



# Omurilik Yaralanmalarında Robotik Teknoloji: Üst Ekstremité

## Robotic Technology for Spinal Cord Injury: Upper Extremity

Berna ÇELİK

*Istanbul Fizik Tedavi Rehabilitasyon Eğitim ve Araştırma Hastanesi, İstanbul, Türkiye*

### Özet

Omurilik yaralanması etkilenen bireylerin yaşamlarında ani değişikliğe ve kalıcı fonksiyonel hareket kısıtlanmasına neden olmaktadır. Bu durumun uzun yıllar tedaviye yanıtı olmadığı düşünülmeyle beraber günümüzde yeni tedavi yöntemleri ile etkilenen bireylerin yaşam süreleri sağlıklı bireylere benzer düzeydedir. Tetraplejik olgularda üst ekstremité fonksiyonları yaşam kalitesini etkilemektedir. Günümüzde farklı tedavi seçenekleri ile birlikte robotlarla uygulanan tedavi programları giderek daha geniş yer almaktadır. Robot destekli rehabilitasyonda robotlar hareketi destekleyerek, hareketi zorlaştırarak, sanal gerçeklik uygulamalarının ilavesi veya beyin arayüz cihazları ile tedavi programlarında yer almaktadırlar. Bu makalede omurilik yaralanmasında üst ekstremitéde robotla rehabilitasyon uygulamalarının tedavi sırasındaki ve sonrasındaki etkileri, yan etkileri ile ilgili konular güncel bilgiler eşliğinde ele alınacaktır. **Anahtar Kelimeler:** Omurilik yaralanması, robot, rehabilitasyon, üst ekstremité

### Abstract

Spinal cord injury brings a sudden change in the lives of the affected individuals and causes permanent functional motor limitations. Although this condition has been believed to be refractory to treatment for many years, the life expectancy of affected individual is comparable to that of healthy individuals with the application of new treatment methods. Upper extremity function in tetraplegic patients affects the quality of life. Currently, the use of robots has increased for different treatment alternatives. Robot-mediated rehabilitation includes robot assistance, robotic perturbation, adding virtual reality to robot-mediated therapy, and interfacing the brain with a robotic device. The effects of upper extremity robotic rehabilitation, during and following treatment, and their side effects will be discussed along with currently available literature.

**Keywords:** Spinal cord injury, robot, rehabilitation, upper extremity

### Giriş

Travmatik omurilik yaralanması kişilerin yaşamında ani bir değişime neden olup, kalıcı fonksiyonel hareket kısıtlanması sonucu yaşamını bağımsız sürdürmesini ve yaşam kalitesini etkilemekte, toplu temelinde sağlık hizmetleri ve ekonomik yönüyle önemli etkileri olmaktadır (1,2). Santral sinir sisteminin bu ani hasarının, uzun yıllar boyunca tedaviye dirençli olduğu düşünülmeyle birlikte, son 30 yılda iyileşme mekanizmalarının ve nöral yolların reorganizasyonunun anlaşılmasına başlanması ile bu görüş değişmektedir (3).

Omurilik yaralanmasında, kaslar ile santral sinir sistemi arasında, omurilik düzeyinde, nörotransmisyon kısmen ya da tamamen kesintiye uğramaktadır. Beyinden ya da çevre dokulardan gelen iletilenemekte ve amaca yönelik hareketler tam olarak oluşturulamamaktadır. Bu düzeyde hasarın ideal tamiri rejenerasyondur. Lezyonun ciddiyetine göre motor, duysal ve otonomik fonksiyonlar, kendiliğinden geri dönebilir veya belli bir düzeyde iyileşme gösterebilir (4).

