsey, N. F. (2017). Decoding hand gestures from primary somatosensory cortex using high-density ECoG. *NeuroImage*, 147, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.12.004>
- Brennan, D. M., Tindall, L., Theodoros, D., Brown, J., Campbell, M., Christiana, D., Smith, D., Cason, J., Lee, A., & American Telemedicine Association. (2011). A blueprint for telerehabilitation guidelines--October 2010. *Telemedicine Journal and E-Health : The Official Journal of the American Telemedicine Association*, 17(8), 662–665. <https://doi.org/10.1089/tmj.2011.0036>
- Budaklı, M. T., & Yılmaz, C. (2021). Stewart platform based robot design and control for passive exercises in ankle and knee rehabilitation. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4), 1831–1846. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.846641>

- Bulut, İ. C. (2019). *Sağlıklı Ofis Çalışanlarında Mobil Uygulama Destekli Egzersiz Programının Ağrı, Yaşam Kalitesi ve İş Performansına Etkisi*. Medipol Üniversitesi.
- Burgar, C. G., Lum, P. S., Erika Scremin, A. M., Garber, S. L., Machiel van der Loos, H. F., Kenney, D., & Shor, P. (2011). Robot-assisted upper-limb therapy in acute rehabilitation setting following stroke: Department of veterans affairs multisite clinical trial. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 48(4), 445–458. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2010.04.0062>
- Büyükgöze, S. (2021). *Beyin Bilgisayar Arayüzleri ve Uygulama Alanları*.
- Cason, J. (2009). A Pilot Telerehabilitation Program: Delivering Early Intervention Services to Rural Families. *International Journal of Telerehabilitation*, 1(1), 29–38. <https://doi.org/10.5195/ijt.2009.6007>
- Chae, S. H., Kim, Y., Lee, K. S., & Park, H. S. (2020). Development and clinical evaluation of a web-based upper limb home rehabilitation system using a smartwatch and machine learning model for chronic stroke survivors: Prospective comparative study. *JMIR MHealth and UHealth*, 8(7). <https://doi.org/10.2196/17216>
- Chan, Z. Y. S., MacPhail, A. J. C., Au, I. P. H., Zhang, J. H., Lam, B. M. F., Ferber, R., & Cheung, R. T. H. (2019). Walking with head-mounted virtual and augmented reality devices: Effects on position control and gait biomechanics. *PLoS ONE*, 14(12), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225972>
- Chang, Y. J., Chen, S. F., & Huang, J. Da. (2011). A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2566–2570. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.07.002>
- Chung, S. W., Han, S. S., Lee, J. W., Oh, K. S., Kim, N. R., Yoon, J. P., Kim, J. Y., Moon, S. H., Kwon, J., Lee, H. J., Noh, Y. M., & Kim, Y. (2018). Automated detection and classification of the proximal humerus fracture by using deep learning algorithm. *Acta Orthopaedica*, 89(4), 468–473. <https://doi.org/10.1080/17453674.2018.1453714>
- Cieza, A., Causey, K., Kamenov, K., Hanson, S. W., Chatterji, S., & Vos, T. (2020). Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10267), 2006–2017. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32340-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32340-0)
- Cikajlo, I., Rudolf, M., Goljar, N., Burger, H., & Matjačić, Z. (2011). Telerehabilitation using virtual reality task can improve balance in patients with stroke. *Disability and Rehabilitation*, 34(1), 13–18. <https://doi.org/10.3109/09638288.2011.583308>
- Degol, J., Akhtar, A., Manja, B., & Bretl, T. (2016). Automatic grasp selection using a camera in a hand prosthesis. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 2016-October*, 431–434. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7590732>
- Díaz, I., Catalan, J. M., Badesa, F. J., Justo, X., Lledo, L. D., Ugartemendia, A., Gil, J. J., Díez, J., & García-Aracil, N. (2018). Development of a robotic device for post-stroke home tele-rehabilitation. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1177/1687814017752302>
- Doiron-Cadrin, P., Kairy, D., Vendittoli, P. A., Lowry, V., Poitras, S., & Desmeules, F. (2016). Effects of a tele-rehabilitation program or an in-person prehabilitation program in surgical candidates awaiting total hip or knee arthroplasty: Protocol of a pilot single blind randomized controlled trial. *Contemporary Clinical Trials Communications*, 4, 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.conctc.2016.10.001>
- Dorsey, E. R., & Topol, E. J. (2016). State of Telehealth. *New England Journal of Medicine*, 375(2), 154–161. <https://doi.org/10.1056/nejmra1601705>
- Duret, C., Grosmaire, A. G., & Krebs, H. I. (2019). Robot-assisted therapy in upper extremity hemiparesis: Overview of an evidence-based approach. *Frontiers in Neurology*, 10(APR), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00412>
