



Derleme

DOI: 10.5137/1019-5157.TND.3347

Geliş Tarihi: 12.03.2024
Kabul Tarihi: 19.08.2024

Spinal Kord Yaralanmasında Yeni Nöroteknolojiler

New Neurotechnologies in Spinal Cord Injury

Giray GÜNEŞ, İsmail ŞİMŞEK

Tarsus Devlet Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği, Mersin, Türkiye

Yazışma adresi: Giray GÜNEŞ ✉ giraygun@gmail.com

ÖZ

Spinal kord yaralanması (SKY), genellikle yıkıcı motor, duysal ve otonom bozukluklara yol açan önemli bir klinik sorun olarak devam etmektedir. Son yıllarda, SKY'li bireylerde fonksiyonu geri kazanmayı ve iyileşmeyi teşvik etmeyi amaçlayan nöroteknolojilerde dikkate değer ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu derlemede, epidural elektrik stimülasyonu, intraspinal mikrostimülasyon ve beyin-bilgisayar arayüzleri üzerine odaklanarak, SKY tedavisi için son dönem nöroteknolojilerinin derinlemesine bir incelemesi sunulacaktır.

Bu derleme her bir modalitenin etki mekanizmaları, ilişkili zorlukları ve gelecek yönlerini vurgulayarak, bu güncel yaklaşımları SKY'li hastaların bakımını geliştirmek ve etkilenen bireyler için sonuçları iyileştirmek için gösterebileceği potansiyeli ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu modaliteler haricinde günümüzde güncel pratikte kullanımı olan spinal kord stimülasyonu (SCS) tedavisine de değinilecektir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Spinal kord yaralanması, Fonksiyonel nöroşirürji, Spinal kord stimülasyonu

ABSTRACT

Spinal cord injury (SCI) continues to persist as a significant clinical challenge, often leading to devastating motor, sensory, and autonomic impairments. In recent years, notable advancements have been made in neurotechnologies aimed at promoting function recovery and healing in individuals with SCI. This review will provide an in-depth examination of recent neurotechnologies for SCI treatment, focusing on epidural electrical stimulation, intraspinal microstimulation, and brain-computer interfaces.

By highlighting the mechanisms of action, associated challenges, and future directions of each modality, this review aims to demonstrate the potential of these current approaches to enhance care for SCI patients and improve outcomes for affected individuals. Additionally, spinal cord stimulation (SCS), which is already in current practical use, will also be discussed.

KEYWORDS: Spinal cord injury, Functional neurosurgery, Spinal cord stimulation

■ GİRİŞ

Spinal kord yaralanması (SKY), milyonlarca insanı etkileyen ve derin fiziksel ve psikolojik sonuçlara yol açan önemli bir küresel sağlık sorunudur. Geleneksel tedaviler genellikle semptomları yönetmeye ve daha fazla yaralanmayı önlemeye odaklanmıştır. Ancak, son yıllarda, nöroteknolojilerdeki ilerlemeler SKY'li bireyler için yeni umutlar sunmaktadır. Bu makale, SKY tedavisi için nöroteknolojilerdeki son gelişmeleri

inceleyerek, işlem mekanizmalarını, zorlukları ve gelecek yönlerini gözden geçirecek ve günümüzde yaygın kullanımı olan spinal kord stimülasyonuna (SKS) da yönelik bir özet sunmayı amaçlamaktadır.

SKY Tedavisinde Mevcut Nöroteknolojiler

Günümüzde güncel pratikte kullanımı olan spinal kord stimülasyonu (SKS), bazı durumlarda spinal kord yaralanması (SKY)

olan hastalarda çeşitli semptom ve komplikasyonların yönetimi için bir tedavi yöntemi olarak kullanılmaktadır. SKS daha çok nöropatik ağrı tedavisiyle ilişkilendirilse de, SKY hastalarında belirli semptomların ve komplikasyonların yönetimi için de kullanılabilir. Özellikle, SKS şu amaçlarla SKY hastalarında kullanılabilir (5,6,9,10,13,15):