Günümüzde, spontan iyileşmeye rehberlik yapabilen ve destekleyen bazı tedaviler mevcuttur. Bu tedaviler sırasıyla: kısıtlayıcı

**Yazışma Adresi / Address for Correspondence:** Dr. Berna Çelik, İstanbul Fizik Tedavi Rehabilitasyon Eğitim ve Araştırma Hastanesi, İstanbul, Türkiye. Tel: +90 532 516 66 08 E-posta: celikbe@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: Şubat/February 2015 Kabul Tarihi/Accepted: Mart/March 2015

©Copyright 2015 by Turkish Society of Physical Medicine and Rehabilitation - Available online at www.ftdrgjsi.com  
©Telif Hakkı 2015 Türkiye Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon Demeği - Makale metnine www.ftdrgjsi.com web sayfasından ulaşılabilir.

Cite this article as:

Çelik B. Robotic Technology for Spinal Cord Injury: Upper Extremity. Turk J Phys Med Rehab 2015;61(Supp. 1):S32-S36.

zorunlu hareket tedavisi, robot destekli tedaviler, amaca yönelik tedavi, farmakolojik tedaviler (Örn; selektif serotonin geri alım inhibitörleri), epidural spinal stimülasyon, non-invaziv kortikal stimülasyon ve bunların bir arada kullanıldığı tedavi şekillerini içermektedir (3).

Rehabilitasyonda amaç; kalan kas kuvvetinin kontrolünü iyileştirmek, fonksiyonu ve yaşam kalitesini arttırmaktır. Etkilenen ekstremitayı kullanarak yapılan tekrarlayıcı, progresif ve zorlayıcı uygulamalar nöral bağlantılarda plastik değişiklikleri uyarak motor kontrol ve öğrenmeyi desteklemektedir. Fonksiyonel, yapısal-anatomik ve nörofizyolojik süreçleri kapsayan bu değişikliklerin tamamı nöroplastisite olarak tanımlanır. Lezyon seviyesinden ve omurilik hasarının komplet veya inkomplet olmasından bağımsız olarak plastik değişiklikler nörsis boyunca bulunabilir. Bu değişiklikler; etkilenmemiş nöronal yolların özelliklerinde değişiklikleri, etkilenmemiş ve hasarlı aksonda kollateral filizlenmeyi ve sinaptik yeni düzenlemeleri içermektedir (4).

Nörolojik iyileşmenin en hızlı olduğu dönem yaralanmadan sonraki ilk 3 ay olup, fonksiyonel iyileşme 6-12 aya kadar devam etmektedir. Başlangıçta duysal ve motor komplet olan omurilik yaralı bireyler nörolojik ve fonksiyonel iyileşme açısından en düşük potansiyele sahip olmalarına karşın, başlangıçta motor inkomplet olan bireyler tekrar anlamlı bir ambülasyon fonksiyonunu kazanma olasılığına sahiptirler. Servikal omurilik ciddi yaralanmalı bireylerde kavrama fonksiyonunun bilateral kaybı yaralanma sonrası kişinin bağımsız yaşama ve bir işte çalışma imkanını sınırlamaktadır.

Bu nedenle bu hastalarda öncelik, kavrama ve uzanma fonksiyonunu yeniden kazanmaktır. Eğer dirsek seviyesinin distalinde yeterli istemli kas kontrolü varsa tendon ve kas transferleri, tenodes ve artrodez gibi cerrahi girişimler anlamlı kavrama fonksiyonu kazanmak için başarı ile uygulanabilir. Eğer dirsek seviyesinin altında yeterli kas fonksiyonu bulunmuyor veya kişi cerrahi tedaviyi kabul etmiyorsa fonksiyonel elektriksel stimülasyon temelli kavrama protezleri üst ekstremita fonksiyonunu kazanmada bir seçenek olabilir. İstemli üst ekstremita kas kontraksiyonu olmayan ciddi omurilik yaralanmalı bireylerin bilgisayar, internet ve sosyal medyaya erişimini sağlayan yardımcı cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar bireyin kalan fonksiyonlarına göre bilgisayar kumandalı, ağız, ses veya göz kontrollü olabilmektedir. Solunum yardımcı cihazına ihtiyaç olan ve bu teknolojilerin kullanımının zor olduğu durumlarda kullanılabilen yeni ileri teknoloji bilgisayar destekli arayüz cihazları ile ilgili çalışmalar devam etmektedir (5).

