

Alt Ekstremitte Rehabilitasyon Robotları

Lower Extremity Rehabilitation Robotics

Serap İNAL,^a
Erhan AKDOĞAN^b

^aFizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü,
Yeditepe Üniversitesi
Sağlık Bilimleri Fakültesi,
^bMekatronik Mühendisliği Bölümü,
Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi, İstanbul

Yazışma Adresi/Correspondence:
Serap İNAL
Yeditepe Üniversitesi
Sağlık Bilimleri Fakültesi,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü,
İstanbul, TÜRKİYE
inal.serap@gmail.com

ÖZET Mühendislik alanındaki teknolojik gelişmeler ve rehabilitasyona giderek artan talep robotların engeli olan kişilerin günlük yaşam aktivitelerinde (GYA) ve özellikle mobilizasyonlarında önemli ve etkin bir yer almalarına yol açmaktadır. Robotlar hastalar ve aileleri açısından cazip bir tedavi aracı olmakla birlikte, rehabilitasyon programı üzerine doğrudan etki ettiğini gösteren klinik çalışmalar fizyoterapistlerin, hekimlerin ve mühendislerin bu konuya olan ilgilerini artırmaktadır. Günümüzde yürüme eğitimi veren rehabilitasyon robotları (Locomat) yanı sıra Ayak tablası dayanaklı (foot-plate-based) yürüme eğiticileri, zemin üstünde yürüme eğiticileri, sabit yürüme eğiticileri (sabit egzersiz robotları), ayak bileği rehabilitasyon sistemleri (sabit sistemler ve aktif ayak ortezi) de aktif olarak klinik ve laboratuvar ortamlarında kullanılmaktadır. Bu sistemlerin ortak özellikleri hastanın hareketlerini algılamaları, ona göre cevap vermeleri ve verileri sürekli kayıt etmeleri nedeniyle daha hassas, kapsamlı değerlendirmelerin yapılabilmesinin mümkün olmasıdır. Aynı zamanda verilen egzersizlerin tekrar sayısının, sıklığının, yoğunluğunun kontrol edilmesi ve fizyoterapistin iş yükünü arttırmadan ihtiyaca göre yükseltilmesinin mümkün olması bir diğer önemli unsurdur.

Anahtar Kelimeler: Robotik sistemler; biyomekatronik; dış iskelet robotlar; motor beceri; robotik yürüme eğitimi

ABSTRACT Technological developments in engineering and the increasing demand for rehabilitation have caused robotics to become important and effective tools for the activities of daily living (ADL) and especially for the mobilization of people with disabilities. Although robots are interesting and motivating treatment tools from the patients' and their families' point of view, clinical studies demonstrating their effectiveness in rehabilitation programs are also attracting the attention of physiotherapists, doctors and engineers. Nowadays, robots for gait training (Locomat), foot-plate-based gait trainers, floor-based gait trainers, static gait trainers, and ankle rehabilitation systems (static and active orthotics) are used by physiotherapists actively in clinical and laboratory environments. Common features such as the ability to detect movement, response accordingly and record data continuously make it possible for these systems to perform a precise and detailed assessment of the patients. Additionally, the other important feature of robots is the ability to control as well as increase the number of repetitions, frequency and intensity of the movements without raising the workload of the physiotherapists.

Key Words: Robotic systems; biomechanics; exoskeletal, motor skills; robotic gait training

Türkiye Klinikleri J Physiother Rehabil-Special Topics 2015;1(1):6-13

"2003 yılıydı, bir gün Erhan Akdoğan Doktora Tezi ile ilgili birkaç soru sormak için ziyaretime geldi. Bir fizyoterapist ile görüşmesi gerektiği danışman hocası Prof.Dr. Arif Adlı tarafından salık verilmiş. Aynı üniversitede olmamız kendisi ile bu şekilde tanışmamı sağladı. O gün kendisine biz fizyoterapistler için çok doğal ve sıradan olan bir iki bilgi verdim. Her söylediğimi büyük bir heyecan ile kay-

dediyor ve bir soru daha soruyordu. Sonra gitti; bir süre sonra tekrar geldi, bu sefer önünde bir takım formüller ve notlar vardı. Gene sorular sordu, bu sefer daha fazla bilgi istiyor ve olasılıkları soruyordu. Aktif, pasif egzersizlerden asistiflere, dirençlilere; daha sonraki sefer PNF egzersizlerine geçmem gerektiğini anladım ve daha fazla bilgi vermeye başladım. Ancak bu arada endişelenmeye başlamıştım. Acaba yeterli oluyor muydum? Acaba daha farklı bir bakış açısından da anlatılması gerekiyor muydu? İstanbul Üniversitesi'nden Prof.Dr. Arzu Özdingler'e ve Doç.Dr. İpek Yeldan'na yönlendirdim. Sonra tekrar bana geldi ve yine sorular sordu. Okudukları, dinledikleri ve hesapladıkları arasında bağlantılar ve karşılaştırmalar yapıyor, olasılıkları artırıyordu. Bir gün beni laboratuvarına davet etti ve beni geliştirdiği robotu FİZYOTERABOT(TM) ile tanıştırdı. Robotun koluna oturdum, hareketleri verdiği dirençleri ve açısal değerlendirmelerini birlikte test ettik. Aradan geçen sürede bu alanda pek çok gelişme elde edildi şüphesiz, ancak bir fizyoterapist robot geliştirilmesi ile ilgili ilk çalışmalara katılmış olmak benim için heyecan verici bir deneyimdi.“