- 1. Motor Fonksiyonlarda Düzeltme:** SKS, spinal kordda uygulanan elektriksel stimülasyonun, kalıcı sinir yollarını aktive etmeye yardımcı olarak kas kontrolü ve hareketin iyileştirilmesine neden olabileceği araştırılmaktadır. Yeni gelişmekte olan teknolojiler kapsamında bu konu epidural stimülasyon başlığı altında detaylandırılacaktır.
- 2. Mesane ve Bağırsak Sorunlarının Yönetimi:** SKY genellikle sinir yollarının bozulması nedeniyle mesane ve bağırsak sorunlarına yol açar. SKS, bu yolları modüle etmek için bir yöntem olarak incelenmiştir ve mesane ve bağırsak fonksiyonunu iyileştirebilir ve idrar retansiyonu, idrar kaçırma ve kabızlık gibi semptomları azaltabilir.
- 3. Spastisite Yönetimi:** Spastisite, SKY'nin yaygın bir komplikasyonudur ve istemsiz kas kasılmaları ile karakterizedir. SKS, SKY hastalarında spastisiteyi yönetmek için bir tedavi seçeneği olarak araştırılmış ve bazı kanıtlar, spastisiteyi azaltabileceğini ve genel kas fonksiyonunu ve hareketliliği iyileştirebileceğini öne sürmektedir.
- 4. Duyusal Fonksiyonun Restorasyonu:** Bazı durumlarda, SKS, SKY olan kişilerde duyu fonksiyonu geri kazanmak için kullanılabilir. Spinal kordun belirli bölgelerine elektriksel stimülasyon uygulayarak, SKS, sinir yollarını aktive edebilir ve yaralanma seviyesinin altında duyu algıyı iyileştirebilir.

SKY Tedavisinde Yeni Gelişmekte Olan Nöroteknolojiler

Son yıllarda, SKY tedavisi için nöroteknolojilerin gelişiminde hızlı bir ilerleme kaydedilmiştir. Bunlar arasında şu teknolojiler sayılabilir (2,3,4,7,18):

Epidural Elektrik Stimülasyonu (EES)

Epidural elektrik stimülasyonu, epidural elektrotlar aracılığıyla omurilikte elektrik impulslarının iletilmesini içerir. EES'nin işlem mekanizması iki yönlüdür: İlk olarak, elektrik stimülasyonu, yaralanma bölgesinin altında kurtulan nöral yolları uyarak motor ve duyu fonksiyonları geri kazanır. İkinci olarak, EES, sinaptik nöroplastisiteyi ve nöral rejenerasyonu teşvik ederek omuriliğin uyarılabilirliğini modüle eder. Lokomotor devreleri aktive ederek ve duyu geribildirimini kolaylaştırarak, EES, koordineli kas aktivasyonunu ve istemli hareketi sağlar, böylece yürüme yeteneğinde ve fonksiyonel bağımsızlıkta iyileşmelere yol açar.

Intraspinal Mikrostimülasyon (ISMS)

Intraspinal mikrostimülasyon, omurilik içindeki belirli omurilik devrelerini hedef alarak mikroelektrotlar aracılığıyla gerçekleştirilir. ISMS'nin işlem mekanizması, omurilik içindeki motor nöronları ve ara nöronları doğrudan uyarak, yaralanma bölgesini atlayarak motor fonksiyonu geri getirir. Hedeflenen nöral popülasyonlara hassas desenlerde elektriksel stimülasyon sağlayarak, ISMS, koordineli kas kasılmalarını tetikleyebilir ve

istemli hareketler üretebilir. Ayrıca, ISMS, nöral uyarılabilirliği modüle edebilir ve nöral plastisiteyi teşvik ederek, SKY'li bireylerde motor fonksiyonun ve yürüme yeteneğinin iyileştirilmesini kolaylaştırabilir.