Rehabilitasyon tedavi programlarında teknolojinin ilerlemesi ile birlikte robotlar yer almaya başlamaktadır. Robotlar hareketin istenildiği kadar tekrarlanmasını sağlayabilmektedir. Uygun hastalarda robot yardımcı tedavi sırasında, belirlenen hareketler destek ile tamamlanabilmekte ve uygulayan kişi bunu gözlemleyebilmektedir. Bu nedenle robotla tedaviler aynı zamanda hastanın tedaviye motivasyonunu da arttırabilmektedir.

Robot destekli tedavi, uygulama şekillerine göre dört ana başlık altında toplanmaktadır (Tablo 1). Farklı etiyojilere dayanmalarına rağmen, omurilik yaralanması ve inme olguları benzer şekilde

**Tablo 1. Robot destekli rehabilitasyon uygulamaları**

1-	Robot destekli tedavi
2-	Robot yardımıyla hareketin zorlaştırılması
3-	Robot destekli tedaviye sanal gerçekliğin ilave edilmesi
4-	Beynin bir arayüz ile robotik cihaza bağlanması

kortikal reorganizasyon mekanizmaları ile iyileşme göstermektedirler. Bu nedenle robotlarla yapılan farklı tedavi uygulama sonuçları genellikle inme ve omurilik yaralı hastalarla birlikte ele alınmaktadır (3,6).

### **Robot Desteği**

Robot desteği ile tedavide hareketi yapamayan hastaya ya robot hareketi yaptırır ya da robot harekete yön verir. Yapılan çalışmalarda, sağlıklı bireylerde robot destekli el bileği hareketi veya el kavraması nöral kortikal bağlantılarda istemli harekete göre veya el kavramasına göre farklı aktivitelere neden olduğu gösterilmiştir (3,7,8). Ayrıca robot destekli tek taraflı el bileği hareketi, istemli el bileği hareketine katılan kontralateral kortikal alanlarda alpha ve beta dalgalarını değiştirmektedir (3,7). Bu nedenle aktif istemli ve görünüşte pasif robot destekli motor hareketler benzer beyin bölgelerini aktive etmektedir (3).

Nöroplastisitenin zorlayıcı ve progresif motor öğrenme ile güçlendiği, buna karşın sadece repetitif motor eylem öğrenmenin ilki kadar etkili olmadığı kabul edilmektedir (3). El bileğinde aktif motor öğrenme ile; 1. Kontralateral primer motor korteks aktivitesinde, 2. Motor eksitabilite katılım eğrilerinde, ve 3. Pasif motor öğrenmeye göre intrakortikal fasilitasyonda daha belirgin artış olduğu gösterilmiştir (3,9).

İnme ile yapılan robotla tedavide kanıtlar, robot destekli tedaviden sonra beyin bağlantılarının reorganizasyonunun gerek bölgesel aktivasyon ve gerekse interhemisferik ve intrahemisferik fonksiyonel bağlantılar anlamında mümkün olduğunu desteklemektedir (3,10,11).

### **Robotik Hareketin Zorlaştırılması**

Robotla tedavi programının bu uygulamasında belli bir hedef hareketi yaparken hareketin, uygulanan eksternal bir kuvvet ile bozulması yapılmasını zorlaştırmaktadır. Hareketin zorlaştırılması eğitimin yoğunluğunu artırarak daha fazla öğrenme uyarısı oluşturabilir. Ancak diğer taraftan hareketin çok zorlaştırılması, öğrenme sürecini bozabilir (3).

Genel bir uygulama robot destekli güç alanlarının uygulanarak kol hareketinin bozulmasını ve kişinin buna adaptasyonunu düzenlemektedir. Bu adaptasyon süreçlerinde kortikostriatal nöral aktivasyonda ve kısa aralıklarla intrakortikal inhibisyon ve fasilitasyonun eşlik ettiği kortikal uyandırılabilirlikte değişikliklerin varlığı gösterilmiştir (3,12,13).