Günümüzde makine, elektrik-elektronik ve bilgisayar mühendisliğinin birlikte kullanıldığı mekatroniğin tıpta kullanılması ile ortaya çıkan biyomekatronik uygulamalarından olan rehabilitasyon robotlarına ilgi giderek artmaktadır. Bu ilginin artmasında dünyada giderek artan yaşlı nüfus ve yaş ile ilişkili hastalıkların başında gelen serebro vaskular ataklara bağlı inme vakaları ve spinal kord yaralanmalarının uzun süreli ve yoğun rehabilitasyon gerektirmeleri etkili olmaktadır. Aynı zamanda, multiple skleroz, parkinson, serebral palsi gibi çeşitli nörolojik sorunlar ve ortopedik cerrahiler sonrasında kişilerin de hangi yaşlarda olursa olsunlar rehabilitasyon hizmetlerine ciddi şekilde ihtiyaç duymaları bu ilginin artmasına yol açmaktadır.¹⁻³ Bu nedenle giderek artan rehabilitasyon taleplerinin karşılanabilmesi için klasik rehabilitasyon yöntemlerine ilave olarak kullanılan robotlar ile kişilerin günlük yaşam aktivitelerinin (GYA) ve özellikle mobilizasyonlarının artırılması yoluna gidilmektedir. Bununla birlikte mühendislik alanındaki gelişmelere (tahrik elemanları, sensörler, bilgisayar ve sinyal işleme teknolojilerindeki gelişmeler) paralel olarak rehabilitasyon robot çalışmalarının sayısı da artmaktadır.^{3,4}

Rehabilitasyon robotlarının etkin araçlar olarak özellikle yürüme amaçlı kullanılması mühendislerin, klinisyenlerin ve özellikle fizyoterapistlerin bu konuya yönelmelerini sağladığı gibi, ailelerin ve hastaların motivasyonlarını da yükseltmektedir. Ancak robotik sistemler aracılığı ile hastalara ve ailelerine beklenilenden daha fazla ümit verilmesinin ve sömürülmesinin de

önüne geçilmesi, madalyonun diğer yüzündeki önemli bir konudur. Bu bağlamda önemli olan, mühendislerin teknolojiyi laboratuvar ortamından klinik ortama aktarabilmeleri; klinisyen, hasta ve ailelerin robotik rehabilitasyon işlemlerine bir heyecan veya merak ile yaklaşmak yerine, tedavinin bir parçası olarak bakabilmeleridir. Dolayısıyla bu derleme çalışmanın amacı alt ekstremitte robotlarına yönelik yapılan güncel çalışmaları okuyucuya sunmak, klinikte kullanılabilecek alt ekstremitte rehabilitasyon robotlarının kullanım şekilleri, sakıncaları, dikkat edilmesi gereken hususlar, rehabilitasyon robotlarının geleceği ile beklentiler hakkında görüşlerimizi aktarmaktır.