Epidural Elektriksel Uyarım (EES) ve İntraspinal Mikrostimülasyon (ISMS), SKY tedavisinde kullanılan iki nöroteknolojik yaklaşım olmasına rağmen, birkaç temel yönleriyle farklılık gösterirler:

- 1. Uyarım Yeri:** EES; hedeflenen bölgede epidural boşluğa elektriksel impulsların iletilmesini içerir. ISMS ise spinal kord içerisine yerleştirilmiş mikroelektrotlar kullanılarak belirli spinal kord devrelerinin doğrudan hedeflenmesini içerir.
- 2. Uyarım Derinliği:** EES'de spinal kordun dorsalinde bulunan dorsal kökler, dorsal kolonlar ve dorsal boynuz nöronları gibi sinir yapılarını uyandır. ISMS'de ise spinal kordun daha derinlerinde bulunan, motor nöronlar, internöronlar ve belirli sinir yollarını uyandır.
- 3. Aktivasyon Alanı:** EES'de spinal kordun hem duyu hem de motor yollarını içeren geniş bir sinir devrelerini ve yolunu aktive eder. Multiple kord seviyesini etkileyebilir. ISMS'de ise spesifik sinir popülasyonlarını ve devrelerini daha hassas ve hedefli bir şekilde aktive ederek, motor fonksiyonun daha seçici modülasyonunu sağlar.
- 4. Eylem Mekanizması:** EES'de spinal kord nöral devrelerinin uyarılabilirliğini modüle ederek, SKY'dan kurtulmuş nöral yolları aktive ederek, sinaptik nöroplastisiteyi teşvik ederek ve potansiyel olarak motor yanıtları tetikleyerek çalışır. ISMS'de ise kord içindeki motor nöronları ve internöronları doğrudan aktive ederek, yaralanma bölgesini atlayarak motor fonksiyonu geri getirmeyi hedefler. Sinir uyarılabilirliğini modüle edebilir ve sinir nöroplastisitesini teşvik edebilir.
- 5. Implantasyon Prosedürü:** EES'de epidural aralığa elektrot dizilerinin cerrahi olarak implante edilmesini gerektirir. ISMS'de seçili noktalarda doğrudan spinal kord dokusu içerisine mikroelektrotların cerrahi olarak implante edilmesini gerektirir.
- 6. Uygulamalar:** EES genellikle motor fonksiyon iyileştirmesi, ağrı yönetimi ve mesane veya bağırsak fonksiyonlarının modülasyonu gibi çeşitli amaçlar için kullanılır. ISMS ise başlangıçta SKY olan bireylerde motor fonksiyonunun geri kazanılması ve yürüme yeteneğinin kolaylaştırılması için kullanılır, ancak diğer alanlarda da potansiyel uygulamalara sahip olabilir.

Genel olarak, hem EES hem de ISMS, SKY geçirmiş bireylerde motor fonksiyonunun geri kazanılması ve iyileştirilmesini amaçlarsa da, hedeflemeleri, uyarım derinliği, hassasiyet ve eylem mekanizmaları gibi yönlerde farklılık gösterirler. Bu, nörorehabilitasyon alanında birbirini tamamlayabilecek yaklaşımlar sunar. Bloch, Courtine ve ekibinin çığır açan çalışmaları, SKY olan bireylerde özellikle de EES'nin istemli lokomasyonu geri kazanmadaki etkinliğini göstermektedir. Belirli omurilik devrelerini aktive ederek, epidural stimülasyonu tam felçli bireylere minimal yardımla ayakta durma, adım atma ve hatta yürüme olanağı sağlar, böylece SKY rehabilitasyonunda yeni umutlar sunmaktadır.

Courtine ve Bloch'un öncülük ettiği araştırmanın anahtar alanlarından biri, SKY geçirmiş bireylerde istemli hareketi geri kazanmak için spatiotemporal elektriksel uyarımın kullanılmasıdır (3,4,18). Spatiotemporal uyarım, kısa süreli spatial olarak seçkif elektriksel uyarımların, motor nöronların yürüme gibi aktiviteler sırasında gösterdiği doğal aktivasyonu ile çakışacak şekilde hassas zamanlama ile verilmesini içerir. Bu yaklaşım, hayvan modellerinde ve insanlarda felçli uzuvların hareketleri üzerinde daha ince bir kontrol sağlar ve sürekli uyarıma kıyasla bacak hareketlerinin genliğini ve sağlamlığını artırır.