Hareketin zorlaştırılması sağlıklı motor sistemin adaptasyonunu uyarmaktadır. Uygulanan bireylerde bozulan harekete cevap olarak reaktif geri bildirim düzeltmeleri olmaktadır. Adaptasyon hızlı bir süreç olup, aynı hareketi tekrarlayarak sağlanan öğrenmeden farklıdır (3,14). Tekrarlayarak yapılan öğrenmede kullanıma bağlı

nöroplastisite söz konusu iken, adaptasyonda serebellar hata-temelli öğrenme söz konusudur (3,15). Adaptasyonda kortikostriatal aktivasyondan kortiko-serebellar aktivasyona yönelme olmaktadır (3,13,16). Nöral bağlantılardaki aktivasyon kayması değişimi dinlenme dönemlerinde de devam etmektedir (3,17). Bu durum motor-hafıza konsolidasyon sürecinin varlığını desteklemektedir (nöroplastisite). Ön çalışmalar hata augmentation stratejisine dayalı öğrenmenin üst ekstremitte rehabilitasyonuna ilave edilmesinin kronik inmeli hastalarda faydalı olabileceğini desteklemektedir (3,18,19).

### Robot Destekli Tedaviye Sanal Gerçekliğin İlavesi

Sanal gerçeklik bilgisayar ortamında simüle edilen durumların görsel tecrübenmesi esasına dayanmaktadır (Resim 1). Bu durum hareketlerin ödüllendirilmesinin canlandırılmasında son derece uygun bir imkan sağlamaktadır. Beyindeki ödül bölgelerinin hayvan modellerinde dopaminejik yolları aktive ettiği düşünülmektedir (3,20).

Son çalışmalar sağlıklı bireylerde motor öğrenmeye katılan primer motor korteksin başarılı davranışın ödüllendirilmesine yanıt verdiğini desteklemektedir. Ödüllendirme motor hafızanın uzun sürmesine karşın cezalandırma ile kısa sürdüğü görülmüştür. Bu nedenle doğru hareket sekansları için sanal gerçeklik ile ödül sinyallerinin eşleştirildiği stratejiler klinik fayda sağlayabilirler (3,21,22).

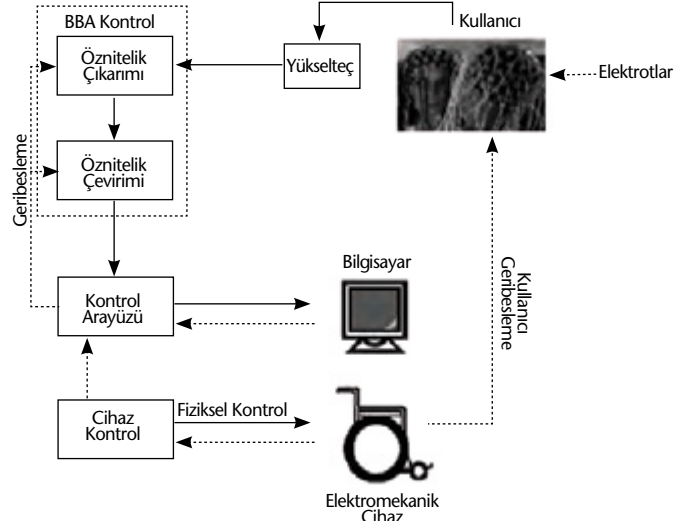
### Robotik Cihaz ile Beyin Sinyallerini Arayüz ile Eşleştirme

