

Fonksiyonel Elektriksel Stimülasyon ve Serebral Palsi'de Kullanımı: Derleme

Functional Electrical Stimulation and Using in Cerebral Palsy: A Review

ID Ayşe ÖZ¹, ID Yasemin KARTAL¹¹Kastamonu Üniversitesi, Çatalzeytin Meslek Yüksekokulu, Sağlık Bakım Hizmetleri Bölümü, Kastamonu, Türkiye

Özet

Bu çalışmanın amacı Fonksiyonel Elektriksel Stimülasyon (FES)ü ve Serebral Palsi (SP)de kullanım alanlarını incelemektir. Çocukluk çağında engelliliğin en sık nedenlerinden biri olan SP, kas tonusunu, duruşu ve hareketi etkileyen, ilerlemeyen bir motor fonksiyon bozukluğudur. SP'de hem spastisite hem de zayıflığın ele alınmasında popülerlik kazanan bir yöntem, FES'tir. FES paralize kasların fonksiyonel, faydalı bir hareketi yapabilmeleri için elektrik akımı ile stimüle edilmeleridir. Çoğu çalışma FES'in günlük yaşamla uyumlu olduğuna dair kanıt sağlamıştır. FES tedavisinin SP'li çocukların yürüme hızını ve adım uzunluğunu artırabileceğini ve bunun da SP'li çocukların yürümesini iyileştirebileceğini gösteren çalışmalar mevcuttur. SP'li çocuklarda karın-sırt kaslarına yapılan FES uygulaması cobb ve kifoz açılarını azaltmıştır ve oturma dengesini artırmıştır. FES ile bisiklet eğitiminin artan kas boyutu, azalmış spastisite ve kontraktürler, iyileşmiş nörolojik ve fonksiyonel performans olmak üzere önemli fiziksel faydalar sağladığı bildirilmiştir. BoNT-A sonrası dönemde aktif ayak bileği dorsal fleksiyonundaki artış, BoNT-A 'ya ek olarak FES uygulamasında daha büyüktür. Bu, iki tedavinin birbiri üzerinde güçlendirici bir etkisi olduğu anlamına gelebilir. FES SP'li çocuklarda üst ekstremiteler fonksiyonlarını iyileştirir. Literatüre bakarak FES tedavisinin SP'li çocuklar tarafından iyi tolere edilebildiğini ve rehabilitasyon programına olumlu katkılar sunduğunu söyleyebiliriz.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel elektriksel stimülasyon, serebral palsy, yürüyüş, fonksiyon.

Abstract

The aim of this study was to investigate Functional Electrical Stimulation (FES) and its using in Cerebral Palsy (CP). One of the most common causes of disability in childhood, CP is a non-progressive motor dysfunction that affects muscle tone, posture and movement. One method that is gaining popularity in treating both spasticity and weakness in CP is FES. FES is the stimulation of paralyzed muscles with electric current in order to perform a functional, beneficial movement. Most studies have provided evidence that FES is compatible with everyday life. There are studies showing that FES treatment can increase the walking speed and stride length of children with CP, which in turn can improve the walking of children with CP. FES treatment to the abdominal-back muscles in children with CP reduces cobb and kyphosis angles and increases sitting balance. Cycling training with FES has been reported to provide significant physical benefits, including increased muscle size, decreased spasticity and contractures, and improved neurological and functional performance. The increase in active ankle dorsal flexion in the post-BoNT-A period is greater in the treatment of FES in addition to BoNT-A. This may mean that the two treatments have a reinforcing effect on each other. FES improves upper extremity functions in children with CP. Looking at the literature, we can say that FES treatment is well tolerated by children with CP and makes positive contributions to the rehabilitation program.

Keywords: Functional electrical stimulation, cerebral palsy, gait, function

➤ GİRİŞ

Fonksiyonel Elektriksel Stimülasyon (FES) nöral görevleri bozulmuş (paralize) kasların fonksiyonel, faydalı bir hareketi yapabilmeleri için elektrik akımı ile stimüle edilmeleridir (1). FES, bir motor görevin performansı sırasında istenen eklem hareketini üretmek için yeterli olan bir sinire veya kasa elektriksel uyarıların iletilmesi anlamına gelir. FES aynı zamanda tekrarlayan göreve özgü uygulamaları arttırmak için kullanılabilir, böylece altta yatan motor kontrolü geliştirir (2).

FES kas kasılması oluşturmak için belirli nöronlarda yapay olarak bir akım indüklemeyi içerir. Nöron elektrotlar kullanılarak iletilen bir dizi kısa elektrik darbesi alır. Bu elektrotlar transkutanöz (cilt yüzeyine), perkutan (kas içine), epimisyal (kas yüzeyine) yerleştirilebilir veya manşona (ilgili kası inerve eden sinir kılıfına) sarılabilir. Elektrikle uyarılan kasta üretilen gerilim uyarının sıklığına ve yoğunluğuna bağlıdır. Stimülasyon yoğunluğu nabız genliği süresi ve frekansının yanı sıra nabız dizisinin şekline bağlı olarak

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ayşe ÖZ ✉ ayseoz@kastamonu.edu.tr

Atıf için: Öz A, Kartal Y. Fonksiyonel Elektriksel Stimülasyon ve Serebral Palsi'de Kullanımı: Derleme.

Dyna Med Theories 2025;1(2):25-35

kasa aktarılan toplam yükün bir fonksiyonudur (3).

FES alt motor nöron, sinir-kas kavşağı ve kas üçlüsünün beraberliğinin korunduğu üst motor nöron yaralanmalarında kullanılmaktadır. FES bozulmamış alt motor nöron, sinir-kas kavşağı, kontraksiyon gösteren kastan oluşan motor üniteye etkili olup hareket sağlarken, duyu mekanizmasına da etki ederek refleks motor aktivitelerin normalleşmesine destek olur (4). Bu durumda FES'in iki etki mekanizmasından söz edilir:

Efferent FES: Motor sinirlerin direk olarak stimülasyonu ile kasta motor cevabın oluşmasıdır. Genelde birkaç msn latanslı yanıtlardır.

Afferent FES: Duyu sinirlerinin uyarılması sonucu spinal refleks yolların devreye girmesi ile indirek geç latanslı zayıf yanıtlardır (5).

Spinal refleks mekanizmalar agonist kasın kasılması, antagonist kasın kasılmaması, yardımcı kasların desteği, agonist-antagonist resiprokal inervasyonu sağlar. Afferent uyarım grup I A lifleri ile bu mekanizmaları çalıştırır. Medulla Spinalis'teki eksitator ve inhibitör sinaplara ulaşan bu impulslar eksitasyon -inhibisyon dengesini sağlayarak spastisiteyi azaltmaktadır (5). Paralitik ve spastik kaslarda stimülasyondan sonra istemli aktivitede artma olmaktadır. Afferent FES proprioseptif fasilitasyon içinde düşünülebilir. FES, kasların oksijenlenme miktarını artırır, kan içindeki nörepinefrin seviyelerini artırır, grup II A liflerinin sayısı ve kasın enine kesit alanını artırır (6).