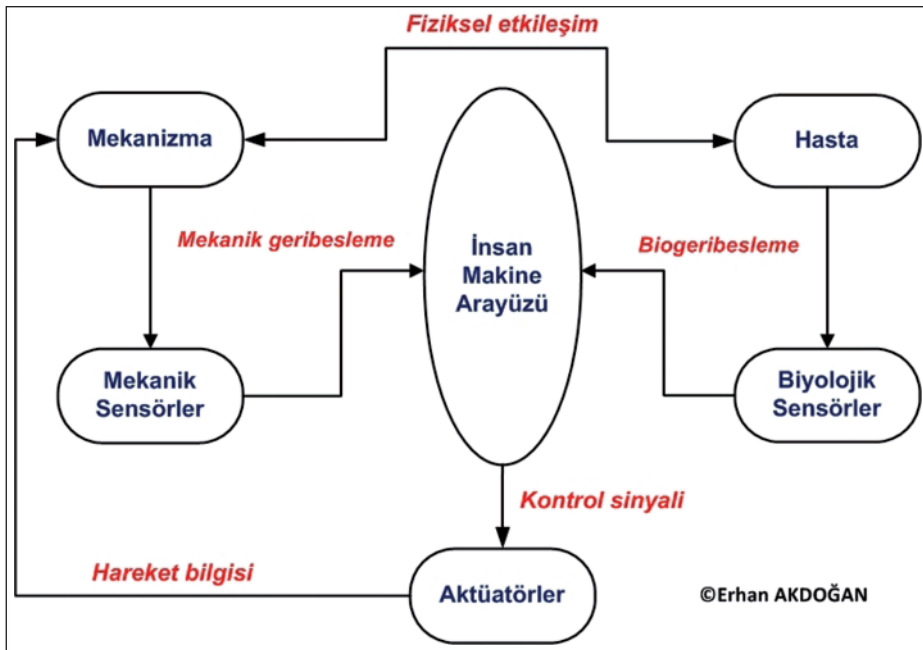
ALT EKSTREMİTE ROBOTİK SİSTEMLERİ

Dünyada alt ekstremitte hareketlerine yönelik olarak yapılan ilk robotik rehabilitasyon yaklaşımları 1980'lerde spinalize edilmiş kedilerin vücut ağırlıklarının alınarak treadmillde yürütülmesinin mümkün olduğunun gösterilmesi ile başlamıştır.¹ Bu çalışmayı takiben geliştirilen alt ekstremitte rehabilitasyon robotlarının amaçları, bacakların bozulmuş veya kaybolmuş hareketlerini ve yürüme paternlerini yeniden öğrenmelerini sağlamak, her iki taraf arasındaki dengeyi geliştirmek, kaslar arasındaki kuvvet dengesizliğini mümkün olan en az seviyeye indirmek olmuştur.⁵ Aynı zamanda kişinin alt ekstremitte eklem hareket miktarı ve kas kuvvetinin, ortaya çıkan yürüme paterninin değerlendirilmesi de yine günümüz robotik rehabilitasyon çalışmalarının amaçlarından (Tablo 1).³ Bu amaçlar doğrultusunda robotik rehabilitasyon işlemleri için geliştirilen biyomekatronik sistemlerin yapı ve elemanları Şekil 1'de blok diyagram ile verilmiştir.

Bu sistem sonucu ortaya çıkan robotik hareketler kişinin alt ekstremiteleri ve pelvisinde pasif, aktif asistif veya dirençli hareketlere yol açmakta ve kurgulanan yürüme paterni gerçekleştirilmektedir.^{1,5-7} Yürüme eğitimi verilirken alt ekstremitelerin bu tekrarlı açısal hareketleri sinir uçları arasında anastomozları güçlendirmekte, öğrenmeyi peçinlemede, hastanın bozulmuş veya kaybolmuş eklem hareketlerini ve dolayısıyla yürüme paternini yeniden öğrenmesini sağlamaktadır.^{2,6,7} Koceska (2013), robotik yürüme eğitiminde yapılan tüm hareketlerin amaca yönelik olduğunu vurgulamaktadır. Bu kapsamda yürüme eğitimi veren rehabilitasyon robotlarını genel olarak treadmillde manuel yardımcı ve treadmill veya zeminde robot yardımcı olmak üzere iki ayrı grupta inceleyebiliriz.

TABLO 1: Rehabilitasyon robotlarının amaçlarına göre biyomekatronik özelliklerinin getirdiği sonuçlar.

Rehabilitasyon Robotlarının Amaçları	Biyomekanik Özellikleri
İyileşmeyi hızlandırır	Robotlar, rehabilitasyondaki periyodik hareketleri kolaylıkla, aynı şartlarda, istenildiği kadar gerçekleştirebilir Robotlar, ön tanımlı kuvvetleri oluşturabilir ve bu kuvvetlerin sürekli kontrolünü gerçekleştirebilir Gelişen internet alt yapıları kullanılarak, uzaktan programlanabilen robotlar sayesinde hastalar evlerinde tedavi imkanı bulabilirler
Fizyoterapistin verimliliğini artırır	Robotlar aynı terapi koşullarını bir fizyoterapiste göre daha kesin ve doğru yerine getirebilir Robotlar sayesinde, bir fizyoterapist birden fazla hasta tedavi imkanı bulabilir
Hastaların iletişimi gelişir	Yeni deneyimler kazanılmasına yol açar Fiziksel çevre ile yeni etkileşimler kurulabilir
Hastalar daha objektif değerlendirilebilir	Hastanın değerlendirmesinde ve elde edilen gelişmelerin değerlendirilmesinde yeni yöntemler sunulur Robotlar sensörleri sayesinde bir insan göre daha objektif ölçümler yapabilir

**ŞEKİL 1:** Bir biyomekatronik sistemin yapısı ve elemanları.

1. TREADMİLDE MANUEL YARDIMLI YÜRÜME EĞİTİMİ

Bu sistemde hasta treadmillde yürürken vücudunu dik pozisyonda yukarıya doğru çeken askı şeklinde bir süspansiyon sistemi ile desteklenir. Ayaklardaki yük kısmen veya tamama yakın bir şekilde iki tarafa dengeli olarak alınmaktadır. Hasta emniyetli, düşme riski olmadan yürüyebilmektedir. Ancak fizyoterapist hastanın koordineli bir yürüyüş yapabilmesi için etkilenen taraf ayağını her yürüme devrinde eliyle ileriye yerleştirmesine yardımcı olmaktadır. Yürüyüşün koordineli olabilmesi için bir fizyoterapiste daha ihtiyaç bulunmaktadır.⁷ Eğer hasta bilateral kuvvet kaybına sahip ise, örneğin spinal kord yaralanmalarında seansa katılan fizyoterapist

sayısı üçe çıkacaktır. Dolayısıyla, çok fazla iş yükü gerektiren bir eğitim şekli olması nedeniyle artık günümüzde tercih edilen bir yöntem değildir. Fakat ilk robotik rehabilitasyon örneklerinden olması nedeniyle önem arz etmektedir.