- Edgerton, V. R., & Roy, R. R. (2009). Robotic Training and Spinal Cord Plasticity. *NIH-PA Author Manuscript*, 78(1), 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2008.09.018>
- Eriksson, L., Lindström, B., & Ekenberg, L. (2011). Patients' experiences of telerehabilitation at home after shoulder joint replacement. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 17(1), 25–30. <https://doi.org/10.1258/jtt.2010.100317>
- Fan, Y. J., Yin, Y. H., Xu, L. Da, Zeng, Y., & Wu, F. (2014). IoT-based smart rehabilitation system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1568–1577. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2302583>
- Fernandez-Llata, C., & García-Gómez, J. M. (2014). Data mining in clinical medicine. In *Data Mining in Clinical Medicine* (Vol. 1246, pp. 1–267). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1985-7>
- Ferreira, C. M., & Serpa, S. (2018). Society 5.0 and Social Development: Contributions to a Discussion. *Management and Organizational Studies*, 5(4), 26. <https://doi.org/10.5430/mos.v5n4p26>
- Fico, G., Fioravanti, A., Arredondo, M. T., Gorman, J., Diazi, C., Arcuri, G., Conti, C., & Pirini, G. (2016). Integration of personalized healthcare pathways in an ICT platform for diabetes managements: A small-scale exploratory study. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 20(1), 29–38. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2014.2367863>
- Foong, R., Tang, N., Chew, E., Chua, K. S. G., Ang, K. K., Quek, C., Guan, C., Phua, K. S., Kuah, C. W. K., Deshmukh, V. A., Yam, L. H. L., & Rajeswaran, D. K. (2020). Assessment of the Efficacy of EEG-Based MI-BCI with Visual Feedback and EEG Correlates of Mental Fatigue for Upper-Limb Stroke Rehabilitation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 67(3), 786–795. <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2921198>
- Frederix, I., Hansen, D., Coninx, K., Vandervoort, P., Vandijck, D., Hens, N., Van Craenenbroeck, E., Van Driessche, N., & Dendale, P. (2016). Effect of comprehensive cardiac telerehabilitation on one-year cardiovascular rehospitalization rate, medical costs and quality of life: A cost-effectiveness analysis. *European Journal of Preventive Cardiology*, 23(7), 674–682. <https://doi.org/10.1177/2047487315602257>
- Friedenberg, D. A., Schwemmer, M., Skomrock, N., Sederberg, P., Ting, J., & Sharma, G. (2018). *Neural Decoding Requirements for a Take-home Brain Computer Interface*. August, 43210.
- Fukuyama, M. (2018). Society 5.0: Aiming for a New Human-Centered Society. *Japan SPOTLIGHT*, August, 47–50. https://www.jef.or.jp/journal/pdf/220th_Special_Article_02.pdf
- Galna, B., Jackson, D., Schofield, G., McNaney, R., Webster, M., Barry, G., Mhiripiri, D., Balaam, M., Olivier, P., & Rochester, L. (2014). Retraining

- function in people with Parkinson's disease using the Microsoft kinect: Game design and pilot testing. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-60>
- Geman, O., Sanei, S., Costin, H., & Eftaxias, K. (2015). Challenges And Trends In Ambient Assisted Living and Intelligent Tools For Disabled And Elderly People. *IWCIM – Computational Intelligence for Multimedia Understanding*, 1, 0–4.
- Gerke, S., Babic, B., Evgeniou, T., & Cohen, I. G. (2020). The need for a system view to regulate artificial intelligence/machine learning-based software as medical device. *Npj Digital Medicine*, 3(1), 1–4. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0262-2>
- Ghwanmeh, S., Mohammad, A., & Al-Ibrahim, A. (2013). Innovative Artificial Neural Networks-Based Decision Support System for Heart Diseases Diagnosis. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 05(03), 176–183. <https://doi.org/10.4236/jilsa.2013.53019>
- Giorgino, T., Tormene, P., Maggioni, G., Pistarini, C., & Quaglini, S. (2009). Wireless support to poststroke rehabilitation: MyHearts neurological rehabilitation concept. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 13(6), 1012–1018. <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2028020>
- Gotsis, M., Tasse, A., Swider, M., Lympouridis, V., Poulos, I. C., Thin, A. G., Turpin, D., Tucker, D., & Jordan-Marsh, M. (2012). Mixed reality game prototypes for upper body exercise and rehabilitation. *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, 181–182. <https://doi.org/10.1109/VR.2012.6180940>
- Green, R. A. (2021). Possibilities in bioelectronics: Super humans or science fiction? *APL Bioengineering*, 5(4), 040401. <https://doi.org/10.1063/5.0079530>
- Grossi, E. (2011). Artificial Neural Networks and Predictive Medicine: a Revolutionary Paradigm Shift. *Artificial Neural Networks - Methodological Advances and Biomedical Applications*. <https://doi.org/10.5772/15810>
- Hailey, D., Roine, R., Ohinmaa, A., & Dennett, L. (2011). Evidence in routine care: a systematic review. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 17(6), 281–287.