Serebral palsi (SP), Avrupa'da 1000 doğumda 2,11 çocukta görülen motor engelliliğin en yaygın nedenidir. Mevcut tanıma göre SP, hareket ve duruş gelişiminde aktivite kısıtlamalarına neden olan ve gelişmekte olan merkezi sinir sistemindeki bir yaralanmadan kaynaklanan bir grup kalıcı bozukluğu tanımlar (30). SP'li hastaların %80'inde spastisite görülür. Spastisite, aşırı tendon sarsıntı refleksleriyle tonik germe tepkisinde hıza bağlı bir artış olarak tanımlanır; alt motor nöronlarındaki inhibitör uyarıların azalmasıyla oluşur. Spastisite genellikle hareketliliği, özellikle yürümeyi engeller. Ayak bileği plantar fleksörlerinin spastisitesi ve ayak bileği dorsifleksörlerinin (tibialis anterior gibi) zayıflığı ve zayıf seçici kontrolü, düşük ayağa veya gerçek ekinusa yol açabilir. Sonuç olarak, SP'li hastalarda genellikle yürüme mesafesi azalır (yorgunluk), tökezleme ve düşme sıklığı artar. Ayak bileği-ayak ortezleri zayıflamış kasları desteklemek için sıklıkla kullanılır ancak aktif hareketleri kısıtlayabilir ve böylece kas zayıflığını şiddetlendirebilir. Elektriksel uyarım SP'li çocuklarda gücü ve hareket

aralığını artırmak, spastisiteyi azaltmak ve aktivitelerin performansını iyileştirmek amacıyla uygulanmıştır. FES, dinamik bir fonksiyonel ortez olarak işlev görebilir (44). Ayrıca FES, oturma, sandalyeden kalkma, yürüme veya nesnelere uzanma ve onları manipüle etme gibi bir aktivitenin gerçekleştirilmesi sırasında kasların kasılmasına neden olur (47). Bu çalışmanın amacı FES'in SP'de kullanım alanlarını incelemek ve yararları hakkında literatüre ışık tutmaktır.

1 FES Sisteminin Özellikleri

FES alet kontrol ünitesi, stimülatör, elektrotlar ve feedback mekanizmasından oluşur (4). Uyarının şiddet süre ve şeklini düzenleyerek feedback sinyalleri alır. Kontrol ünitesi açık ve kapalı devre olmak üzere ikiye ayrılır:

I. Açık devre kontrollü sistemler: Uyarı kas kontraksiyonu ve eklem hareketine göre ayarlanmadığı için; tam kontraksiyon sağlanamaması, yorgunluk ve fazla stimülasyon gibi dezavantajları görülür (4).

II. Mikrobilgisayarlı kapalı devre kontrollü sistemler: Stimülasyon algılayıcıya gelen hareket, pozisyon gerginlik gibi bilgilere göre düzenlenir (4).

Stimülatörler: Kas kontraksiyonunu sağlayan elektriksel uyarıyı üretir (4).

Elektrotlar: Yüzeysel, epimisyal, kas içi, juksta-nöral, sinir kılıf, epinöral, intra-fasiküler, intra-spinal olmak üzere çeşitli elektrotlar mevcuttur. FES'te çoğunlukla yüzeysel elektrotlar kullanılır. Uzunlamasına yerleştirilmiş elektrotlar çapraz yerleştirilmiş elektrotlara göre tolere edilebilen dönme momentinde %64'e kadar artış sağlar. Daha büyük yüzeysel elektrotlarda daha güçlü kas kasılması sağlanırken küçük yüzeysel elektrotlardan da daha az rahatsızlık verir. Uzun süreli kullanım gerektiren hastalarda FES için çok sayıda elektrot içeren özel giysiler geliştirilmiştir. Bu giysiler özellikle ayakta durma ve yürüme protokolleri için yararlıdır (7).

Epimisyal, kas içi, sinir kılıfı gibi implante elektrotlarla daha doğru stimülasyon ve daha iyi hasta konforu sağlanabilir. Rahatça uyum sağlayan kılıf elektrotları, bir periferik sinirin bölümlerinin stimülasyonunda seçiciliği sağlamaya elverişlidir (10).

Elektrot Yerleşimi: Uyarıcı elektrotların konumu, uyarılan kaslar ve sonuç olarak üretilen hareketler üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu görevi yerine getirmek için fonksiyonel anatomi bilgisi ve her bireyin benzersiz

olduğunun anlaşılması gerekir. Elektrotların optimal konumunun belirlenmesi, genellikle kolaylaştırılmış hareketin istenen hareket olduğunu doğrulamak için bilgilendirilmiş deneme yanılma içerir: elektrotlar, uyarılacak kası inerve eden sinirler üzerine ilk olarak yerleştirilir ve uyarım iletilir. Ortaya çıkan hareket istenilen hareket ise işlem tamamlanır. Aksi takdirde, elektrotlar yeniden konumlandırılır (genellikle birkaç santimetreyi aşmayan küçük ayarlamalar kullanılarak) ve istenen hareket elde edilene kadar işlem tekrarlanır (8).

Feedback Mekanizma: Vücut hareketlerinde FES'in uyarıcı etkisi hakkında bilgi veren 'feedback' mekanizmasına tüm FES sistemlerinde ihtiyaç vardır. Açık devre kontrollü sistemlerde kontrol hasta gözlenerek yapılır, feedback maneldir. Kapalı devre kontrollü sistemlerde algılayıcılar otomatik olarak vücut hareketi ile ilgili bilgileri kontrol ünitesine getirir, stimülasyon otomatik olarak ayarlanır (4). Kas enduransını geliştirme yorgunluk, spazm gibi yan etkileri önlemede otomatik sistemler daha üstündür (10).

Stimülasyon Parametreleri: Stimulus şiddeti (voltaj veya akım), frekansı, süresi ve dizinin süresi başlıca stimülasyon parametreleridir (4). Akım şekli alternan pulse ve stimulus şekli ise bifazik burst'tur. Stimulus şiddeti 15-60 volt arası olup 120 volta yükselebilir, implante elektrot kullanılıyorsa 7 volta kadar iner. Stimulus frekansı 20 -200 Hz arası değişir. Frekans arttıkça kas yorgunluğu artar. Bu nedenle endurans ve güç artırılmak istenirse 20 Hz'de tutulur. İdeal frekans üst ekstremité için 12-15 Hz alt ekstremité için 18- 25 Hz'dir. Stimulus süresi 0.1-1 msn arası olup süre uzadıkça ağrı artar. Bu nedenle optimal süre 0.3 msn'dir. Stimülasyon serisinin başında şiddet alçak olup giderek artacak şekilde uygulanırsa oluşacak hareket sıçrayıcı olmaz (5).

2 FES Endikasyonları

FES uygulaması için endike olabilecek hastalar şunlardır: Ruh sağlığının normal olması, iletişim eksikliğinin olmaması, hareket edebilmesi, eklem kısıtlılığının olmaması, spastisitenin yüksek derecede olmaması, derin duyunun alınıyor olması (9).

3 FES Kontraendikasyonları

FES uygulaması için kontraendike olabilecek hastalar şunlardır: Tedaviye gönüllü olmamak, dekubitis ülseri, aşırı kilo, oturma dengesinin olmaması, şiddetli spastisite, ekstremité kısıtlılıkları, periferik lezyonlar, kemik erimesi, şekilsiz ossifikasyon, aşırı atrofi, kalp pili kullanımı, cilt ve periferik dolaşım bozukluğu,

diyabet, polinöropati, alkolizm, stimülatöre karşı hassasiyet (10).