2. ROBOT YARDIMLI YÜRÜME REHABİLİTASYONU

Yürümeyi destekleyici robotik cihazlar tekrarlı ve normal paterne daha yakın bir yürüme şekli sağlamaktadırlar. Fizyoterapistin daha az enerji sarf ederek, sadece gözlem yoluyla kontrol ettiği bir yürüme egzersiz modelidir. Hastanın yürümesi anında elde edilen gelişmeler, farklılıklar cihaz tarafından belirlenmekte, ölçülmekte

ve kaydedilmektedir. Dolayısıyla bu grup yürüme robotları hem daha objektif ve anında değerlendirme yapılabilmesine hem de hastanın fiziksel ve kardiyovasküler durumu izin verdiği sürece tekrar sayısının artırılabilmesine olanak sağlamaktadır. Sonuç olarak iyileşmenin hızlanmasına, hastanın ve ailesinin motivasyonunun artmasına yol açmaktadır.⁸⁻¹⁰

Bu fikirler ışığında robotik rehabilitasyonda kullanılan alt ekstremite robotları günümüzde genel olarak dış iskelet (eksoskelatal) ortezler, protezler, sabit egzersiz robotları ve yürüme desteği sağlayan robotlar olarak dört ana başlıkta incelenmektedir. Díaz, Gil, ve Sánchez, (2011) bu konuda yaptıkları derleme makalelerinde protezleri bu sınıflandırmanın dışında tutmuş alt ekstremite rehabilitasyon robotlarını beş ayrı grupta incelemiştir:

2.1. Treadmill yürüme eğiticileri

2.2. Ayak tablası dayanaklı (foot-plate-based) yürüme eğiticileri

2.3. Zemin Üstünde Yürüme Eğiticileri

2.4. Sabit Yürüme Eğiticileri (Sabit Egzersiz Robotları)

2.5. Ayak Bileği Rehabilitasyon Sistemleri

i- Sabit Sistemler

ii- Aktif Ayak Ortezi

Makalemiz yukarıda verilen sınıflandırmalara göre planlanmış, ancak konunun bütünlüğü açısından protezlerden bahsedilmeden alt ekstremiteler için kullanılan rehabilitasyon robotlarının özellikleri, klinik uygulamalarının sonuçları üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

2.1. Treadmil Yürüme Eğiticileri

Bu tip yürüme robotları treadmill ile birleştirilmiş dış iskelet (eksoskelatal-eksoskeleton) tip robotlardır. Laboratuvar ortamında kullanılan pek çok robot bulunmaktadır. Bunlar arasında Ancak günümüzde piyasaya sürülmüş ve kabul görenler Lokomat, LokoHelp ve RoeAmbulator'dur.⁷

Lokomat (Hocoma AG, Volketswil, Switzerland) bilateral olarak kumanda edilen ve vücut ağırlığının desteklediği bir ortezdir. Sagital düzlemde her yürüme devri boyunca diz ve kalça eklemlerinde linear hareket ile fleksiyon ve ekstansiyon yaptırırken, back-drivable özellikteki düzenek sayesinde önceden planlanmış olan bu hareketler sürekli tekrar edilebilmektedir. Sallanma fazı boyunca ayak bileği pasif olarak dorsi fleksiyona çe-

kilerek ayağın sürtünmesi engellenmektedir. Cihazın üstündeki rijit çerçeve pelvisi içine alan sabit kısım ve askı sistemi ile vücut ağırlığı desteklemektedir. Yürüme anında pelvis sabit tutulurken, ortez bir paralelogram yapı sayesinde vertikal olarak (yukarı-aşağı) yer değiştirmektedir. Hasta belinden, diz üstü ve altından güçlü bandlar ile desteklenmektedir.⁸

Bacakların her birinin açılma (angular) hareketleri diz ve kalça eklemlerinin lateral kısımlarına yerleştirilmiş potansiyometreler ile ölçülmektedir. Eklemlerin çizdiği yörünge hastalara göre genlik (amplitüt) ve bacaklar arası denge göz önünde bulundurularak manuel yapılmaktadır. Cihazın diz ve kalça eklemlerindeki tork bacakları destekleyen yan barlara entegre edilmiş kuvvet sensörleri tarafından ölçülmektedir.