- Hamida, S. T. Ben, Hamida, E. Ben, & Ahmed, B. (2015). A new mHealth communication framework for use in wearable WBANs and mobile technologies. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/s150203379>
- Hasson, C. J., Caldwell, G. E., & Emmerik, R. E. A. Van. (2008). Impulsive choice and environmental enrichment: Effects of d-amphetamine and methylphenidate. *Behavioural Brain Research*, 193(1), 48–54. <https://doi.org/10.1177/0278364907084588>
- Hausdorff, J. M. (2005). *Gait variability : methods , modeling and meaning Example of Increased Stride Time Variability in Elderly Fallers Quantification of Stride-to-Stride Fluctuations*. 9, 1–9. <https://doi.org/10.1186/1743-Received>
- Hazar, Y. (2020). Giyilebilir Dış İskelet El. In *Batman Üniversitesi*.
- Helmstaedter, M., Briggman, K. L., Turaga, S. C., Jain, V., Seung, H. S., & Denk, W. (2013). Connectomic reconstruction of the inner plexiform layer in the mouse retina. *Nature*, 500(7461), 168–174. <https://doi.org/10.1038/nature12346>
- Holden, M. K. (2005). Virtual environments for motor rehabilitation: Review. *Cyberpsychology and Behavior*, 8(3), 187–211. <https://doi.org/10.1089/cpb.2005.8.187>
- Holden, M. K., Dyar, T. A., & Dayan-Cimadoro, L. (2007). Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(1), 36–42. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.891388>
- Hsieh, Y. W., Wu, C. Y., Liao, W. W., Lin, K. C., Wu, K. Y., & Lee, C. Y. (2011). Effects of treatment intensity in upper limb robot-assisted therapy for chronic stroke: A pilot randomized controlled trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25(6), 503–511. <https://doi.org/10.1177/1545968310394871>
- Hu, M., Cheng, H. J., Ji, F., Chong, J. S. X., Lu, Z., Huang, W., Ang, K. K., Phua, K. S., Chuang, K. H., Jiang, X., Chew, E., Guan, C., & Zhou, J. H. (2021). Brain Functional Changes in Stroke Following Rehabilitation Using Brain-Computer Interface-Assisted Motor Imagery With and Without tDCS: A Pilot Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15(July). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.692304>
- Iosa, M., Morone, G., Fusco, A., Castagnoli, M., Romana Fusco, F., Pratesi, L., & Paolucci, S. (2015). Leap motion controlled videogame-based therapy for rehabilitation of elderly patients with subacute stroke: A feasibility pilot study. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 22(4), 306–316. <https://doi.org/10.1179/1074935714Z.00000000036>
- Jayaraman, A., O'brien, M. K., Madhavan, S., Mummidisetty, C. K., Roth, H. R., Hohl, K., Tapp, A., Brennan, K., Kocherginsky, M., Williams, K. J., Takahashi, H., & Rymer, W. Z. (2019). Stride management assist exoskeleton vs functional gait training in stroke: A randomized trial. *American Academy of Neurology*, 92(3), E1–E11. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000000672>
- Jiang, R., Kleer, R., & Piller, F. T. (2017). Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technological Forecasting and Social Change*, 117(January), 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.01.006>
- Joe, S., Totaro, M., Wang, H., & Beccai, L. (2021). Development of the ultralight hybrid pneumatic artificial muscle: Modelling and optimization. *PLoS ONE*, 16, 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250325>
- Jopkiewicz, S., & Jopkiewicz, A. (2021). Innovations in the dimension of communication in health sector and the perspective of Society 5.0. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, 2021(150), 47–56. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2021.150.4>
- Jumphoo, T., Uthansakul, M., Duangmanee, P., Khan, N., & Uthansakul, P. (2021). Soft robotic glove controlling using brainwave detection for continuous rehabilitation at home. *Computers, Materials and Continua*, 66(1), 961–976. <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.012433>
- Kadivar, Z., Sullivan, J. L., Eng, D. P., Pehlivan, A. U., O'Malley, M. K., Yozbatiran, N., & Francisco, G. E. (2011). Robotic training and kinematic analysis of arm and hand after incomplete spinal cord injury: A case study. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975429>
- Kansal, V., Ranjan, R., Sinha, S., Tiwari, R., & Wickramasinghe, N. (2021). Healthcare and Knowledge Management for Society 5.0. In *Healthcare and Knowledge Management for Society 5.0*. <https://doi.org/10.1201/9781003168638>
- Kara, G. (2019). *Hemiparetik Bireylerde Denge Düzeyinin Belirlenmesi: Yapay Sinir Ağları Uygulaması*. Pamukkale Üniversitesi.
- Kara, G., Altuğ, F., Kavaklıoğlu, K., & Cavlak, U. (2020). *Nörolojik rehabilitasyonda yapay sinir ağı uygulamaları*. 45(4), 1844–1846.