Omurilik yaralanmalarının tedavi geliştirmelerinde kullanılan temel hayvan modelleri arasında, kısmi kesi yaralanmaları ve şiddetli kontüzyon veya ezilme yaralanmaları olan rodent modelleri bulunmaktadır. Kısmi kesi yaralanmaları olan rodent modelleri, SKY'da iyileşme mekanizmalarını anlamak ve farklı terapiler aracılığıyla sağlanan iyileşmeleri laboratuvar ortamında izlemek için faydalıdır, ancak insan omurilik hasarının birçok özelliğini tekrarlayamaz. Buna karşılık, rodent modellerindeki şiddetli kontüzyon veya ezilme (crush) yaralanmaları, insanlarda gözlenen kalıcı paralizileri yakından taklit ederek farklı iyileşme mekanizmalarına dair bilgiler sağlar. Klinikle bağıntılılık ve etkinliği sağlamak için bu yeni nöroteknolojilerin hem kesik hem de kontüzyon modellerinde test edilmesi gereklidir (4).

Spatiotemporal uyarım protokolleri, felçli bireylerde sürdürülebilir ağırlık taşıma yürüyüşü ve hassas hareketlerin teşvik edilmesinde umut verici sonuçlar göstermiştir. Hayvan modellerinde yürütülen öncü çalışmaları, EES ve ISMS'nin yoğun lokomotor eğitimle birleştirilmesinin, lokomotor fonksiyonun iyileştirilmesinde etkinliğini göstermiştir. Bu bulgular, insan hastalarda özellikle de EES'nin motor iyileşmeyi artırdığı ve istemli yürümeyi kolaylaştırdığı klinik denemelerin yolunu açmıştır (3,4,18).

Bu modalitelerde erken dönem iyileşme, yaralanma seviyesinin altında kanal spinal kord segmentine kimyasal ve elektriksel nöromodülasyon terapilerinin uygulanmasını içerir, böylece korunmuş spinal kord devrelerinin duysal girdilere yanıt verebilmesi sağlanır. Uzun dönemde iyileşme ise, korunmuş bu nöral devrelerin fizik tedavi ve özel egzersizler içeren nörorehabilitasyon programları yoluyla yeniden düzenlenmesini ve bu sayede mevcut devrelerin kaybedilmiş fonksiyonları devralabilme potansiyelini teşvik etmeyi içermektedir. Bu nörorehabilitasyon programlarından sonra, SKY geçirmiş bireyin motor kontrol becerilerinin, sürekli elektrokimyasal nöromodülasyon terapilerine ihtiyaç olmadan da devam etmesi sağlanabilir (2,4,18).

Beyin-Bilgisayar Arayüzleri (BCI'lar)

Beyin-Bilgisayar Arayüzleri, beyin ve harici cihazlar arasında doğrudan iletişim sağlar. BCI'lar, beyinden kaydedilen nöral aktiviteyi çözerek ve gerçek zamanlı komutlara dönüştürerek çalışırlar. Hasarlı spinal kord segmentini atlayarak, BCI'lar SKY geçirmiş bireylerin beyin sinyallerini kullanarak yardımcı cihazları, protezleri ve sanal avatarları kontrol etmesine olanak tanır. BCI'ların işlem mekanizması, beyinden kaydedilen nöral aktiviteyi çözerek ve bunu harici cihazlar için gerçek zamanlı komutlara dönüştürerek çalışır. Nöro-feedback ve adaptif algoritmaları kullanarak, BCI'lar motor öğrenmeyi artırabilir ve

kortikal reorganizasyonu kolaylaştırabilir, böylece üst ekstremitelerde fonksiyonunda, mobilitede ve yaşam kalitesinde iyileşmelere yol açabilir (5,11,16).