Lokomatın teleskopik yan barları cihazın kişinin vücuduna göre ayarlanabilmesini sağlamaktadır. İlk geliştirildiklerinde normal yetişkin bir bireyin 35-47 cm arasındaki femur boyuna göre ayarlanabilen Lokomatlar günümüzde femur boyu 21-35 cm olan pediatrik hastalara veya boyu 1.00-1.50 m olan kişilere de ayarlanabilmektedir.^{7,8} Özellikle pediatrik vakalarda motivasyonu arttırmak amacıyla Lokomat ile yürüme eğitiminin sanal gerçeklik senaryoları ile birlikte kombine edilmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.¹¹

İlk geliştirilen Lokomat hastanın kas aktivasyonu gözardı etmekte ve bacaklar cihazın belirlediği paternde hareket etmeye zorlanmaktaydı. Ancak 2006 yılında geliştirilen Lokomat ile hastanın hareketleri yönlendirmesine izin vermesi, hasta ile daha uyumlu bir yürüyüş paterni geliştirilmesi yoluna gidilmiştir.⁹ Bu amaçla hasta ve cihaz arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkabilecek torkun hastanın aktif hareketi hakkında bilgi vermesi için kullanılması yoluna gidilmiş, elektromyografi yanı sıra yüzeysel sensörler yoluyla geri bildirim sağlanmıştır. 3 Bernhardt, Frey, Colombo, ve Riener (2005) hastanın kendi kas kuvvetini hissederek Lokomat üzerinde yürüme eğitimi almasının motivasyonlarını arttırdığı, başarı hissini duymalarını sağladığı sonucuna varmışlardır. Bu durumun tedavinin süresinin kısalmasına ve yürüme kalitesinin artmasına da yol açacağına işaret etmektedirler. Ancak Jezernik, Schärer, Colombo, ve Morari'nin (2003) belirttiği üzere hastaların yürüme paternine uyum yapabilmeleri ve yürümeyi kontrol edebilmeleri için yeterli kas kuvvetine sahip olmaları gerekmektedir. Özellikle komplet olmayan spinal kord yaralanmalarında ve inmede, Guillain-Barré'de bu durumun gelecek çalışmalar için de önemli olduğu vurgulanmaktadır.^{1,9}

LokoHelp (LokoHelp Group) ise tredmilin orta hattına yürüme yönüne paralel olarak sabitlenmiş elektromekanik bir cihazdır. Lokomat'ta olduğu gibi bir askı ile vücut ağırlığı desteklenmiştir ve ayak bilekleri cihaza bağlı bir çift bot içinde sabitlenmektedir. Yürümenin itme fazını kolaylaştırmak amacıyla botun tabanı yuvarlaklaştırılmıştır (roker taban). Kafa travması geçiren dolayısıyla yürüyebilen fakat denge ve koordinasyon sorunu olan hastaların yürüme eğitimi için geliştirilmiştir. **ReoAmbulator** (Motorika Ltd. AutoAmbulator) vücut ağırlığını destekleyen ve robotik kolları bacaklara band ile sabitlenen bu cihazda ayak bileği, diz ve kalçanın sagittal düzlemdeki hareketleri ile yürüme paterni oluşturulmaktadır.^{4,7}

2.2. Ayak Tablası Dayanaklı (Foot-Plate-Based) Yürüme Eğiticileri

Bu sistemlerde hareketleri elektromekanik olarak kontrol edilebilen birbirinden ayrı iki ayak tablası bulunmaktadır. Farklı fonksiyonel hareketlerin yapılabilmesi için geliştirilmiş olan tipleri bulunmakla birlikte **Gangtrainer DT I** (Reha-Stim) piyasaya sürülmüştür (Tablo 2). Gangtrainer DT I cihazında hastanın ayakları ayak tablalarına yerleştirilmekte ve vücut ağırlığı askılar gerektiği kadar desteklenebilmektedir. Hasta üzerine bağlanmış ipler yardımıyla ayaklardaki basma yüzeyi içindeki destek noktasının (center of pressure-COP) vertikal ve lateral hareketlerini kontrol edebilir. Cihaz hastanın yürürken kendi kişisel yeteneklerini ortaya koymasına ve farklı hızlara uyum yapabilmesine olanak sağlamaktadır.^{4,7}

2.3. Zemin Üstünde Yürüme Eğiticileri -Dış İskelet (Exoskeletal) Robotları

Hastaların tutma, kaldırma, hareket etme gibi ihtiyaçlarını destekleyen, genellikle giyilebilir tarzda geliştirilen, insan anatomisine uygun olan, iskelet sistemine benzeyen mekanik yapıdaki robotik sistemlere dış iskelet robotları (exoskeletal) adı verilir. Bu sistemler "aktif ortezler" olarak da değerlendirilebilir.¹² Bu sistemler, bireylerin başkalarının yardımına ihtiyaç duymadan günlük aktivitelerini yapmalarını yardımcı olurlar. Uzuv hareketlerini destekler (assistive) veya onların yerine kendisi yapar (autonomus). Ancak bu sistemlerin tasarım ve üretiminde bazı önemli problemler mevcuttur. Örnek olarak, yüksek maliyet gerektirmeleri, kişiye özel tasarım gereksinimleri, sistem üzerine entegre edilecek sensörlerin sayısı ve yapısı gibi. Diğer yandan bu sistemleri kullanacak hastaların mental kapasitelerinin yerinde olması gerekmektedir. Aksi halde ciddi güvenlik problemleri ortaya çıkabilir. Dış iskelet robotlarının hedef kitlesi genellikle motor becerileri zarar görmüş, kasları gelişmemiş, kafa travması ve spinal kord yaralanması olan kişilerdir. Daha önceleri askeri amaçlı olarak geliştirilen bu sistemler bugün hastaların hizmetine sunulmuş durumdadır.