- Kawasaki, S., Ohata, K., Yoshida, T., Yokoyama, A., & Yamada, S. (2020). Gait improvements by assisting hip movements with the robot in children with cerebral palsy: A pilot randomized controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00712-3>
- Khor, W. S., Baker, B., Amin, K., Chan, A., Patel, K., & Wong, J. (2016). Augmented and virtual reality in surgery—the digital surgical environment: Applications, limitations and legal pitfalls. *Annals of Translational Medicine*, 4(23), 1–10. <https://doi.org/10.21037/atm.2016.12.23>
- Kim, Y. S., Shi, H., Dagalakis, N., Marvel, J., & Cheok, G. (2019). Design of a six-DOF motion tracking system based on a Stewart platform and ball-and-socket joints. *Mechanism and Machine Theory*, 133, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.10.021>
- Kinikli, G. İ., Eden, A., & Cavlak, U. (2017). Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Eğitiminde Simülasyon Uygulamaları. *Türkiye Klinikleri J Med Educ-Special Topics*, 2(2), 104–110.
- Knight, C., Alderman, N., & Burgess, P. W. (2002). Development of a simplified version of the multiple errands test for use in hospital settings. *Neuropsychological Rehabilitation*, 12(3), 231–255. <https://doi.org/10.1080/09602010244000039>
- Koh, G., Ho, W., Koh, Y. Q., Lim, D., Tay, A., Yen, S.-C., Kumar, Y., Wong, S. M., Cai, V., Cheong, A., Koh, K., Png, C., Ng, Y. S., & Hoenig, H. (2017). A Time Motion Analysis of Outpatient, Home and Telerehabilitation Sessions From Patient and Therapist Perspectives. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 98(10), e28. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.08.087>
- Köse, B. (2018). Türkiye’de ve Dünyada Mesleki Rehabilitasyon. *Türkiye Klinikleri J Psychol-Special Topics*, 3(1), 30–41. <https://www.researchgate.net/publication/324133065>
- Krausz, N. E., & Hargrove, L. J. (2019). A survey of teleceptive sensing for wearable assistive robotic devices. *Sensors (Switzerland)*, 19(23), 1–27. <https://doi.org/10.3390/s19235238>
- Krebs, H. I., Volpe, B. T., Williams, D., Celestino, J., Charles, S. K., Lynch, D., & Hogan, N. (2007). Robot-aided neurorehabilitation: A robot for wrist rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(3), 327–335. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.903899>
- Kreilinger, A., Kaiser, V., Rohm, M., Rupp, R., & Müller-Putz, G. R. (2013). BCI and FES Training of a Spinal Cord Injured End-User to Control a Neuroprosthesis. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 58, 7–8. <https://doi.org/10.1515/bmt-2013-4443>
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *PervasiveHealth: Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, 25, 1–9. <https://doi.org/10.1145/3383972.3383975>
- Krogue, J. D., Cheng, K. V., Hwang, K. M., Toogood, P., Meinberg, E. G., Geiger, E. J., Zaid, M., McGill, K. C., Patel, R., Sohn, J. H., Wright, A., Darger, B. F., Padrez, K. A., Ozhinsky, E., Majumdar, S., & Pedoia, V. (2020). Automatic Hip Fracture Identification and Functional Subclassification with Deep Learning. *Radiology: Artificial Intelligence*, 2(2), e190023. <https://doi.org/10.1148/ryai.2020190023>
- Kübler, A., & Birbaumer, N. (2008). Brain-computer interfaces and communication in paralysis: Extinction of goal directed thinking in completely paralysed patients? *Clinical Neurophysiology*, 119(11), 2658–2666. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.06.019>
- Kuether, J., Moore, A., Kahan, J., Martucci, J., Messina, T., Perreault, R., Sembler, R., Tarutis, J., Zazulak, B., Rubin, L. E., & O’Connor, M. I. (2019). Telerehabilitation for Total Hip and Knee Arthroplasty Patients: A Pilot Series with High Patient Satisfaction. *HSS Journal*, 15(3), 221–225. <https://doi.org/10.1007/s11420-019-09715-w>
- Kwakkel, G., Van Peppen, R., Wagenaar, R. C., Dauphinee, S. W., Richards, C., Ashburn, A., Miller, K., Lincoln, N., Partridge, C., Wellwood, I., & Langhorne, P. (2004). Effects of augmented exercise therapy time after stroke: A meta-analysis. *Stroke*, 35(11), 2529–2536. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000143153.76460.7d>
- Langan, J., Bhattacharjya, S., Subryan, H., Xu, W., Chen, B., Li, Z., & Cavuoto, L. (2020). In-home rehabilitation using a smartphone app coupled with 3D printed functional objects: Single-subject design study. *JMIR MHealth and UHealth*, 8(7), 1–12. <https://doi.org/10.2196/19582>
- Laver, K., George, S., Thomas, S., Deutsch, J. E., & Crotty, M. (2012). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Stroke*, 43(2). <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.111.642439>
- Lecun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lee, M., Lee, S. H., Kim, T. Y., Yoo, H. J., Kim, S. H., Suh, D. W., Son, J., & Yoon, B. C. (2016). Feasibility of a Smartphone-Based Exercise Program for Office Workers With Neck Pain: An Individualized Approach Using a Self-Classification Algorithm. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 98(1), 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.09.002>