Düşünceleri kullanarak bilgisayarlarla etkileşim olarak tanımlanabilir. Beyin arayüz cihaz teknolojisinin amacı eksternal cihazlar ile beyin arasında bir bağlantı sağlayıp hızlı ve daha etkin bir iletişim ile inme, omurilik yaralanması, uzun ampütasyonu gibi durumlarda bireylerin kontrolünü arttırmayı hedefleyen teknolojidir (3). Şekil 1, beyin bilgisayar arayüz eşleşmesinin şemasını göstermektedir (23). Bu teknolojinin hem yardımcı teknoloji hem de rehabilitasyon aracı olarak kullanılması hedeflenmektedir. Omurilik yaralanmasında kullanımlarının temel odağı yüksek yaralanma seviyesi olan bireylerde yardımcı veya alternatif kanal olarak iletişimlerini ve çevresel kontrollerini arttırmaktır. Üst ekstremitte nöroprotezler ile birlikte kombine kullanımları gelecek vaat etmektedir. Ancak eğitimleri sırasında gelişebilecek yan etkileri yönünden (Örn; nöropatik ağrı gibi) ileri çalışmalara ihtiyaç vardır (3,5,24).

Omurilik yaralanmasında üst ekstremitte geliştirilen ve uygulanan robotik teknolojiler ile ilgili Cortes ve ark.larının (25) yaptığı çalışmada 10 kronik travmatik tetraplejik omurilik yaralı hasta 6 hafta süreli el bileği robot eğitim programına alınarak (1 saat/gün, 3 defa/hafta) takip edilmiştir. Bu makalede çalışmaya alınma kriterleri ekstansör karpı radialis kas gücü 1-4/5, yaralanma süresi >1 yıl, en az 1 saat dik pozisyonda oturmayı tolere edebilen ve robotlu tedavi protokolünü anlayıp uyum gösterebilen hastalar çalışmaya alınmışlardır. Çalışmada dışlama kriterleri progresif nörodejeneratif hastalığı olan, eşlik eden kafa travması veya inme varlığı, etkilenen tarafta kontrol edilemeyen ağrı veya egzersiz intoleransı, ileri düzeyde hareket kısıtlılığı, irreversible kas kontraktürü, medikal olarak instabil olanlar, santral sinir sistemi-ne etki eden ilaç kullanımı, transkranyal manyetik stimülasyonun



Resim 1. Sanal gerçeklik ve robotla üst ekstremitte rehabilitasyonu



Şekil 1. Beyin bilgisayar arayüzü şeması

kontrendike olduğu olan hastalar (geçmiş nöbet veya epilepsi öyküsü, beyinde metal implant varlığı, pacemaker varlığı, gebelik) olarak belirlenmiştir (25).

InMotion 3.0 wrist robotu ile el bileği fleksiyon-ekstansiyon, abduksiyon-adduksiyon, pronasyon-supinasyon hareketlerini desteksiz, güç uygulayarak veya dirence karşı, haftada 3 gün, 6 hafta süre ile toplam 18 seans olarak uygulamışlardır. Tedavi programları maksimum 1 saat çalışma, her adaptif tedavi rejimi arasında 1 dakika dinlenme, toplam maksimum 1000 hareket olarak planlanmıştır. Olguların takip sonuçları motor performansın kinematik ölçümü, klinik sonuç ölççekleri transkranyal manyetik stimülasyon ile belirlenen nörofizyolojik sonuç ölççekleri ile değerlendirilmiştir. Motor performansın kinematik ölçümü hareketin; 1. Amacı, 2. Harekette sapma, 3. Ortalama hız, 4. Tepe hız, 5. Hareketin yumuşaklığı, 6. Hareketin süresi değerlendirilmiştir. Klinik sonuç ölççekleri ile; 1. Üst ekstremitte motor skoru, 2. Modifiye Ashworth skalası ve 3. Vizüel analog skala ile ağrı sonuçları takip edilmiştir. Bu çalışmadaki nörofizyolojik sonuç ölççekleri ise transkranyal manyetik stimülasyon ile belirlenen: 1. İstirahat