4 FES Uygulamasının Amaçları

Sinirsel iletimi bozulmuş kasların fiziksel gücünü artırmak, istemli hareket kontrolünün iyileşmesini hızlandırmak, merkezi sinir sistemi seviyesindeki bazal motor mekanizmalarının yeniden şekillenmesini sağlamak, hareketi desteklemek, spastisiteyi azaltmak, ortez ile kullanılarak hareketi sağlamak (düşük ayak ortezi ya da quadriplejik hastadaki el bilek tenodezi...), serebral palsili çocuklarda sinir-kas güçlenmesini hızlandırmak, lökomotor sistemdeki bozuklukları düzeltmek ya da gerçekleşmesine mani olmaktır (4).

5 FES Uygulama Yöntemleri

Unilateral Tek Kanallı FES: Tek kanallı elektrottan oluşur. Ayak bileği dorsi fleksör ve plantar fleksörlerine diz ekstansörleri ve fleksörlerine kalça abduktör ve ekstansörlerine kullanılabilir (11). Örneğin tibialis anterior kasının elektrik stimülasyonu ile uyarılması yürüyüş döngüsü ile koordine edilebilir ve merkezi düşük ayaklı hastalarda yürüyüş kalitesini iyileştirebilir (15).

Bilateral Tek Kanallı FES: İki ayrı tek kanallı elektrottan oluşur. İpsilateral ya da kontrolateral kontrol sağlar (10). Serebral palsili çocukların yürüme ve postürünün düzeltilmesinde yararlı olduğu gösterilmiştir (7). Bu gruba ait kontralateral kontrollü alternatif FES-CCA-FES ise özellikle serebral palsili çocuklarda uygulanır. Bir bacağın uyarılması resiprokal olarak diğer bacağın uyarılmasına bağlıdır (12).

İki Kanallı FES: Unilateral tipte bir ekstremitédeki alternatif kaslara ya da birden çok ekstremitédeki sinerjist kaslara stimülasyon uygulanır. Bilateral tipte ise iki bacağın antagonist kasları resiprokal olarak uyarılır (12).

Çok Kanallı FES: İkidenden fazla kas veya kas grubu uyarılır. Yürüme gerçekleşmesi de sadece ayakta durmak için kullanılır. Özellikle torakal düzey yaralanmalı spastik parapilejilerde kullanılır. Bu uygulamada önce kaslar güçlendirilir daha sonra paralel barda quadriseps femoris kası uyarılarak ayakta durma sağlanır ve süre giderek uzatılır (7,12).

6 FES Klinik Uygulamaları

6.1. Alt Ekstremitte Fonksiyonu İçin Nöroprotezler

Spinal kord yaralanmasında (SKY) sıklıkla etkilenen işlevler arasında ayakta durma yeteneği vardır. FES, ayak bileği eklemleri çevresindeki kasları harekete geçirmek için kullanılabilir ve gövdeye destek sağlamak için ayakta duran bir çerçeve veya tam vücut ortezi ile birlikte ayakta durma yeteneğini geri kazandırabilir. Gövde kontrolünü kolaylaştırmak için ek stimülasyon kanalları da kullanılabilir (13). Case Western Reserve Üniversitesi/Gazi İşleri Departmanı (CWRU-VA) ayakta durma için, nöroprotez, 16 kanallı implante edilmiş bir stimülatör kullanmıştır. Uylukların, kalçaların ve gövdenin iki taraflı aktivasyonu, paraplejili bir kişinin ayak bileği-ayak ortezi ile birleştirildiğinde 8 dakika dik durmasını sağlamıştır (14).

İnme ve SKY sonrası yürümeyi kolaylaştırmak için kullanılan nöroprotezler genel olarak iki kategoriye ayrılır. İlki, ayak bileği işlevini etkileyen düşük ayağı telafi eden cihazlardan oluşur. İkinci kategori, genellikle SKY ile ilişkili olan, alt ekstremitte daha büyük bozukluklarla (örneğin, sınırlı ayak bileği işlevine ek olarak iki taraflı diz ve kalça fleksiyonu) yürümeyi kolaylaştırabilen nöroprotezlerde temsil edilir (27).

Elektrik stimülasyonu ile düşük ayağın düzeltilmesi, yürüme için en basit ve en eski nöroprotezdur. İlk olarak 1961'de Liberson ve ark. tarafından açıklanan prosedür, düşük ayak problemini etkili bir şekilde ortadan kaldıran bir fleksör refleksi ortaya çıkaran peroneal sinirin yanı sıra ayak bileği dorsifleksiyonu yapmaktan sorumlu kasları uyaran tek bir kanala dayanmaktadır (15). Tek bir stimülasyon kanalı ve kendinden yapışkanlı transkutan elektrotlar kullanarak tibialis anterior kasına ve peroneal sinire stimülasyon sağlar. Kullanıcının ayakkabısının içindeki bir ayak anahtarı, stimülasyonu tetikler ve yürüyüşün salınım fazında ayak bileği dorsifleksiyonu ve eversiyonunun yanı sıra bir fleksör geri çekme refleksi (ayak bileği dorsifleksiyonu, kalça ve dizin fleksiyonu ve kalçanın dış rotasyonu) üretir. 'Food and Drug Administration' (FDA) onaylı cihaz, Odstock Medical Limited (Salisbury, Wiltshire, BK) tarafından ticarileştirilmiştir ve yüzlerce kişi tarafından kullanılmıştır (16).

Daha büyük alt ekstremitte bozukluğu ile yürümek için nöroprotez 70'lerin sonu ve 80'lerin başında Kralj ve ark. SKY'li bireylerde yürümeyi kolaylaştırmak için bir FES yöntemi ve sistemi geliştirmiştir. Sistem, klinik uygunluğunu artırmak ve evde daha kolay kullanım

için az sayıda stimülasyon kanalı kullanacak şekilde tasarlanmıştır (17).

Andrews ve Diğerleri Tarafından Geliştirilen Hibrit FES Sistemi: Andrews ve meslektaşları tarafından geliştirilen sistem ayrıca peroneal ve quadriceps femoris kas stimülasyonunu aletli pasif braketlerle birleştirmiştir (18).

Hibrit Yardımcı Sistem (Hybrid Assistive System, HAS): Popovic ve arkadaşları tarafından geliştirilen HAS, FES'i modüler aktüatörlü bir ortez (kendi kendine oturan modüler ortez-self-fitting modular orthosis, SFMO) ile birleştirmiştir. Paylaşılan bir kural tabanlı denetleyici, FES sistemi ile SFMO'nun aktivasyonunu senkronize etmiştir. Bu, FES'in sadece hareket üretmek için kullanılmasına neden olurken, ortezlerle stabilizasyonu sağlar (28).

Resiprokal Yürüme Ortezi (Reciprocating Gait Orthosis, RGO): Louisiana Eyalet Üniversitesi Resiprokal Yürüyüş Ortezi (LSU-RGO) olarak da bilinen cihaz, 1970'lerde Louisiana Eyalet Üniversitesi'nde alt ekstremitte kas-iskelet sistemi engelleri (örn. spina bifida, kas distrofisi vb.) olan çocuklar için geliştirilmiştir ve daha sonra 1970'lerin sonlarında ve 1980'lerin başlarında SKY'li yetişkinlerde test edilmiştir. Cihaz, pasif ileri geri hareket eden kalça-diz-ayak bileği-ayak ortezi (HKAFO) ile dört kanallı elektriksel stimülasyonu birleştiren elektromekanik hibrit bir sistemdir (19).