ReWalk (ARGO Medical Technologies Ltd.) spinal kord yaralanması olan kişilere yürüme desteği sağlamak için geliştirilmiştir.¹³ Giyilebilen oldukça hafif bir cihazdır. Bilgisayar tabanlı kontrol sistemi, şarj edilebilen bataryalı, bir seri dizili sensörleri ve eklemlerin hareketini sağlayan DC motorlar bulunmaktadır.⁷ ReWALK™ bataryasının sırt çantası şeklinde hastanın sırtına asılması

TABLO 2: Ayak tablası dayanaklı (foot-plate-based) yürüme eğiticileri.

Robotik Sistem	Sağladığı Egzersizler
Gantrainer GT I	Yürüme eğitimi, farkındalığı geliştirme
HapticWalker	Düzenli zeminde yürüme Merdiven inme-çıkma Zorlu yürüme: Bozuk zeminde yürüme Kayma Tökezleyerek yürüme
Gaitmaster5 (GM5)	Sensörler ile hareketi hissederek Yürüme Tırmanma
LLRR (Lower-Limb Rehabilitasyon Robotu-Bacak Rehabilitasyon Robotu)	Normal yürüme paterninin simülasyonu Adımlama Bacak hareketleri
6-DOF (6-Degree-of-Freedom Gait Rehabilitation Robot-6 Derece Serbestliği olan Yürüme Robotu)	Yürürken üst ve alt ekstremitelerin uyumlu hareketleri Farklı zeminlerde yürüme hızı ayarlaması

kişiye bir miktar ağırlık oluşturuyor ise de, yerçekimi ekseninin arkasında kalması nedeniyle açığa çıkan tork, gövdenin ekstansör kuvvetlerine yardımcı olacaktır. Bu durumun, spinal kord yaralanmalı kişilerin koltuk değnekleri ile daha dik bir postürde yürümelerini sağlayacağı kanaatindeyiz.

Hybrid Assistive Limb -HAL (Cyberdyne Inc.) yaşlılar ve özellikle T10 seviyesinden spinal kord yaralanması olan kişiler için geliştirilmiştir. Kalça, diz ve ayak bileğini sagittal düzlemde hareket ettirebilen altı elektrik motoru bulunmaktadır.¹³ EMG sensörleri ile entegre bir biçimde çalışmakta ve sinyal seviyelerine göre motorların dolayısıyla sistemin kontrolü sağlanmaktadır. Sistemin tam otonom ve yarı otonom olmak üzere iki çalışma modu bulunmaktadır. İnmesi olan kişiler için tek bacaklı tipleri de geliştirilmiştir.^{6,14}

2.4. Sabit Yürüme Eğiticileri (Sabit Egzersiz Robotları)

Fizyoterapi ve rehabilitasyonda önemli bir yer tutan Sabit Yürüme Eğiticileri özellikle tekrarlı hareketlerin istenen kuvvet, pozisyon ve sürede gerçekleştirilmesinde etkili olan robotik sistemlerdir. Alt ekstremiteler için geliştirilen sistemlerin sayısı sınırlıdır. Bunlardan en bilinenleri Terapötik Egzersiz Makinesi (Therapeutic Exercise Machine-TEM), NeXOS, Multi-Iso ve Physiotherabot şeklinde sıralanabilir.

NeXOS, iki serbestlik dereceli, aktif asistif, pasif ve dirençli egzersizleri yapan bir sistemdir. Bu sistemde robotun yapması gereken kalça ve diz eklemleri için fleksiyon-ekstansiyon hareketleri önceden hastaya yaptırılmakta ve kameralar ile kaydedilmektedir. Görüntü işleme teknikleri ile tespit edilen hareket yörüngesi belirlendikten sonra uygulama fazında robot hareketleri hastaya yaptırmaya başlamaktadır.¹⁵

Physiotherabot, (FİZYOTERABOT (TM) ülkemizde geliştirilen 3 serbestlik dereceli, diz ve kalça eklemleri hareketlerine yönelik için rehabilitasyonu sistemidir (Resim 1).^{15,16} Bu sistem diz ve kalça için fleksiyon-ekstansiyon ve kalça için abduksiyon-adduksiyon yapabilmekte. Sistemin diğer alt ekstremiteler rehabilitasyon sistemlerinden ayrılan özellikleri, serbestlik derecesinin fazla olması, üç düzlemde harekete izin vermesi nedeniyle yaptırabildiği egzersiz çeşitlerinin fazla olması. Ayrıca geliştirilmiş ilave kısımlar ile sistem, kol rehabilitasyonu için de kullanılabilir. Bu bağlamda, tek bir mekanik yapıda üst ve alt ekstremitelerin rehabilitasyonunun yapılabilirdiği bir başka rehabilitasyon robotuna şu ana kadar literatürde rastlanamamıştır. Henüz basım aşamasında olan bu çalışma, ilave edilmiş



RESİM 1: Fizyoterabot (TM).¹⁵

(Renkli hâli için Bkz. <http://www.turkiyeklinikleri.com/journal/fizyoterapi-ve-rehabilitasyon-ozel-dergisi-e-dergi/481/tr-index.html>)

olan biyolojik geri bildirimler robotun hareketleri kontrol ve tedavi etme özelliklerini geliştirmiştir.