motor eşik değeri, 2. Motor uyarılmış potansiyel amplitüd ve istirahat latansını, 3. Motor uyarılmış potansiyel fasilitasyonunu kapsamaktadır. Sonuç olarak 6 haftalık robotla tedavi sonrasında hareketin amaca ulaşması ve yumuşaklığında anlamlı iyileşme bulunmuştur. Buna karşın hareketin deviasyonunda, ortalama ve tepe hızlarında ve hareketin süresinde değişim bulunmamıştır. Tedavi alan ve almayan üst ekstremitte motor skorlarında anlamlı bir güçlenme görülmemiştir. Tedavi sonrası değerlendirilen dört üst ekstremitte kasının spastisite düzeylerinde değişim görülmemiş olup, ağrı düzeyleri de tedavi sonrası değişmemiştir. Transkraniyal manyetik stimülasyonla incelenen nörofizyolojik parametrelerde anlamlı bir değişim bulunmamıştır (25).

Yazarlar çalışmanın az sayıda hasta ile yapılmış olması, kontrol grubunun olmaması, inme çalışmalarında robotla üst ekstremitte eğitimlerinin daha fazla seans sayısı yapılmasına karşın bu çalışmada seans sayısının yetersiz olabileceğini çalışmanın sınırlamaları olarak değerlendirmişlerdir. Ancak omurilik yaralı bireylerin robotla üst ekstremitte eğitimlerine hasta uyumunun iyi ve uygulamanın kontrol edilebilir bir ortamda hastalar açısından güvenli olduğu ifade edilmektedir (25).

Yozbatiran ve ark.ları (26) 28 yaşında kadın, 29 ay önce inkomplet omurilik yaralanması olan (C2 AIS C) üst ekstremitte robotla eğitim programına aldıkları bir olguyu yayınlamışlardır. MAXI Exo-II cihazı ile hasta pasif, aktif-asistif ve dirence karşı olacak şekilde 3 ayrı modda 4 hafta süre ile 12 x 3 saat tedaviye alınmıştır. Tedavide amaç tek eklem egzersizi ile hastanın gücünü ve eklem hareket açıklığını arttırmaktır. Sonuç ölçekleri Action Research Arm Test, Jebsen-Taylor Hand Function Test ve AIS-üst ekstremitte motor skoru olarak belirlenmiştir. Uygulamanın güvenliği ise yorgunluk, ağrı ve rahatsızlık hissi olarak 5 puanlı skalada değerlendirilmiştir. Sonuç olarak sol el ve kolda gelişme olmasına rağmen, sağ el ve kol fonksiyonunda değişim belirlenmemiştir. Uygulamanın yan etkisi olarak değerlendirilen artmış ağrı, yorgunluk ve rahatsızlık bulunmamıştır. Bu olgu sunumunda üst ekstremitte robotla rehabilitasyonu uygulanabilir, güvenli ve etkin olarak değerlendirilmiştir (26).

Nörolojik hasarların tedavi ve takibinde robotla yapılan tedavilere ilgi giderek artmaktadır. Ancak bu uygulamaların olası yan etkileri ve bilinmeyenleri konusunda boşluklar mevcuttur. Robotla tedavilerde gelecekte aydınlatılması gereken konular özetle (3):

1. Robotla yapılan tedavinin nöral bağlantılar ve nöroplastisite üzerine etkileri bilinmemektedir,
2. Robotla yapılan tedavide hareketi zorlaştırmanın nörolojik hastalardaki nöroplastisite üzerine etkileri bilinmemektedir. Bu tedavinin nörolojik hastalıklarda klinik sonuçlar ile korelasyonunun araştırılmasına ihtiyaç vardır,
3. Robot temelli motor adaptasyonda motivasyon/ödülün nöroplastisite üzerine etkileri bilinmemektedir. Bu konuda yeni araştırmalara ihtiyaç vardır,
4. Beyin arayüz cihazları ile oluşan beyindeki reorganizasyonun inhibisyona veya araya girerek yeni uygulamaları öğrenmeyi etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle uzun süreli

tekrar, ilgili nöronların yeni hareketleri öğrenmesine direnç oluşturabilir (3).