Yürümek İçin COMPEX Motion FES Sistemi: Thrasher ve ark. (2006) tarafından geliştirilen sistem, bifazik asimetrik darbe, sekiz kendinden yapışkanlı jel elektrot aracılığıyla vücuda iletilerek iki taraflı olarak şu dört kas grubunu hedeflemiştir: quadriceps, hamstringler, gastrocnemius/soleus ve tibialis anterior. 35 Hz'lik sabit bir uyarım frekansı kullanılmıştır. Peroneal stimülasyon yoluyla geri çekilme refleksini ortaya çıkarmamıştır. (20).

6.2. Üst Ekstremitte Fonksiyonu İçin Nöroprotezler

Uzanma ve kavrama gibi üst ekstremitte fonksiyonlarını kolaylaştırmak için FES sistemleri de oluşturulmuştur. Ayakta durmaya ve yürümeye yardımcı olan FES sistemlerinde olduğu gibi, implante edilebilir veya non-invaziv olabilirler. Genellikle kavramanın yanı sıra serbest bırakmak için tasarlanırlar, böylece nesnelerin manipüle edilmesini mümkün kılarlar (8).

Rebersek ve Vodovnik'in Sistemleri: 1970'lerin başında Ljubiana Üniversitesi'nde (Ljubiana, Slovenya) geliştirilen

üç kanallı stimülatör, elektromiyografik (EMG) kayıt için olanlar ve kontrol edilen bir kayan direnç dahil olmak üzere stimülasyon yoğunluğu farklı sensörlerle kontrol edilebilir. Kullanıcıların fiziksel yeteneklerine en uygun arayüzü seçebilme kapasitesi sunan bir tasarım, bu sistemin en önemli katkılarından biridir (21).

Nöromüsküler Elektrik Stimülasyon Sistemi (NESS)

H200: Başlangıçta NESS Handmaster olarak adlandırılan cihaz, kavramaya yönelik diğer nöroprotezler gibi parmak ekstansörlerini ve fleksörlerini ve ayrıca başparmağı uyarıcı üç stimülasyon kanalına sahiptir. Cihaz onlarca yıldır ticari olarak mevcuttur ve hemiplejili inme mağdurları ve SKY'den kaynaklanan tetraplejili kişiler tarafından kullanılmıştır. Sistemin FDA onaylı güncellenmiş versiyonu H200 Kablosuz El Rehabilitasyon Sistemi (Bioness, Inc., California, ABD) adı altında mevcuttur (22).

Biyonik Eldiven: Orijinal olarak 1989 yılında Alberta Üniversitesi, Edmonton, Kanada'da geliştirilen biyonik eldiven, bir bilek konum sensörü ve bir elektrik stimülatörü ile donatılmış parmaksız bir eldivenden oluşmaktadır. Aktif bilek fleksiyonu ve ekstansiyonu olan spinal kord yaralanmalı bireyler için tasarlanmıştır. Eldiven, parmakları ve başparmağı uzatmak ve esnetmek için kasları uyarıcı yüzey elektrotlarının üzerine giyilir. Bileği uzatmak, bir kavrama (tenodez kavramasına benzer) oluşturmak için stimülasyonu tetiklerken, bilek fleksiyonu elin açılmasıyla sonuçlanır (23).

Serbest Sistem: Case Western Reserve Üniversitesi'nde geliştirilen Freehand, SKY'li bireylere yardımcı olmak için parmak ve başparmağın ekstansiyonunu ve fleksiyonunu kontrol eden sekiz epimisyal elektrot (kas yüzeyine cerrahi olarak tutturulmuş) içeren implante edilmiş bir nöroprotezdır (24).

Kavrama yapabilen cihazların yanında birkaç tane de uzanmayı kolaylaştırma özelliğine sahip nöroprotezler vardır. Bu, her iki hareketin de sıklıkla sinerjistik olarak kullanılması nedeniyle önemlidir ve yüksek düzeyde bozukluğu olan kişiler için, elektrik stimülasyonu kullanılarak her iki hareketin de gerçekleştirilmesi gerekli olabilir. Bu cihazlar aşağıda açıklanmıştır (8).

Belgrad Kavrama-Uzanma Sistemi: Bu invazif olmayan nöroprotez, kullanıcının bir düğme kullanarak seçebileceği palmar ve lateral kavramalar ve ayrıca üç stimülasyon kanalı kullanarak el açma üretir. Dördüncü kanal, triceps brachii kasını uyarmak için kullanılır ve omzun açılma hızı ile tetiklenir (25).

Uzanma ve Kavrama için COMPEX Motion Nöroprotezi:

Bu dört kanallı programlanabilir nöroprotez, SKY'li bireylerde uzanmayı ve kavramayı kolaylaştırmak için özel olarak tasarlanmıştır (26). Zürih İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü'ndeki (ETHZ) Otomatik Kontrol Laboratuvarı ve Balgrist Üniversite Hastanesi'ndeki (ParaCare) Parapleji Merkezi tarafından geliştirilen nöroprotezlerin doğrudan bir evrimidir (27).

MyndMove: Piyasada bulunan en yeni uyarıcılardan biri, inme ve SKY'den sonra üst ekstremité fonksiyonunu eski haline getirmek için terapötik bir müdahale olarak FES'i kullanmak üzere özel olarak geliştirilen MyndMove'dur. MyndMove sistemleri, Compex Motion sistemleriyle elde edilen çalışma ve sonuçlardan gelişmiştir. Sistem 30'dan fazla uzanma ve kavrama protokolü sunar; bunlardan bazıları, ince parmak manipülasyonlarının yanı sıra bimanual görevleri de kolaylaştırabilir. Cihaz, kronik şiddetli hemipleji, SKY, travmatik beyin hasarı, serebral palsi, servikal miyelopati ve brakial pleksus yaralanmaları olan kişilerde üst ekstremité fonksiyonunu eski haline getirmek için başarıyla kullanılmıştır (28).

6.3. Taşınma Etkisi: FES'in Tedavi Olarak Kullanılması

Bir terapötik etkiye dair anekdot raporları, hemiplejili bireylerde düşük ayağa yardımcı olan ilk FES cihazlarının 1960'ların başında Liberson tarafından piyasaya sürülmesinden bu yana mevcuttur (15,25). Daha spesifik olarak, FES sistemlerini kullananlar, kaslarını istemli olarak kontrol etme yeteneklerinin, nöroprotez kullanmadan bile geliştiğini bildirmişlerdir. 1970'lerde günlük yaşam aktivitelerini kolaylaştırmak için nöroprostatik cihazların yaygın kullanımı, bir taşıma etkisinin daha fark edilmesine yol açmıştır. Bu, FES teknolojisinin kullanıcıların nöroprotez kullanarak tedavi gördüğü kısa vadeli bir müdahale olarak kullanılmasına yol açmıştır ve bu da inmeli hastaların gönüllü olarak hareket etme yeteneğini yeniden kazanmasıyla sonuçlanmıştır (29).