2.5. Ayak Bileği Rehabilitasyon Sistemleri

Ayak ve ayak bileği hareketleri temel alınarak düzenlenmiş olan bu cihazlar kişi oturma veya ayakta durma pozisyonunda iken farklı özelliklerde egzersiz yaptırabilen **sabit sistemler** ve yerde veya treadmillde yürüme egzersizleri yaptırabilen **aktif ayak ortezleri** olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Her ikisinde de amaç ayak ve ayak bileği eklemlerinin hareket miktarını, kas kuvvetini geliştirmek, artan denge ve koordinasyon ile fonksiyonel yürümeyi sağlamak veya iyileştirmektir. Aktif Diz Rehabilitasyon Ortotik Cihazlar (Active knee Rehabilitation Orthotic Devices-AKROD), Yüksek performanslı Ayak Bileği Rehabilitasyon Robotu-The Istituto Itliano di Tecnologia High performance Rehabilitation Robot-IIT-HPARR), bacak şeklindeki Leg-Robot gibi çeşitli sabit ayak bileği rehabilitasyon sistemleri olduğu halde sadece piyasaya sürülmüş olan **Rutgers-Ankle** ilk geliştirmiş cihazlardandır. Kişinin ayağına sanal gerçeklik temelli egzersizler uygulayarak altı serbestlik derecesinde direnç vermektedir. Bilateral veya unilateral olarak kullanılabilen bu sistemlerde hasta kuvvet ve endurans açısından sürekli izlenebilmektedir. Dolayısıyla sadece egzersiz amaçlı değil, klinik değerlendirme açısından da kullanılabilen sabit sistemlerdir.⁷

Aktif ayak ortezleri ayak bileği ve ayağı eksoskeletal olarak içine alan ve klasik kısa yürüme ortezlerinin gelişmiş şekilleridir. Yürüme anında ayak bileğindeki hareketleri kontrol etme, yürüme paternini düzeltme ve yetersiz hareketleri kompanze etme özelliğindedir. Deformitelere de düzeltici yönde kuvvetler uygulayabilmektedirler.⁷ İlk aktif ortez AFO yerine kullanmak üzere geliştirilmiş dorsi ve plantal fleksiyon ve inversiyon-eversiyon yaptırabilen iki serbestlik derecesinde robot olmuştur.³ Günümüzde Massachusetts Institute of Technology Active Ankle-Foot Orthosis (MIT-AAFO), Ankle Foot Orthosis-University of Dalaware (AFOUD), Robotic Gait Trainer (RGT), Yonsei University Active Ankle Foot Orthosis (Yonsei-AAFO) ve ülkemizden The Sabancı University Kinetostatically optimized Reconfigurable Parallel Interface on Ankle Rehabilitation (SUKORPION) olmak üzere çeşitli aktif ayak ortez örnekleri bulunmakla birlikte Massachusetts Institute of Technology tarafından geliştirilmiş olan Anklebot piyasaya sürülmüştür.⁷ Anklebot üç serbestlik derecesinde çalışan inme sonrası rehabilitasyon için daha çok tercih edilmektedir. Treadmil ve zeminde yürüyüşler için geliştirilmiş olur, dorsi-plantal fleksiyon, abduksiyon-adduksiyon ve inversiyon-eversiyon hareketlerini kontrol etme ve harekete yardımcı olma özelliğindedir. Yürüme paternini düzeltme ve yürüme mesafesini uzatma yönünde etkili olduğu rapor edilmektedir.^{3,7}

REHABİLİTASYON ROBOTLARININ GELECEĞİ

Bir mekatronik sistem olan rehabilitasyon robotları mekanizma, elektronik kontrolcü donanımı, yazılım ve sensörlerden meydana geldiğinden bu üniteler ve benzeri ilgili cihazlardaki teknolojik gelişmeler rehabilitasyon robotlarının da geleceğini etkileyecektir. Bilgisayar ve kontrolcü donanımların işlemci hızı, veri depolama kapasitesi, matematik işlem kapasitelerinin artması ve fiziksel boyutlarındaki değişiklikler de şüphesiz rehabili-

tasyon teknolojilerinin gelişiminin seyrine etki edecek unsurlar olacaktır.

Bu donanımları kontrol edecek olan yazılımlar da son derece önemlidir. Özellikle esnek, geliştirilmeye ve herkese açık programlama tekniklerinin geliştirilmesi ile bu teknolojiler daha geniş bir kitlenin kullanımını mümkün kılacaktır. Diğer yandan günümüzde eğlence ve eğitim amaçlı kullanılan sanal gerçeklik rehabilitasyonda da kendine yer bulacaktır.