- Lewis, G. N., Woods, C., Rosie, J. A., & Mcpherson, K. M. (2011). Virtual reality games for rehabilitation of people with stroke: Perspectives from the users. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 6(5), 453–463. <https://doi.org/10.3109/17483107.2011.574310>
- Lincoln, N. B., Parry, R. H., & Vass, C. D. (1999). Randomized, controlled trial to evaluate increased intensity of physiotherapy treatment of arm function after stroke. *Stroke*, 30(3), 573–579. <https://doi.org/10.1161/01.STR.30.3.573>
- Lind, A., Akbarian, E., Olsson, S., Näsell, H., Sköldenberg, O., Razavian, A. S., & Gordon, M. (2021). Artificial intelligence for the classification of fractures around the knee in adults according to the 2018 AO/OTA classification system. *PLoS ONE*, 16(4 April), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248809>
- Liu, F., Guan, B., Zhou, Z., Samsonov, A., Rosas, H., Lian, K., Sharma, R., Kanarek, A., Kim, J., Guermazi, A., & Kijowski, R. (2019). Fully Automated Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Tears on Knee MR Images by Using Deep Learning. *Radiology: Artificial Intelligence*, 1(3), 180091. <https://doi.org/10.1148/ryai.2019180091>
- Liu, F., Zhou, Z., Samsonov, A., Blankenbaker, D., Larison, W., Kanarek, A., Lian, K., Kambhampati, S., & Kijowski, R. (2018). Deep learning approach for evaluating knee MR images: Achieving high diagnostic performance for cartilage lesion detection. *Radiology*, 289(1), 160–169. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018172986>
- Liu, X., & Wiersma, R. D. (2019). Optimization based trajectory planning for real-time 6DoF robotic patient motion compensation systems. *PLoS ONE*,

- 14(1), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210385>
- Lloréns, R., Gil-Goméz, J. A., Mesa-Gresa, P., Alcañiz, M., Colomer, C., & Noe, E. (2011). BioTrak: A comprehensive overview. *2011 International Conference on Virtual Rehabilitation, ICVR 2011*. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2011.5971843>
- Lo, K., Stephenson, M., & Lockwood, C. (2017). Effectiveness of robotic assisted rehabilitation for mobility and functional ability in adult stroke patients: a systematic review. *JBI Database of Systematic Reviews and Implementation Reports*, 15(12), 3049–3091. <https://doi.org/10.11124/JBISRIR-2017-003456>
- Lockery, D., Peters, J. F., Ramanna, S., Shay, B. L., & Szturm, T. (2011). Store-and-feedforward adaptive gaming system for hand-finger motion tracking in telerehabilitation. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 15(3), 467–473. <https://doi.org/10.1109/TITB.2011.2125976>
- Lohse, K. R., Hilderman, C. G. E., Cheung, K. L., Tatla, S., & Van Der Loos, H. F. M. (2014). Virtual reality therapy for adults post-stroke: A systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. *PLoS ONE*, 9(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093318>
- Lorenzini, M. C., & Wittich, W. (2019). Measuring changes in device use of a head-mounted low vision aid after personalised telerehabilitation: Protocol for a feasibility study. *BMJ Open*, 9(9), 1–10. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-030149>
- Lou, E., Hill, D. L., Raso, J. V., Moreau, M. J., & Mahood, J. K. (2005). Smart orthosis for the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 43(6), 746–750. <https://doi.org/10.1007/BF02430952>
- Martín-Moreno, J., Ruiz-Fernández, D., Soriano-Paya, A., & Berenguer-Mirallas, V. J. (2008). Monitoring 3D movements for the rehabilitation of joints in physiotherapy. *Proceedings of the 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS'08 - "Personalized Healthcare through Technology," 300000*, 4836–4839. <https://doi.org/10.1109/iembs.2008.4650296>
- Mathieson, K., Denison, T., & Winkworth-Smith, C. (2021). A transformative roadmap for neurotechnology in the UK. *A Transformative Roadmap for Neurotechnology in the UK*. <https://ktn-uk.org/wp-content/uploads/2021/06/A-transformative-roadmap-for-neurotechnology-in-the-UK.pdf>
- Mekki, M., Delgado, A. D., Fry, A., Putrino, D., & Huang, V. (2018). Robotic Rehabilitation and Spinal Cord Injury: a Narrative Review. *Neurotherapeutics*, 15(3), 604–617. <https://doi.org/10.1007/s13311-018-0642-3>
- Mohammadi, A., Lavranos, J., Zhou, H., Mutlu, R., Alici, G., Tan, Y., Choong, P., & Oetomo, D. (2020). A practical 3D-printed soft robotic prosthetic hand with multi-articulating capabilities. *PLoS ONE*, 15(5), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232766>
- Moon, S., Ahmadnezhad, P., Song, H. J., Thompson, J., Kipp, K., Akinwuntan, A. E., & Devos, H. (2020). Artificial neural networks in neurorehabilitation: A scoping review. *NeuroRehabilitation*, 46(3), 259–269. <https://doi.org/10.3233/NRE-192996>
- Müller-Putz, G. R., Ofner, P., Schwarz, A., Pereira, J., Luzhnica, G., Di Sciascio, C., Veas, E., Stein, S., Williamson, J., Murray-Smith, R., Escolano, C., Montesano, L., Hessing, B., Schneiders, M., & Rupp, R. (2017). Moregrasp: Restoration of Upper Limb Function in Individuals with High Spinal Cord Injury by Multimodal Neuroprostheses for Interaction in Daily Activities. *7th Graz Brain-Computer Interface Conference*, 338–343.