BCI teknolojisi, SKYlı bireylerin tedavisinde çeşitli uygulamalara sahiptir:

- 1. Hareket Restorasyonu:** SKY sonrasında plejik hastaların BCI'lar sayesinde beyin sinyallerini kullanarak hareket etmeleri sağlanabilir. Bu, robotik ekzoiskeletler veya protezler gibi harici cihazların kontrol edilmesi için potansiyel bir yol sunmaktadır.
- 2. İletişim İmkânı:** SKY geçirmiş bireylerin, bilgisayar aracılığıyla yazı yazma, e-posta gönderme veya internete erişme gibi günlük görevleri yerine getirmelerine yardımcı olabilir. Beyin sinyalleri, yazılı veya sözlü komutlar olarak yorumlanabilir ve bilgisayar arayüzü vasıtasıyla iletilir.
- 3. Rehabilitasyon Yardımı:** BCI'lar, SKY olan bireylerin rehabilitasyon sürecini desteklemek için kullanılabilir. Hareket yeteneklerini geri kazanma sürecinde beyin aktivitesini izleyerek ve yönlendirerek terapi ve egzersiz programlarını özelleştirebilirler.

BCI'lar, SKY olan bireyler için umut vadeden bir tedavi seçeneği olarak kabul edilirken, teknolojinin tam potansiyelini elde etmek için daha fazla araştırma ve geliştirme gerekmektedir. Sinyal çözümleme yöntemlerinin geliştirilmesi, cihazların güvenilirliğinin artırılması ve kullanıcıların eğitilmesi, bu alandaki ilerlemelerin anahtar unsurları olabilir. Her ne kadar SKY'de olmasa da spastik kuadriparezi ve anarthria'lı hastalarda çalışılmış olsa da Chang ve ekibinin BCI'ların kortikal aktiviteyi kaydederek insanların düşündükleri kelimeleri gerçek zamanlı olarak çözümlemeyi başardıkları çalışmaları bu açıdan umut vaat eden önemli çalışmalardan biridir (14).

Geliştirilmekte olan tüm bu farklı nöroteknoloji modalitelerini özetlemek gerekirse; kimyasal ve elektriksel nöromodülasyon terapileri, spinal kordta SKY sonrası korunmuş nöral devrelerinin duysal girdilere yanıt vermesini sağlar. Nöral aktivite ve konektiviteyi artırma amaçlı farmasötik ajanları kullanabilir. Nörorehabilitasyon ise işlevsel iyileşme için korunmuş nöral devrelerin yeniden düzenlenmesini teşvik eder. Fonksiyonel iyileşmeyi teşvik etmek için fizik tedavi ve özel egzersizler içerir. Mevcut devrelerin kaybedilen fonksiyonları devralma potansiyelini en üst düzeye çıkarmayı amaçlar. Bu egzersizler sayesinde sürekli nöromodülasyon olmadan da motor kontrolü sağlayabilir.

SKY sonrası iyileşmedeki bu nöroteknolojilerde gözetilen mühendislik stratejileri özetlendiğinde ise spinal kord stimülasyonu üzerine olan teknolojiler nöronal konektiviteyi artırmayı ve yeniden düzenlemeyi hedeflerken, BCI'lar hasarlı spinal kord segmentini bypass ederek doğrudan kasları veya hasarlı alanın altında kalan nöronların hedefleyerek istemli hareket kontrolünün yeniden kazandırılmasına odaklanır. Farklı biyolojik yaklaşımların (nörorehabilitasyon ve farmakoloji gibi) farklı mühendislik çözümleriyle (BCI ve elektriksel uyarım gibi) entegrasyonu sayesinde yapılacak kombinatoryal terapiler sinerjistik etkiyle fonksiyonel iyileşmede en optimal sonuçları sağlayabilir (2,4,5,12).

Zorluklar ve Gelecek Yönler

Nöroteknolojiler, SKY tedavisi için büyük umutlar taşımakla birlikte, bazı zorlukların üstesinden gelinmesi gerekmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için ve bu sayede bu yeni nöroteknolojilerin SKY tedavisinde tam potansiyelini gerçekleştirmesini sağlamak için sürekli araştırma ve yenilik şarttır.