Sonuç olarak, omurilik yaralı bireylerde yaşam süresi beklentisi arttıkça, yaşam kalitesi ve rehabilitasyon tedavi programları giderek önem kazanmaktadır. Teknolojik gelişmeler bu alanda yeni tedavi imkanlarını da beraberinde sunmaktadır (27). Omurilik yaralanmasında yeni tedavi metodları arasında robotlar giderek artan bir yer almaya başlamıştır. Özellikle ileri teknoloji görüntüleme yöntemlerinin, mevcut robotların çeşitliliğinin ve teknolojik özelliklerinin gelecekte artarak devam edecek olması bu tedavi metodunun özellikle nöroplastisite üzerine etkilerini daha iyi anlamamızı sağlayacaktır. Gelecekte kişiye özel tekrarlanabilir ve standardize edilebilir kombine tedaviler giderek daha önem kazanacaktır.

**Hakem değerlendirmesi:** Bu makale Editörler Kurulu'nun davetiyle hazırlanmış ve bilimsel değerlendirmesi Editörler Kurulu tarafından yapılmıştır.

**Çıkar Çatışması:** Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

**Finansal Destek:** Yazar bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir.

**Peer-review:** This manuscript was prepared by the invitation of the Editorial Board and its scientific evaluation was carried out by the Editorial Board.

**Conflict of Interest:** No conflict of interest was declared by the author.

**Financial Disclosure:** The author declared that this study has received no financial support.

## Kaynaklar

1. Celik B, Gultekin O, Beydogan A, Caglar N. Domain-specific quality of life assesment in spinal cord injured patients. *Int J Rehabil Res* 2007;30:97-101. [CrossRef]
2. Unalan H, Celik B, Sahin A, Caglar N, Esen S, Karamemetoglu SS. Quality of life after spinal cord injury: The comparison of the SF-36 health survey an its spinal cord injury-modified version in assessing the health status of people with spinal cord injury. *Neurosurg Q* 2007;17:175-9. [CrossRef]
3. Turner DL, Ramos-Murguialday A, Birbaumer N, Hoffman U, Luft A. Neurophysiology of robot-mediated training and therapy: a perspective for future use in clinical populations. *Front Neurol* 2013;4:184. [CrossRef]
4. Onifer SM, Smith GM, Fouad K. Plasticity after spinal cord injury: relevance to recovery and approaches to facilitate it. *Neurotherapeutics* 2011;8:283-93. [CrossRef]
5. Rupp R. Challenges in clinical applications of braincomputer interfaces in individuals with spinal cord injury. *Front Neuroeng* 2014;7:38. [CrossRef]
6. Bui T, Sprigle S, Backus D. Upper extremity robotic therapy for individuals with spinal cord injury. Available from: <https://smartech.gatech.edu/bitstream/1853/14739/7/handout.pdf>. 2007.
7. Formaggio E, Storti SF, Galazzo IB, Gandolfi M, GeroinC, Smania N, et al. Modulation of event-related desynchronization in robot-assisted hand performance: brain oscillatory changes in active, passive and imagined movements. *J Neuroeng Rehabil* 2013;10:24. [CrossRef]