Bir fonksiyonel elektriksel stimülasyon tedavisi (FEST) müdahalesinde, hastalardan genellikle etkilenen uzuvlarıyla işlevsel hareketler denemeleri istenir ve birkaç saniye denedikten sonra, bir terapist, denenen hareketi üretmek için özel olarak tasarlanmış stimülasyonu tetikler. Bu prosedür, çoklu hareketlerin sıklıkla uygulandığı her seansta birçok kez tekrarlanır. Müdahalelerin süresi değişkenlik gösterebilse de, FEST araştırması için en yaygın seans sayılarından biri 40'tır. İstemli hareketleri gerçekleştirme yeteneği geri kazanıldığından, FES kullanımı, müdahalenin sonunda tamamen kesilene kadar kademeli olarak azaltılır.

FEST'in üç temel bileşeni vardır. İlk olarak, terapi alan bireyler hareketi denemelidir (genellikle onlardan işlevsel bir motor görevi tamamlamalarını isteyerek elde edilir). İkinci, elektriksel stimülasyon, motor yanıtı ve doğru ve uyumlu duyuşsal geri bildirimi üreten pratik görevi kolaylaştırır. Bu bağlamda uyarım, yalnızca kullanıcının istemli olarak üretmediği hareketler için kullanılır. Üçüncüsü, bir terapist, hareketin doğruluğunu ve kalitesini sağlamak için hareket halindeki uzvu yönlendirir. Terapist ayrıca, kullanıcının FEST müdahalesi sırasında kaydettiği ilerlemeye bağlı olarak elektrot yerleştirme ve stimülasyon parametrelerini uygun şekilde değiştirir. Bir hastanın hareket etme niyetinin tekrarlanan eşzamanlı mevcudiyetinin ve FES destekli hareketten kaynaklanan duyuşsal geri bildirimin, nihayetinde istemli motor fonksiyonun restorasyonuna yol açan nöroplastik değişiklikler ürettiğine inanılmaktadır (15, 29).

7 FES'in Serebral Palsi'de Kullanımı

Çocukluk çağında engelliliğin en sık nedenlerinden biri olan SP, kas tonusunu, duruşu ve hareketi etkileyen, ilerlemeyen bir motor fonksiyon bozukluğudur. Bozukluğun kendisi ilerleyici olmamakla birlikte, kas-iskelet sistemi ve merkezi sinir sistemi geliştikçe klinik ifade zaman içinde değişebilir. Motor bozukluk genellikle fonksiyonel yeteneklerde ve hareketlerde sınırlamalara sebep olur. Ayrıca SP, motor kontrolü bozabilir ve yürüme gibi çocukların günlük aktivitelerinin gerektirdiği çeşitli motor becerileri engelleyebilir. SP tedavisinin amaçlarından biri fonksiyonel kapasitelerini mümkün olduğu kadar arttırmaktır (31).

SP'de hem spastisite hem de zayıflığın ele alınmasında popülerlik kazanan bir yöntem, FES'tir. Etkilenmemiş periferik sinirlerin ilgili kaslarını işlevsel bir şekilde aktive etmeleri için uyarılmasıyla karakterize edilir (32). Agoniste elektriksel uyarı uygulayarak, motor ünite alımını artırarak ve kasılabilir kas liflerini artırarak kas güçlendirmesi sağlanır ve sonuçta kasta hipertrofi oluşur. Ek olarak, antagonist uygulanan elektrik stimülasyonu, karşılıklı inhibisyon yoluyla agoniste tonusun azalmasına neden olabilir (33).

7.1. Serebral Palsi'de Ayak Bileği Dorsi Fleksörlerine FES Uygulanması

Spastisite genellikle hareketliliği, özellikle yürümeyi engeller. Ayak bileği plantar fleksörlerinin spastisitesi ve ayak bileği dorsifleksörlerinin (m.tibialis anterior gibi) zayıflığı ve zayıf seçici kontrolü, düşük ayağa veya gerçek ekinusa yol açabilir (34).

Sonuç olarak, SP'li hastalarda genellikle yürüme mesafesi (yorgunluk) azalır ve tökezleme ve düşme insidansı artar. Bilek-ayak ortezleri sıklıkla zayıflamış kasları desteklemek için kullanılır, ancak aktif hareketleri kısıtlayabilir ve böylece kas zayıflığını şiddetlendirebilir (35).

FES, dinamik fonksiyonel bir ortez işlevi görebilir. Mekanizma, aksonun bir elektrik alanı tarafından depolarizasyonuna dayanır. Elektrik alanın hızı ve şiddeti yeterli ise motor üniteyi harekete geçiren çift yönlü aksiyon potansiyeli oluşur.

Kas liflerinin doğrudan depolarizasyonu da mümkündür, ancak bu, 10 ila 100 kat daha fazla akım gerektirir (36). Düşük ayakta FES, yürüyüşün salınım fazı sırasında ayağın dorsifleksör kaslarını aktive ederek ortak peroneal siniri uyarmak için kullanılır (1,37).

Pool ve ark. (2015) kişinin ayak parmağını sürüklemeye ve düşme sıklığında bir azalma göstermiştir. Ayrıca, kendileri tarafından algılanan performans ve memnuniyette iyileşmeler göstermiştir (37).

Meilahn ve ark.(2013)stimülatörü takarken çeşitli fiziksel aktiviteler gerçekleştirdiğini bildirmiştir. En sık katılım bisiklet ve koşu olmuştur (38). Çoğu çalışma FES'in günlük yaşamla uyumlu olduğuna dair kanıt sağlamıştır: Meilahn ve ark. (2013) farklı zaman noktalarında, katılımcıların %71 ila %89'unun FES'i ayak bileği-ayak ortezleri ile tedaviye tercih ettiğini bulmuşlardır ve Prosser ve ark. (2013) katılımcıların %86'sının FES tedavisine devam etmeyi seçtiğini bildirmiştir (38).

Üç çalışma, yürüyüş döngüsünün iki anında ayak bileği dorsifleksiyonunda ortotik bir iyileşme (yani daha fazla dorsifleksiyon) göstermiştir: ilk temas ve salınımda tepe açısı (1, 37). Van der Linden ve ark. (2008) Gillette yürüyüş İndeksini kullanarak ortotik bir iyileşme bildirmiştir (1).

Ayrıca, diğerleri anlamlı olmayan bir artış bildirmesine rağmen, yürüme hızında istatistiksel olarak anlamlı bir ortez düşüşü göstermiştir (1,37,39,).

7.2. Botulinum Nörotoksin-A(BoNT-A) ile Ek Tedavi Olarak FES

Botulinum Nörotoksin-A(BoNT-A); Clostridium Botulinum adlı bakteriden elde edilen protein yapıda bir çeşit toksindir. BoNT-A, iskelet kolinerjik sinir terminallerinin presinaptik hücre zarınayüksekafiniteyle bağlanır. Nöromüsküler iletimin geçici blokajına yol açan bu özel tropizm ve katalitik aktivite, aşırı aktif

kas rahatsızlıklarıyla ilişkili nörolojik rahatsızlıkları olan hastalarda BoNT-A'nın terapötik kullanımının temelini oluşturur. Özellikle, BoNT-A, inme, multipl skleroz, travmatik beyin hasarı, omurilik hasarı, tümörler, nörodejeneratif bozukluklar ve SP gibi yetişkinleri ve çocukları etkileyen çeşitli nörolojik rahatsızlıkların bir sonucu olarak ortaya çıkabilen spastisite yönetimi için birinci basamak tedaviyi temsil eder (39). BoNT-A sonrası dönemde aktif ayak bileği dorsal fleksiyonundaki artış, FES sonrası ve kontrol sonrası aşamalardaki kadar büyük değildir. Bu, bu iki tedavinin birbiri üzerinde güçlendirici bir etkisi olduğu anlamına gelebilir (1,37,38).