- Negrillo-Cárdenas, J., Jiménez-Pérez, J. R., & Feito, F. R. (2020). The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105407>
- Nicolas, L. F., & Gil, J. G. (2012). Brain computer interfaces, a review. *Sensors*, 12(2), 1211–1279. <https://doi.org/10.3390/s120201211>
- Novak, D., & Riener, R. (2015). A survey of sensor fusion methods in wearable robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, 73(September), 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.012>
- Nowakowski, P. R. (2017). Bodily processing: The role of morphological computation. *Entropy*, 19(7). <https://doi.org/10.3390/e19070295>
- Olczak, J., Emilson, F., Razavian, A., Antonsson, T., Stark, A., & Gordon, M. (2020). Ankle fracture classification using deep learning: automating detailed AO Foundation/Orthopedic Trauma Association (AO/OTA) 2018 malleolar fracture identification reaches a high degree of correct classification. *Acta Orthopaedica*, 92(1), 102–108. <https://doi.org/10.1080/17453674.2020.1837420>
- Onose, G., Grozea, C., Anghelescu, A., Daia, C., Sinescu, C. J., Ciurea, A. V., Spircu, T., Mirea, A., Andone, I., Spânu, A., Popescu, C., Mihăescu, A. S., Fazli, S., Danóczy, M., & Popescu, F. (2012). On the feasibility of using motor imagery EEG-based brain-computer interface in chronic tetraplegics for assistive robotic arm control: A clinical test and long-term post-trial follow-up. *Spinal Cord*, 50(8), 599–608. <https://doi.org/10.1038/sc.2012.14>
- Özturk, K., & Şahin, M. (2018). Yapay sinir ağları ve yapay zekâyâ genel bir bakış. *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25–36.
- Page, S. J., Schmid, A., & Harris, J. E. (2012). Optimizing terminology for stroke motor rehabilitation: Recommendations from the american congress of rehabilitation medicine stroke movement interventions subcommittee. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(8), 1395–1399. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.03.005>
- Pareto, L., Johansson, B., Ljungberg, C., Zeller, S., Sunnerhagen, K. S., Rydmark, M., & Broeren, J. (2011). Telehealth with 3D games for stroke rehabilitation. *International Journal on Disability and Human Development*, 10(4), 373–377. <https://doi.org/10.1515/IJDHD.2011.062>
- Pastor, I., Hayes, H. A., & Bamberg, S. J. M. (2012). A feasibility study of an upper limb rehabilitation system using Kinect and computer games. *Conference Proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference, 2012*, 1286–1289.