Kablosuz haberleşmenin güvenli, hızlı ve ucuz olması ile hastalar “her yerde ve her zaman” tedavi anlayışı çerçevesinde daha hızlı ve zahmetsiz tedavi olabileceklerdir. Bu haberleşme metodları ile giyilebilir robotlar da önemli uygulama alanları bulabileceklerdir.

Diğer yandan daha kararlı, çevresel faktörlerden etkilenmeyen, yüksek performanslı, küçük boyutlu ve ucuz sensörler rehabilitasyon teknolojilerini ileri götürecektir. Tahrik elemanlarının boyutlarının küçülmesi, kontrollerinin kolaylaşması, güçlerinin artması ile mekanizmalar daha etkin hareket edebileceklerdir. Uzun ömürlü, yüksek performanslı, boyutları küçük olan, kolay, hatta uzaktan şarj edilebilme özelliğine sahip bataryalar geleceğin elektronik teknolojilerinde önemli kolaylıklar sağlayacaklardır.

Görüldüğü üzere teknoloji geliştikçe rehabilitasyon robotlarının sağladığı tedavi olanakları da artmakta ve çeşitlenmektedir. Ancak fizyoterapistlik mesleği sevk ve idaresi açısından akla ilk gelen soru “*Acaba ileride fizyoterapist rakip olabilirler mi?...*” Şüphesiz olamazlar, fakat fizyoterapistin emeğini, harcayacağı yükü azaltan, hareketlerin daha yoğun uzun süreli yapılması gerektiğinde bunu maliyeti de düşürerek yerine getiren araçlar olarak kabul görmektedirler. Fizyoterapistin çalışma alanlarını azaltacak, sınırlayacak bir sistem değildirler. Dolayısıyla, hastalara sunulan hizmet kalitesini arttıran bir sistem olarak rehabilitasyon içinde yerlerini alacaklardır.

KAYNAKLAR

1. Jezernik S, Schärer R, Colombo G, Morari M. Adaptive robotic rehabilitation of locomotion: a clinical study in spinally injured individuals. *Spinal Cord* 2003;41(12):657-66.
2. Reinkensmeyer DJ, Emken JL, Cramer SC. Robotics, motor learning, and neurologic recovery. *Annu Rev Biomed Eng* 2004;6:497-525.
3. Krebs HI, Dipietro L, Levy-Tzedek S, Fasoli SE, Rykman-Berland A, Zipse J, et al. A Paradigm Shift for Rehabilitation Robotics: Therapeutic Robots Enhance Clinician Productivity in Facilitating Patient Recovery. *IEEE Eng Med Biol Mag* 2008;27(4):61-70.
4. Pennycott A, Wyss D, Vallery H, Klamroth-Marganska V, Riener R. Towards more effective robotic gait training for stroke rehabilitation: a review. *J Neuroeng Rehabil* 2012;9(1):65.
5. Koceska N. Review: Robot devices for gait rehabilitation. *Int J Comput Appl* 2013;62(13):1-8.
6. Banala SK, Agrawal SK, Fattah A, Krishnamoorthy V, Hsu WL, Scholz J, et al. Gravity-balancing leg orthosis and its performance evaluation. *IEEE Trans Robot* 2006;22(6):1228-39.
7. Díaz I, Gil JJ, Sánchez E. Lower-limb robotic rehabilitation: literature review and challenges. *J Robot* 2011;11:1-11.

8. Lünenburger L, Colombo G, Riener R, Dietz V. Clinical assessments performed during robotic rehabilitation by the gait training robot Lokomat. Proc 2005 IEEE 9th Int Conf Rehabil Robot 2005;2005:345-8.
9. Bernhardt M, Frey M, Colombo G, Riener R. Hybrid force-position control yields cooperative behaviour of the rehabilitation robot LOKOMAT. Proc 2005 IEEE 9th Int Conf Rehabil Robot 2005;2005:536-9.
10. Manuscript A. After a Stroke 2013;25(4):369-77.
11. Brütsch K, Schuler T, Koenig A, Zimmerli L, - Koeneke SM, Lünenburger L, et al. Influence of virtual reality soccer game on walking performance in robotic assisted gait training for children. J Neuroeng Rehabil 2010;7:15.
12. Hong YW, King Y, Yeo W, Ting C, Chuah Y, Lee J, et al. Lower extremity exoskeleton: review and challenges surrounding the technology and its role in rehabilitation of lower limbs. Aust J Basic Appl Sci 2013;7(7):520-4.
13. Quintero HA, Farris RJ, Members MG. to Aid Walking in Paraplegic Individuals; 2012.
14. Kubota S1, Nakata Y, Eguchi K, Kawamoto H, Kamibayashi K, Sakane M, et al. Feasibility of rehabilitation training with a newly developed wearable robot for patients with limited mobility. Arch Phys Med Rehabil 2013;94(6):1080-7.
15. Akdoğan E, Demir MH. Rehabilitation Technologies: Biomechatronics Point of View. 2010;1-37.
16. Akdoğan E, Adli MA. The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: Physiotherobot. Mechatronics 2011;21(3):509-22.