Spinal kord yaralanmalarının tedavisindeki yeni nöroteknolojik gelişmeler, umut verici fırsatlar sunsa da, bir dizi zorlukla karşı karşıyadır ve gelecekte karşılaşılabileceğimiz bazı yönler işaret eder (1,8,11,12,17):

- 1. Biyolojik Uyum ve Güvenlik:** Yeni nöroteknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması sırasında, cihazların biyolojik olarak uyumlu olması ve uzun vadeli güvenlik sağlaması önemlidir. Bu, biyoyumlu malzemelerin kullanılması, enfeksiyon riskinin azaltılması ve bağışıklık tepkilerinin önlenmesi gibi faktörleri içerir.
- 2. Cihaz Dayanıklılığı ve Uzun Ömürlülük:** Nöroteknolojik cihazların dayanıklılığı ve uzun vadeli işlevselliği, başarılı bir tedavi için kritik öneme sahiptir. Bu cihazların güvenilirliklerinin artırılması ve uzun süreli kullanımlarında performanslarının korunması için sürekli gelişim ve iyileştirme gerekmektedir.
- 3. Fiyat ve Erişilebilirlik:** Yeni nöroteknolojilerin maliyeti, yaygın olarak kullanılabilirliğini etkileyebilir. Bu teknolojilerin daha geniş bir hasta kitlesine erişilebilir olması için maliyetlerin azaltılması ve sağlık hizmetlerine entegrasyonun sağlanması önemlidir.
- 4. Etik ve Yasal Konular:** Nöroteknolojilerin kullanımıyla ilgili etik ve yasal sorunlar da dikkate alınmalıdır. Özellikle, bireylerin gizliliği, kişisel verilerin korunması ve bu teknolojilerin etik kullanımı gibi konular üzerinde titizlikle durulmalıdır.
- 5. Hastaların Eğitimi ve Uyum:** Yeni nöroteknolojilerin başarılı bir şekilde uygulanması için hasta eğitimi ve uyumu önemlidir. Bu teknolojilerin kullanımıyla ilgili eğitim programları ve destek sistemleri geliştirilmelidir.

Gelecekte bu teknolojilerin alacağı doğrultuya gelince, nöroteknolojilerin daha da geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için birkaç anahtar alan vardır:

- 1. Biyolojik Geri Dönüşüm ve Onarım:** Spinal kord yaralanmalarının doğal onarım süreçlerini teşvik etmek için biyolojik geri dönüşüm ve onarım stratejilerinin geliştirilmesi önemlidir. Bu, hücresel tedaviler, rejeneratif tıp yaklaşımları ve biyomateryallerin kullanımını içerebilir.
- 2. Daha İleri Nöroteknolojik Gelişmeler:** Beyin-bilgisayar arayüzleri, epidural elektrik stimülasyonu ve intraspinal mikrostimülasyon gibi nöroteknolojik yaklaşımların daha da geliştirilmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir. Bu, cihazların daha doğru, etkili ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir.
- 3. İnterdisipliner İşbirliği ve Küresel Ağlar:** Nöroteknolojik araştırma ve geliştirme alanında disiplinler arası işbirliği ve

küresel ağlar oluşturulması, bilgi ve kaynakların paylaşılmasını sağlayabilir ve hızlı ilerlemeyi teşvik edebilir.

- 4. Hasta Odaklı Yaklaşımlar:** Nöroteknolojik tedavi ve rehabilitasyon stratejilerinin daha fazla hasta merkezli olması ve hastaların ihtiyaçlarına daha uygun şekilde tasarlanması önemlidir. Bu, tedaviye daha iyi yanıt ve daha yüksek hasta memnuniyeti sağlayabilir.