FES ve BoNT-A'nın sinerjizmi için olası mekanizmalar, BoNT-A'nın kas aktivitesi ile yayılması (FES tarafından indüklenen) ve daha önce bahsedildiği gibi agonist aktivasyonu sırasında antagonistin karşılıklı inhibisyonudur (40). Ayrıca, gastroknemius kasına yönelik BoNT-A tedavisi ve ayak bileği dorsifleksörlerine yönelik FES kombinasyonu, yalnızca bir yöne odaklanmak yerine hem plantar fleksör spastisitesini hem de dorsifleksör zayıflığını ele alır. Bununla birlikte, bu konunun, bu etkileri doğrulamak için ek bir uzun vadeli prospektif çalışmalara ihtiyacı vardır (41).

7.3. Serebral Palsili Çocuklarda FES ile Birlikte Bisiklet Eğitimi

Bisiklete binme, kas ve kardiyovasküler sistemleri zorlayan ve potansiyel olarak daha iyi sağlık, zindelik ve esenliğe yol açan bir egzersizdir. FES ile bisiklete binme, öncelikle omurilik yaralanması olan kişiler için kullanılmıştır; kemik mineral yoğunluğunda, kas gücünde (kuvvet oluşturma kapasitesi) ve kardiorespiratuar ölçümlerde iyileşmeler gözlemlenmiştir (42). FES bisiklet programlarının artan kas boyutu, azaltılmış spastisite ve kontraktürler, iyileşmiş nörolojik ve fonksiyonel performans olmak üzere önemli fiziksel faydalar sağladığı bildirilmiştir (43).

Yapılan bir çalışma FES uygulamalarının SP'li çocukların daha yüksek bisiklet tempolarına ulaşmalarına yardımcı olabileceğini ve eğitimin sona ermesinden sonra bu kazanımların kadansta korunmasına yardımcı olabileceğini göstermiştir. SP'li çocuklarda, birkaç vaka çalışması, FES eğitimini takiben kadansta, güç çıkışında, kalp atış hızında ve kas kuvvetinde iyileşme ve ko-kontraksiyon ve oksijen harcamasında azalma göstermiştir (44).

7.4. Serebral Palsili Çocuklarda FES'in Yürüyüş Parametreleri Üzerine Etkisi

FES tedavisinin serebral palsili çocukların yürüme hızını ve adım uzunluğunu artırabileceğini ve bunun da serebral palsili çocukların yürümesini iyileştirebileceğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Sonuçlar, artan yürüme hızının ve adım uzunluklarının serebral palsili çocuklarda yürüme yeteneğini geliştirebileceğini göstermiştir (45).

FES, ayak bileği eklemının dorsifleksiyonunu kolaylaştırmak ve ayağın düşmesini önlemek için temel olarak ortak peroneal sinir gibi uygun kas gruplarını uyararak yürüme döngüsünde uygulanır. Bu nedenle, FES yürüyüş salınım durumu sapmasını düzeltebilir ve yürüme yeteneğini geliştirebilir. Klinik rehabilitasyonda, FES esas olarak kas gücünü artırmak, kas spazmlarını azaltmak ve egzersiz modunu iyileştirmek için kullanılır. Ayrıca, FES cihazı küçük boyutlu ve kullanımı kolay olduğundan klinikte yaygın olarak kullanılmaktadır (46).

7.5. FES'in Serebral Palsili Çocuklarda Gövde Üzerine Etkisi

SP'li çocuklarda FES uygulamasının oturmada dengeyi sağladığı, karın-sırt kaslarına uygulanan FES'in gövde kontrolünü sağlamaya yönelik konvansiyonel terapi ile birlikte konvansiyonel terapiye göre daha etkili olduğu yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. SP'li çocuklarda kullanıldığında karın-arka sırt kaslara yapılan FES uygulaması cobb ve kifoz açıları azaltmıştır ve oturma dengesini artırmıştır. SP'li çocuklar tarafından iyi tolere edilir ve rehabilitasyon programına olumlu katkılar sunar (7).

7.6. FES'in Serebral Palsili Çocuklarda Üst Ekstremité Üzerine Etkisi

FES, merkezi sinir sistemindeki bir yaralanmadan kaynaklanan inmeli bireylerde, bu hastaların gönüllü olarak oluşturamadığı vücut fonksiyonlarını oluşturmak için kullanılabilir. FES uygulamalarına yönelik iki yaklaşım vardır. Her iki yaklaşımda da FES, farklı kasların kasılmalarını düzgün bir şekilde sıralayarak istenen vücut fonksiyonunu oluşturabilen bir nöroprotez oluşturmak için kullanılır. Birinci düzenlemede nöroprotez, hastanın istenen fonksiyonu yerine getirebilmesi için her gün kullanması gereken bir orteze olarak kullanılır. İkinci yaklaşım, sistemin hastanın uzvunu gönüllü olarak nasıl kontrol edeceğini yeniden öğrenmesine yardımcı olmak için kullanıldığı kısa süreli bir terapi olarak aynı nöroprotezi kullanmaktır. FES terapisi sırasında hasta, fonksiyonel elektriksel uyarım yardımıyla istenen vücut

fonksiyonlarını nasıl gerçekleştireceği konusunda eğitilir ve zamanla hastanın merkezi sinir sistemi görevi kendi başına nasıl gerçekleştireceğini yeniden öğrenir. Bu terapinin arkasındaki temel mekanizma nöroplastisitedir (48). FES, paretik kol ve elin aktif (bireysel olarak başlatılan), tekrarlayan, göreve özgü hareketini vurgular ve inme ve omurilik yaralanması gibi nörolojik rahatsızlıkları olan bireylerde üst ekstremitenin işlevini, eklem hareket açıklığını artırdığı, kas gücünü geliştirdiği ve tonusunu iyileştirdiği gösterilmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, özellikle subakut inmeli yetişkinlerde el becerisi, eklem hareket açıklığı ve günlük yaşam aktivitelerinde iyileşmeler gösterilmiştir. Uzun farkındalığının artması ve duysal işlevin iyileştirilmesinin faydaları da bildirilmiştir (48, 49). Son zamanlarda, çok kanallı FES'in edinilmiş bir inmeye bağlı hemiplejisi olan ergenlerde kol ve el fonksiyonunu iyileştirmede (daha iyi istemli kavrama fonksiyonu dahil) etkili olduğu ve bu etkililiğin çok kanallı FES tedavisinin vasküler yaralanmadan en az bir yıl sonra kronik aşamada sağlandığı bulunmuştur. Bununla birlikte, çok kanallı FES'in SP'li bireylerde kullanımı nadiren araştırılmıştır. Çocuklarda kronik hemipleji sonucu oluşan şiddetli tek taraflı üst ekstremitte felcini tedavi etme amacıyla klinik bir müdahale olarak FES terapisinin etkinliğini inceleyen bir çalışmada uzanma ve kavrama becerilerinin iyileştirildiği gösterilmiştir (48). Bir çalışma hemiplejik SP'li çocuklarda el bileği ekstansör kaslarına yapılan 6 haftalık FES uygulamasının el bileği fonksiyonlarını iyileştirdiğini göstermiştir (50). Ancak FES'in SP'de üst ekstremitte fonksiyonlarını inceleyen daha çok çalışmaya ihtiyaç vardır.