8. Novakovic V, Sanguineti V. Adaptation to constant-magnitude assistive forces: kinematic and neural correlates. *Exp Brain Res* 2011;209:425-36. [\[CrossRef\]](#)
9. Lotze M, Braun C, Birbaumer N, Anders S, Cohen LG. Motor learning elicited by voluntary drive. *Brain* 2003;126:866-72. [\[CrossRef\]](#)
10. Takahashi CD, Der-Yeghiaian L, Le V, Motiwala RR, Cramer SC. Robot-based hand motor therapy after stroke. *Brain* 2008;131:425-37. [\[CrossRef\]](#)
11. Sergi F, Krebs HI, Groissier B, Rykman A, Guglielmelli E, Volpe BT, et al. Predicting efficacy of robot-aided rehabilitation in chronic stroke patients using an MRI robotic device. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2011;2011:7470-3. [\[CrossRef\]](#)
12. Hunter T, Sacco P, Turner DL. Changes in excitability of the motor cortex associated with internal model formation during intrinsic visuomotor learning in the upper arm. *J Behav Brain Sci* 2011;1:140-52. [\[CrossRef\]](#)
13. Krebs HI, Brashers-Krug T, Raush SL, Savage CR, Hogan N, Rubin RH, et al. Robot-aided functional imaging application to a motor learning study. *Human Brain Mapp* 1998;6:59-72. [\[CrossRef\]](#)
14. Huang VS, Haith A, Mazzoni P, Krakauer JW. Rethinking motor learning and savings in adaptation paradigms model free memory for successful actions combines with internal models. *Neuron* 2011;70:787-801. [\[CrossRef\]](#)
15. Rabe K, Livne O, Gizewski ER, Aurich V, Beck A, Timmann D, et al. Adaptation to visuomotor rotation and force field perturbations correlated to different brain areas in patients with cerebellar degeneration. *J Neurophysiol* 2009;101:1961-71. [\[CrossRef\]](#)
16. Doyon J, Bellec P, Amsel R, Penhune V, Monchi O, Carrier J, et al. Contribution of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behav Brain Res* 2009;199:61-75. [\[CrossRef\]](#)
17. Shadmehr R, Holcomb HH. Neural correlates of motor memory consolidation. *Science* 1997;277:821-5. [\[CrossRef\]](#)
18. Patton JL, Stoykov ME, Kovic M, Mussa-Ivaldi FA. Evaluation of robotic training forces that either enhance or reduce error in chronic hemiparetic stroke survivors. *Exp Brain Res* 2006;168:368-83. [\[CrossRef\]](#)
19. Abdollahi F, Case Lazzaro ED, Listenberger M, Kenyon RV, Kovic M, Bogey RA, et al. Error augmentation enhancing arm recovery in individuals with chronic stroke: a randomized crossover design. *Neurorehabil Neural Repair* 2014;28:120-8. [\[CrossRef\]](#)
20. Hosp JA, Pekanovic A, Rioult-Pedotti MS, Luft AR. Dopaminergic projections from midbrain to primary motor cortex mediate motor skill learning. *J Neurosci* 2011;31:2481-7. [\[CrossRef\]](#)
21. Kapogiannis D, Campion P, Grafman J, Wassermann EM. Reward-related activity in the human motor cortex. *Eur J Neurosci* 2008;27:1836-42. [\[CrossRef\]](#)
22. Abe M, Shambra H, Wassermann EM, Luckenbaug D, Schweighofer N, Cohen LG. Reward improves long-term retention of a motor memory through induction of offline memory gains. *Curr Biol* 2011;21:557-62. [\[CrossRef\]](#)
23. Argunşah AÖ. Beyinden bilgisayara bir yol: beyin bilgisayar arayüzü. Available from: [www.emo.org.tr/ekler/a130f1dc6f0c829\\_ek.pdf?dergi=429](http://www.emo.org.tr/ekler/a130f1dc6f0c829_ek.pdf?dergi=429)
24. Wang W, Collinger JL, Perz MA, Tyler-Cabara EC, Cohen LG, Birbaumer N, et al. Neural interface technology for rehabilitation: exploiting and promoting neuroplasticity. *Phys Med Rehabil Clin N Am* 2010;21:157-78. [\[CrossRef\]](#)
25. Cortes M, Elder J, Rykman A, Murray R, Avedissian M, Stampa A, et al. Improved performance in chronic spinal cord injury. *NeuroRehabilitation* 2013;33:57-65.
26. Yozbatiran N, Beriner J, O'Malley MK, Pehlivan AU, Kadivar Z, Boake C, et al. Robotic training and clinical assessment of upper extremity movements after spinal cord injury: a single case report. *J Rehabil Med* 2012;44:186-8. [\[CrossRef\]](#)
27. Celik B, Ones K, Celik EC, Bugdayci DS, Paker N, Avci C, et al. The effects of using the Internet on the health-related quality of life in people with spinal cord injury: a controlled study. *Spinal Cord* 2014;52:388-91. [\[CrossRef\]](#)