SONUÇ

SKY'da SKS'nin gösterdiği etki mekanizmaları hâlen tam olarak anlaşılmamıştır ve hedeflenen belirli semptomlara bağlı olarak değişebilir. Ancak, nöropatik ağrı yönetimindeki kullanımıyla benzer şekilde, SKY'deki SKS'nin terapötik sonuçlar elde etmek için sinir yollarını modüle etme, nöroplastisite ve muhtemelen diğer mekanizmaları içerdiği düşünülmektedir. Bu alandaki araştırmalar devam etmektedir ve SKY tedavisi bağlamında SKS'nin potansiyel faydalarını ve sınırlamalarını tam olarak anlamak için daha fazla çalışma gerekmektedir.

Nöroteknolojilerdeki son ilerlemeler, SKY olan bireylerin fonksiyonunu geri kazanma, bağımsızlığı artırma ve yaşam kalitesini iyileştirme açısından yeni olanaklar sunmaktadır. Epidural elektrik stimülasyonu, intraspinal mikrostimülasyon ve beyin-bilgisayar arayüzlerinin işlem mekanizmalarını açıklayarak, bu derleme, bu son teknoloji yaklaşımlarının SKY tedavisini devrimleştirmek için potansiyelini ortaya koymaktadır. Disiplinler arası işbirlikleri, yenilikçi araştırmalar ve çevrimsel çabalar sayesinde, SKY bakımı alanı keşif ve yenilik çağına girmekte, bu da SKY'dan etkilenenlerin yaşamlarını dönüştürme potansiyeli sunmaktadır.

Araştırma Desteği: Makalemiz ile ilgili herhangi bir kurum, kuruluşun mali destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması: Makalemiz ile ilgili herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZAR KATKILARI

Çalışmanın fikri veya tasarımı: İŞ

Veri toplama: İŞ, GG

Veri analizi ve yorumlama: GG, İŞ

Makale taslağının hazırlanması: GG

Makalenin kritik revizyonu: İŞ

Diğer (çalışma denetimi, fonlar, materyal, vb...): GG, İŞ

Tüm yazarlar (GG, İŞ) sonuçları gözden geçirmiş ve makalenin son hâlini onaylamıştır.

KAYNAKLAR

- Andersen RA, Kellis S, Klaes C, Aflalo T: Toward more versatile and intuitive cortical brain-machine interfaces. *Curr Biol* 24:885-897, 2014. doi: 10.1016/j.cub.2014.07.068. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.07.068>
- Angeli CA, Edgerton VR, Gerasimenko YP, Harkema SJ: Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans. *Brain* 137:1394-1409, 2014. doi: 10.1093/brain/awu038. <https://doi.org/10.1093/brain/awu038>