➤ SONUÇ

FES, klinik rehabilitasyon ve müdahalede yaygın olarak kullanılan bir tür nöral stimülasyon cihazıdır. Şu anda, esas olarak fonksiyonel eylemlerin kontrolünü ve yürütülmesini geliştirmek için bozulmuş motor kontrol yeteneği olan kasları veya sinirleri uyarmak için kullanılmaktadır. Klinik rehabilitasyonda, FES kas gücünü artırmak, kas spazmlarını azaltmak ve egzersiz modunu iyileştirmek için kullanılır. Ayrıca, FES cihazı küçük boyutlu ve kullanımı kolay olduğundan klinikte yaygın olarak kullanılmaktadır. FES, ayak bileği eklemine dorsifleksiyonunu kolaylaştırmak ve ayağın düşmesini önlemek için temel olarak ortak peroneal sinir gibi uygun kas gruplarını uyarak yürüme döngüsünde uygulanır. Bu nedenle, FES yürüyüş salınım durumu sapmasını düzeltebilir ve yürüme yeteneğini geliştirebilir. Uzanma ve kavrama gibi üst ekstremitte fonksiyonlarını kolaylaştırmak için FES sistemleri de oluşturulmuştur. Genellikle kavramanın yanı sıra serbest bırakmak için

tasarlanırlar, böylece nesnelerin manipüle edilmesini mümkün kılarlar.

FES tedavisi SP'li çocukların yürüme hızını ve adım uzunluğunu artırabilir ve bu çocukların yürümesini iyileştirebilir. SP'li çocuklarda kullanıldığında karın-sırt kaslarına yapılan FES uygulaması Cobb ve kifoz açılarını azaltmakta ve oturma dengesini artırmaktadır. FES ile birlikte bisiklet ergometresi SP'li çocuklarda kas gücünde (kuvvet oluşturma kapasitesi) ve kardiorespiratuar ölçümlerde iyileşmelere neden olmuştur. FES ile bisiklet eğitiminin artan kas boyutu, azalmış spastisite ve kontraktürler, iyileşmiş nörolojik ve fonksiyonel performans olmak üzere önemli fiziksel faydalar sağlamaktadır. BoNT-A sonrası dönemde aktif ayak bileği dorsifleksiyonundaki artış, BoNT-A 'ya ek olarak FES uygulamasında daha büyüktür. FES, paretik kol ve elin aktif, tekrarlayan, göreve özgü hareketini kolaylaştırır ve inme ve omurilik yaralanması gibi nörolojik rahatsızlıkları olan bireylerde üst ekstremitenin işlevini, eklem hareket açıklığını artırdığı, kas gücünü geliştirdiği ve tonusunu iyileştirdiği gösterilmiştir. Spastik SP'li hastalarda FES kullanımıyla aktivite ve katılımda iyileşmeler olduğuna dair sınırlı kanıt bulunmaktadır. FES SP'li çocuklar tarafından iyi tolere edilir ve rehabilitasyon programına olumlu katkılar sunar.

Teşekkür: Bulunmamaktadır.

Etik Onay: Bu çalışma bir derleme olduğundan etik kurul onayı gerekmemektedir.

Yazarların Katkıları: Fikir/Kavram: A.O., Y.K.; Tasarım: A.O.; Denetleme: A.O.; Kaynaklar: A.O., Y.K.; Materyaller: A.O., Y.K.; Veri Toplama ve/veya İşleme: A.O.; Analiz ve/veya Yorum: A.O., Y.K.; Literatür Taraması: A.O., Y.K.; Yazım: A.O., Y.K.; Eleştirel İnceleme: A.O.

Çıkar Çatışması: Yazarların beyan edecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Finansal Destek: Bu çalışma için herhangi bir finansal destek veya fon sağlanmamıştır.

“

Bu derleme Konuralp 2. Ulusal Tıp ve Sağlık Bilimlerinde Multidisipliner Çalışmalar Kongresinde 02.03.2025 tarihinde özet bildiri olarak sunulmuştur.

”

➤ KAYNAKÇA

1. Van der Linden ML, Hazlewood ME, Hillman SJ, Robb JE. Functional electrical stimulation to the dorsiflexors and quadriceps in children with cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther.* 2008;20(1):23-29.
2. Daly JJ, Zimbelman J, Roenigk KL, et al. Recovery of coordinated gait: randomized controlled stroke trial of functional electrical stimulation (FES) versus no FES, with weight-supported treadmill and over-ground training. *Neurorehabil Neural Repair.* 2011;25(7):588-596.
3. Popovic MR, Thrasher TA, Bowlin GL, et al. *Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering.* New York: Informa Healthcare. 2004; 1056-1065.
4. Ardiçoğlu Ö. Fonksiyonel Elektriksel Stimülasyon. *Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon.* 3. Baskı. Ankara: Güneş Tıp Kitabevleri; 2016.
5. Özdiñler A, Dilşen G. Hemiplejik hastalarda yürüme rehabilitasyonunda zaman uzaklık değişkenleri üzerine FES ve NMES in etkilerinin karşılaştırılması. *Türkiye Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon Dergisi.* 1998; 1(3): 55-57.
6. Weber RC. *Functional neuromuscular stimulation in rehabilitation medicine principles and practice.* Philadelphia. 1993; 403-476.
7. Karabay İ, Dogan A, Arslan MD, et al. Effects of functional electrical stimulation on trunk control in children with diplegic cerebral palsy. *Disabil Rehabil.* 2012;34(11): 965-970.
8. Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomed Eng Online.* 2020; 24:19(1):34.
9. Balmaseda MT Jr, Fatehi MT, Koozekanani SH, et al. Burns in functional electric stimulation: two case reports. *Arch Phys Med Rehabil.* 1987 Jul;68(7):452-453.
10. Cozean CD, Pease WS, Hubbell SL. Biofeedback and functional electric stimulation in stroke rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil.* 1988 Jun;69(6):401-5.
11. Damiano DL, Prosser LA, Curatalo LA, et al. Muscle plasticity and ankle control after repetitive use of a functional electrical stimulation device for foot drop in cerebral palsy. *Neurorehabilitation and neural repair.* 2013;27(3):200-207.
12. Jaqueline da Cunha M, Rech KD, Salazar AP, et al. Functional electrical stimulation of the peroneal nerve improves post-stroke gait speed when combined with physiotherapy. A systematic review and meta-analysis. *Ann Phys Rehabil Med.* 2021;64(1):101388.
13. Kapadia NM, Nagai MK, Zivanovic V, et al. Functional electrical stimulation therapy for recovery of reaching and grasping in severe chronic pediatric stroke patients. *J Child Neurol.* 2014 Apr;29(4):493- 9.
14. Triolo RJ, Bieri C, Uhler J, et al. Implanted functional neuromuscular stimulation systems for individuals with cervical spinal cord injuries: clinical case reports. *Arch Phys Med Rehabil.* 1996;77(11):1119-1128.
15. Liberson WT, Holmquest HJ, Scot D, et al. Functional electrotherapy: stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients. *Arch Phys Med Rehabil.* 1961; 42:101-105.
16. Taylor PN, Burridge JH, Dunkerley AL, et al. Clinical use of the Odstock dropped foot stimulator: its effect on the speed and effort of walking. *Arch Phys Med Rehabil.* 1999;80(12):1577-1583.
17. Kralj A, Bajd T, Turk R. Enhancement of gait restoration in spinal injured patients by functional electrical stimulation. *Clin Orthop Relat Res.* 1988; 233:34-43.
18. Popovic D, Tomović R, Schwirtlich L. Hybrid assistive system-the motor neuroprosthesis. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1989;36(7):729-737.
19. Solomonow M, Baratta R, Hirokawa S, et al. The RGO Generation II: muscle stimulation powered orthosis as a practical walking system for thoracic paraplegics. *Orthopedics.* 1989;12(10):1309-15.
20. Thrasher TA, Flett HM, Popovic MR. Gait training regimen for incomplete spinal cord injury using functional electrical stimulation. *Spinal Cord.* 2006;44(6):357-361.
21. Rebersek S, Vodovnik L. Proportionally controlled functional electrical stimulation of hand. *Arch Phys Med Rehabil.* 1973;54(8):378-382.
22. IJzerman MJ, Stoffers TS, Groen FIT, et al. The NESS Handmaster orthosis: restoration of hand function in C5 and stroke patients by means of electrical stimulation. *J Rehabil Sci.* 1996;9(3):86-89.