- Pee, L. G., Pan, S. L., & Cui, L. (2019). Artificial intelligence in healthcare robots: A social informatics study of knowledge embodiment. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 70(4), 351–369. <https://doi.org/10.1002/asi.24145>
- Pehlivan, A. U., Sergi, F., Erwin, A., Yozbatiran, N., Francisco, G. E., & O'Malley, M. K. (2014). Design and validation of the RiceWrist-S exoskeleton for robotic rehabilitation after incomplete spinal cord injury. *Robotica*, 32(8), 1415–1431. <https://doi.org/10.1017/S0263574714001490>
- Peretti, A., Amenta, F., Tayebati, S. K., Nittari, G., & Mahdi, S. S. (2017). Telerehabilitation: Review of the state-of-the-art and areas of application. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, 4(2), 1–9. <https://doi.org/10.2196/rehab.7511>
- Pokorny, C., Klobassa, D. S., Pichler, G., Erlbeck, H., Real, R. G. L., Kübler, A., Lesenfans, D., Habbal, D., Noirhomme, Q., Riseti, M., Mattia, D., & Müller-Putz, G. R. (2013). The auditory P300-based single-switch brain-computer interface: Paradigm transition from healthy subjects to minimally

- conscious patients. *Artificial Intelligence in Medicine*, 59(2), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2013.07.003>
- Pool, D., Elliott, C., Bear, N., Donnelly, C. J., Davis, C., Stannage, K., & Valentine, J. (2016). Neuromuscular electrical stimulation-assisted gait increases muscle strength and volume in children with unilateral spastic cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 58(5), 492–501. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12955>
- Poole, D. L., Mackworth, A., & Goebel, R. G. (1998). Computational Intelligence and Knowledge. In *Computational Intelligence: A Logical Approach* (pp. 1–22). <https://www.cs.ubc.ca/~poole/ci.html>
- Portillo-Lara, R., Tahirbegi, B., Chapman, C. A. R., Goding, J. A., & Green, R. A. (2021). Mind the gap: State-of-the-art technologies and applications for EEG-based brain-computer interfaces. *APL Bioengineering*, 5(3), 1–16. <https://doi.org/10.1063/5.0047237>
- Riener, R. (2012). Rehabilitation robotics. In *An Introduction to Rehabilitation Engineering* (Vol. 3, Issues 1–2). <https://doi.org/10.1561/23000000028>
- Rizzo, A., & Kim, G. J. (2005). A SWOT Analysis of the Field of Virtual Reality Rehabilitation and Therapy. *Frontiers in Robotics and AI*, 14(2), 119–146. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00101>
- Roblot, V., Giret, Y., Bou Antoun, M., Morillot, C., Chassin, X., Cotten, A., Zerbib, J., & Fournier, L. (2019). Artificial intelligence to diagnose meniscus tears on MRI. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 100(4), 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2019.02.007>
- Rodda, J., & Graham, H. K. (2001). Classification of gait patterns in spastic hemiplegia and spastic diplegia: A basis for a management algorithm. *European Journal of Neurology*, 8(03), 98–108. <https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.2001.00042.x>
- Rolim, C. O., Koch, F. L., Westphall, C. B., Werner, J., Fracalossi, A., & Salvador, G. S. (2010). A cloud computing solution for patient's data collection in health care institutions. *2nd International Conference on EHealth, Telemedicine, and Social Medicine, ETELEMED 2010, Includes MLMB 2010; BUSMMed 2010, iii*, 95–99. <https://doi.org/10.1109/ETELEMED.2010.19>
- Russell, S., & Norvig, P. (2010). Artificial intelligence (A modern approach). In *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE 2010* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1109/ICCAE.2010.5451578>
- Sanchez, J. C., Mahmoudi, B., DiGiovanna, J., & Principe, J. C. (2009). Exploiting co-adaptation for the design of symbiotic neuroprosthetic assistants. *Neural Networks*, 22(3), 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2009.03.015>
- Saracino, L., Avizzano, C. A., Ruffaldi, E., Cappiello, G., Curto, Z., & Scoglio, A. (2016). MOTORE++ a portable haptic device for domestic rehabilitation. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 728–734. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793115>
- Sarsak, H. I. (2020). Telerehabilitation services: a successful paradigm for occupational therapy clinical services? *International Physical Medicine & Rehabilitation Journal*, 5(2). <https://doi.org/10.15406/ipmrj.2020.05.00237>
- Shih, J. J., Krusienski, D. J., & Wolpaw, J. R. (2012). Brain-computer interfaces in medicine. *Mayo Clinic Proceedings*, 87(3), 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2011.12.008>
- Singh, S., & Ramakrishna, S. (2017). Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2017.05.006>
- Society, R. (2019). *IHuman Blurring lines between mind and machine*.
- Soekadar, S. R., Witkowski, M., Gómez, C., Opisso, E., Medina, J., Cortese, M., Cempini, M., Carrozza, M. C., Cohen, L. G., Birbaumer, N., & Vitiello, N. (2016). Hybrid EEG/EOG-based brain/neural hand exoskeleton restores fully independent daily living activities after quadriplegia. *Science Robotics*, 1(1). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aag3296>
- Song, A., Wu, C., Ni, D., Li, H., & Qin, H. (2016). One-Therapist to Three-Patient Telerehabilitation Robot System for the Upper Limb after Stroke. *International Journal of Social Robotics*, 8(2), 319–329. <https://doi.org/10.1007/s12369-016-0343-1>
- Spina, G., Huang, G., Vaes, A., Spruit, M., & Amft, O. (2013). COPDTrainer: A smartphone-based motion rehabilitation training system with real-time acoustic feedback. *UbiComp 2013 - Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 597–606. <https://doi.org/10.1145/2493432.2493454>
- Sullivan, E., & Barnes, D. (2007). Relationships among functional outcome measures used for assessing children with ambulatory CP. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 49(5), 338–344. <http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L46730684%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00338.x%5Cnhttp://limo.libis.be/resolver?&sid=EMBASE&issn=00121622&id=doi:10.1111%2Fj.1469-8749.2007.00338.x&atitle=Relationsh>
- Sunarti, S., Fadzlul Rahman, F., Naufal, M., Risky, M., Febriyanto, K., & Maslina, R. (2021). Artificial intelligence in healthcare: opportunities and risk for future. *Gaceta Sanitaria*, 35, S67–S70. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.12.019>
- Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 07-12-June*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
- Tanaka, N., Matsushita, S., Sonoda, Y., Maruta, Y., Fujitaka, Y., Sato, M., Simomori, M., Onaka, R., Harada, K., Hirata, T., Kinoshita, S., Okamoto, T., & Okamura, H. (2019). Effect of Stride Management Assist Gait Training for Poststroke Hemiplegia: A Single Center, Open-Label, Randomized Controlled Trial. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 28(2), 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2018.10.025>
- Tang, S., Ghosh, R., Thakor, N. V., & Kukreja, S. L. (2016). Orientation estimation and grasp type detection of household objects for upper limb prostheses with dynamic vision sensor. *Proceedings - 2016 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, BioCAS 2016, 1(c)*, 99–102. <https://doi.org/10.1109/BioCAS.2016.7833734>
- Tanzi, L., Vezzetti, E., Moreno, R., Aprato, A., Audisio, A., & Massè, A. (2020). Hierarchical fracture classification of proximal femur X-Ray images using a multistage Deep Learning approach. *European Journal of Radiology*, 133(October). <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.109373>
- Tarakci, D. (2015). *Pediatric Rehabilitasyonda Oyun Konsolları ile Sanal Gerçeklik Uygulamaları* (Issue August).