3. Capogrosso M, Milekovic T, Borton D, Wagner F, Moraud EM, Mignardot JB, Buse N, Gandar J, Barraud Q, Xing D, Rey E, Duis S, Jianzhong Y, Ko WK, Li Q, Detemple P, Denison T, Micera S, Bezaud E, Bloch J, Courtine G: A brain-spine interface alleviating gait deficits after spinal cord injury in primates. *Nature* 539:284-288, 2016. doi: 10.1038/nature20118. <https://doi.org/10.1038/nature20118>
4. Courtine G, Sofroniew MV: Spinal cord repair: Advances in biology and technology. *Nat Med* 25:898-908, 2019. doi: 10.1038/s41591-019-0475-6. <https://doi.org/10.1038/s41591-019-0475-6>
5. Daly JJ, Wolpaw JR: Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *Lancet Neurol* 7:1032-1043, 2008. doi: 10.1016/S1474-4422(08)70223-0. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(08\)70223-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(08)70223-0)
6. Falowski S, Sharan A: A review on spinal cord stimulation. *J Neurosurg Sci* 56:287-298, 2012.
7. Grahn PJ, Lavrov IA, Sayenko DG, Van Straaten MG, Gill ML, Strommen JA, Calvert JS, Drubach DI, Beck LA, Linde MB, Thoreson AR, Lopez C, Mendez AA, Gad PN, Gerasimenko YP, Edgerton VR, Zhao KD, Lee KH: Enabling task-specific volitional motor functions via spinal cord neuromodulation in a human with paraplegia. *Mayo Clin Proc* 92:544-554, 2017. doi: 10.1016/j.mayocp.2017.02.014. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2017.02.014>
8. Hochberg LR, Bacher D, Jarosiewicz B, Masse NY, Simeral JD, Vogel J, Haddadin S, Liu J, Cash SS, van der Smagt P, Donoghue JP: Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm. *Nature* 485:372-375, 2012. doi: 10.1038/nature11076. <https://doi.org/10.1038/nature11076>
9. Holsheimer J: Which neuronal elements are activated directly by spinal cord stimulation. *Neuromodulation* 5:25-31, 2002. doi: 10.1046/j.1525-1403.2002.2005.x. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1403.2002.2005.x>
10. Krog L, Maloney J, Pew S, Adeleye O, Johnson B, Glenn B, Gill B, Tieppo Francio V, Pagan-Rosado R, Whitney M, Sinha N, Strand N: Cervical spinal cord stimulation: A review. *Curr Pain Headache Rep* 28:239-249, 2024. doi: 10.1007/s11916-023-01200-8. <https://doi.org/10.1007/s11916-023-01200-8>
11. Lebedev MA, Nicolelis MA: Brain-machine interfaces: Past, present and future. *Trends Neurosci* 29:536-546, 2006. doi: 10.1016/j.tins.2006.07.004. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.07.004>
12. Lebedev MA, Nicolelis MA: Brain-machine interfaces: From basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation. *Physiol Rev* 97:767-837, 2017. doi: 10.1152/physrev.00027.2016. <https://doi.org/10.1152/physrev.00027.2016>
13. Mekhail NA, Mathews M, Nageeb F, Guirguis M, Mekhail MN, Cheng J: Retrospective review of 707 cases of spinal cord stimulation: Indications and complications. *Pain Pract* 11:148-153, 2011. doi: 10.1111/j.1533-2500.2010.00407.x. <https://doi.org/10.1111/j.1533-2500.2010.00407.x>
14. Moses DA, Metzger SL, Liu JR, Anumanchipalli GK, Makin JG, Sun PF, Chartier J, Dougherty ME, Liu PM, Abrams GM, Tu-Chan A, Ganguly K, Chang EF: Neuroprosthesis for decoding speech in a paralyzed person with anarthria. *N Engl J Med* 385:217-227, 2021. doi: 10.1056/NEJMoa2027540. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2027540>
15. Oakley JC, Prager JP: Spinal cord stimulation: Mechanisms of action. *Spine (Phila Pa 1976)* 27:2574-2583, 2002. doi: 10.1097/00007632-200211150-00034. <https://doi.org/10.1097/00007632-200211150-00034>
16. Pfurtscheller G, Neuper C: Motor imagery and direct brain-computer communication. *Proceedings of the IEEE* 89:1123-1134, 2002. doi: 10.1109/5.939829. <https://doi.org/10.1109/5.939829>
17. Sussillo D, Nuyujukian P, Fan JM, Kao JC, Stavisky SD, Ryu S, Shenoy K: A recurrent neural network for closed-loop intracortical brain-machine interface decoders. *J Neural Eng* 9:26-27, 2012. doi: 10.1088/1741-2560/9/2/026027. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/9/2/026027>
18. Wagner FB, Mignardot JB, Le Goff-Mignardot CG, Demesmaeker R, Komi S, Capogrosso M, Rowald A, Seáñez I, Caban M, Pirondini E, Vat M, McCracken LA, Heimgartner R, Fodor I, Watrin A, Seguin P, Paoles E, Van Den Keybus K, Eberle G, Schurch B, Pralong E, Becce F, Prior J, Buse N, Buschman R, Neufeld E, Kuster N, Carda S, von Zitzewitz J, Delattre V, Denison T, Lambert H, Minassian K, Bloch J, Courtine G: Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature* 563:65-71, 2018. doi: 10.1038/s41586-018-0649-2. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0649-2>