23. Prochazka A, Gauthier M, Wieler M, et al. The bionic glove: an electrical stimulator garment that provides controlled grasp and hand opening in quadriplegia. *Arch Phys Med Rehabil.* 1997;78(6):608-614.
24. Smith B, Tang Z, Johnson MW, et al. An externally powered, multichannel, implantable stimulator-telemeter for control of paralyzed muscle. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1998;45(4):463-475.
25. Ilic M, Vasiljevic D, Popovic DB. A programmable electronic stimulator for FES systems. *IEEE Trans Rehabil Eng.* 1994;2(4):234-239.
26. Popovic MR, Keller T. Modular transcutaneous functional electrical stimulation system. *Med Eng Phys.* 2005;27(1):81-92.
27. Popovic MR, Keller T, Pappas IP, et al. Surface-stimulation technology for grasping and walking neuroprosthesis. *IEEE Eng Med Biol Mag.* 2001;20(1):82-93.
28. Hebert DA, Bowen JM, Ho C, et al. Examining a new functional electrical stimulation therapy with people with severe upper extremity hemiparesis and chronic stroke: a feasibility study. *Br J Occup Ther.* 2017;80(11):651-659.
29. Vodovnik L, Kralj A, Stanic U, et al. Recent applications of functional electrical stimulation to stroke patients in Ljubljana. *Clin Orthop Relat Res.* 1978;(131):64-70.
30. Rosenbaum P, Paneth N, Leviton A, et al. A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Dev Med Child Neurol Suppl.* 2007; 109:8-14.
31. Delgado MR, Albright AL. Movement disorders in children: definitions, classifications, and grading systems. *J Child Neurol.* 2003;18 Suppl 1:S1-8.
32. Matsumoto S, Shimodozono M, Noma T, et al. Effect of functional electrical stimulation in convalescent stroke patients: A multicenter, randomized controlled trial. *J Clin Med.* 2023;12(7):2638.
33. Reed B. The physiology of neuromuscular electrical stimulation. *Pediatr Phys Ther.* 1997; 9:96- 102.
34. Rodda J, Graham HK. Classification of gait patterns in spastic hemiplegia and spastic diplegia: a basis for a management algorithm. *Eur J Neurol.* 2001; (Suppl. 5): 98-108.
35. Pool D, Blackmore AM, Bear N, et al. Effects of short-term daily community walk aide use on children with unilateral spastic cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther.* 2014; 26: 308- 17.
36. Moll I, Marcellis RGJ, Fleuren SM, et al. Functional electrical stimulation during walking in children with unilateral spastic cerebral palsy: A randomized cross-over trial. *Dev Med Child Neurol.* 2024;66(5):598-609.
37. Pool D, Valentine J, Bear N, et al. The orthotic and therapeutic effects following daily community applied functional electrical stimulation in children with unilateral spastic cerebral palsy: a randomised controlled trial. *BMC Pediatr.* 2015; 15: 154.
38. Meilahn JR. Tolerability and effectiveness of a neuroprosthesis for the treatment of footdrop in pediatric patients with hemiparetic cerebral palsy. *PMR.* 2013; 5: 503-509.
39. Picelli A, Filippetti M, Sandrini G, et al. Electrical stimulation of injected muscles to boost botulinum toxin effect on spasticity: rationale, systematic review and state of the art. *Toxins.* 2021;13(5):303.
40. Wilkenfeld AJ. Review of electrical stimulation, botulinum toxin, and their combination for spastic drop foot. *J Rehabil Res Dev.* 2013; 50: 315-326.
41. Moll I, Vles JSH, Soudant DLHM, et al. Functional electrical stimulation of the ankle dorsiflexors during walking in spastic cerebral palsy: a systematic review. *Dev Med Child Neurol.* 2017;59(12):1230-1236.
42. Sadowsky CL, Hammond ER, Strohl AB, et al. Lower extremity functional electrical stimulation cycling promotes physical and functional recovery in chronic spinal cord injury. *J Spinal Cord Med.* 2013;36(6):623-631.
43. Özen N, Unlu E, Karaahmet OZ, et al. Effectiveness of Functional Electrical Stimulation - Cycling Treatment in Children with Cerebral Palsy. *Malawi Med J.* 2021;33(3):144-152.
44. Sansare A, Harrington AT, Wright H, et al. Aerobic Responses to FES-Assisted and Volitional Cycling in Children with Cerebral Palsy. *Sensors (Basel).* 2021;21(22):7590.
45. Zhu Q, Gao G, Wang K, et al. Effect of Functional Electrical Stimulation on Gait Parameters in Children with Cerebral Palsy: A Meta-Analysis. *Comput Math Methods Med.* 2022;3972958.
46. Moll I, Marcellis RGJ, Coenen MLP, et al. A randomized crossover study of functional electrical stimulation during walking in spastic cerebral palsy: the FES on participation (FESPa) trial. *BMC Pediatr.* 2022;22(1):37.

47. Chiu HC, Ada L. Effect of functional electrical stimulation on activity in children with cerebral palsy: a systematic review. *Pediatr Phys Ther.* 2014;26(3):283-288.
48. Kapadia NM, Nagai MK, Zivanovic V, et al. Functional electrical stimulation therapy for recovery of reaching and grasping in severe chronic pediatric stroke patients. *J Child Neurol.* 2014;29(4):493-499.
49. Garzon LC, Switzer L, Musselman KE, et al. The use of functional electrical stimulation to improve upper limb function in children with hemiplegic cerebral palsy: A feasibility study. *J Rehabil Assist Technol Eng.* 2018; 14;5:2055668318768402.
50. Wright PA, Granat MH. Therapeutic effects of functional electrical stimulation of the upper limb of eight children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2000;42(11):724-727.