- Tarakçı, D. (2021, June 3). *SD PLATFORM - Dergi - Rehabilitasyonda yapay zekâ*. SD Platform. <https://www.sdplatform.com/Dergi/1420/Rehabilitasyonda-yapay-zek.aspx>
- TDK. (2021). *zekâ ne demek TDK Sözlük Anlamı*. <https://sozluk.gov.tr/>
- Then, J. W., Shivdas, S., Tunku Ahmad Yahaya, T. S., Ab Razak, N. I., & Choo, P. T. (2020). Gamification in rehabilitation of metacarpal fracture using cost-effective end-user device: A randomized controlled trial. *Journal of Hand Therapy, 33*(2), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2020.03.029>
- Thomas, T. M., Candrea, D. N., Fifer, M. S., McMullen, D. P., Anderson, W. S., Thakor, N. V., & Crone, N. E. (2019). Decoding native cortical representations for flexion and extension at upper limb joints using electrocorticography. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 27*(2), 293–303. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2891362>
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 65*(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- Tonet, O., Marinelli, M., Citi, L., Rossini, P. M., Rossini, L., Megali, G., & Dario, P. (2008). Defining brain-machine interface applications by matching interface performance with device requirements. *Journal of Neuroscience Methods, 167*(1), 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2007.03.015>
- Tousignant, M., Moffet, H., Boissy, P., Corriveau, H., Cabana, F., & Marquis, F. (2011). A randomized controlled trial of home telerehabilitation for post-knee arthroplasty. *Journal of Telemedicine and Telecare, 17*(4), 195–198. <https://doi.org/10.1258/jtt.2010.100602>
- Vall, M. Du. (2019). A superintelligent people-centered society, a few words about the idea of Society 5.0. *Państwo i Społeczeństwo, 2*, 11–31. <https://doi.org/10.34697/2451-0858-pis-2019-2-001>
- van Dokkum, L. E. H., Ward, T., & Laffont, I. (2015). Brain computer interfaces for neurorehabilitation-its current status as a rehabilitation strategy post-stroke. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine, 58*(1), 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2014.09.016>
- Vanmulken, D. A. M. M., Spooren, A. I. F., Bongers, H. M. H., & Seelen, H. A. M. (2015). Robot-assisted task-oriented upper extremity skill training in cervical spinal cord injury: A feasibility study. *Spinal Cord, 53*(7), 547–551. <https://doi.org/10.1038/sc.2014.250>
- Wang, J., Chen, H., Liang, H., Wang, W., Liang, Y., Liang, Y., & Zhang, Y. (2019). Low-frequency fluctuations amplitude signals exhibit abnormalities of intrinsic brain activities and reflect cognitive impairment in leukoaraiosis patients. *Medical Science Monitor, 25*, 5219–5228. <https://doi.org/10.12659/MSM.915528>
- Weiss, P. L., Sveistrup, H., Rand, D., & Kizony, R. (2009). Video capture virtual reality: A decade of rehabilitation assessment and intervention. *Physical Therapy Reviews, 14*(5), 307–321. <https://doi.org/10.1179/108331909X12488667117339>
- Yang, S., MacLachlan, R. A., & Riviere, C. N. (2015). Manipulator design and operation of a six-degree-of-freedom handheld tremor-canceling microsurgical instrument. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20*(2), 761–772. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2320858>
- Yiğit, P. (2011). *Yapay Sinir Ağları ve Kredi Taleplerinin Değerlendirilmesi Üzerine Bir Uygulama*. İstanbul Üniversitesi.

