

Geliş Tarihi:14.08.2018
Kabul Tarihi:10.03.2019
SPORMETRE, 2019,17(1),1-19
DOI: 10.33689/spormetre.453587

ELEKTRİKSEL KAS UYARIMLARININ BİYOKİMYASAL, FİZYOLOJİK VE NÖRAL MEKANİZMASI

Celil KAÇOĞLU¹, Mehmet KALE²

^{1,2}Eskişehir Teknik Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Öz: Sportif performans artışı sağlamanın yanında rehabilitasyon amaçlı yaygın olarak kullanılan elektriksel kas uyarım yöntemi ya da diğer adıyla elektromyostimülasyon (EMS) deri üzerinden kas ya da sinir bölgelerine elektrotlar aracılığıyla uygulanan elektriksel akımlarla kas kontraksiyonu elde etme ve bu yolla hızlı motor ünitelerin yavaş motor ünitelerle beraber senkronize katılımıyla antrene edilerek, fiziksel performansta fonksiyonel artışlar elde etme amaçlı kullanılan konvansiyonel olmayan bir egzersiz metodudur. Bu şekilde EMS'nin hem sinir dalları hem de kas liflerinde iyon hareketini tetikleyerek aksiyon potansiyeli oluşturması, motor ve duyuşal nöral girdilerle spinal ve supraspinal merkezleri aktive etmesi ve ayrıca antrenman süreci sonrası hipertrofişiz kuvvet kazanımları ile ünilateral EMS sonucu kontrolateral kasta da kuvvet kazanımlarının ortaya çıkması EMS'nin nöromuskuler sisteme biyokimyasal, fizyolojik ve nöral etkileri olduğu düşüncesini desteklemektedir. Bu nedenle EMS'nin insan vücuduna etkileri altında yatan biyokimyasal, fizyolojik ve nöral mekanizmalarını incelemeye odaklanmış olan bu derlemede ilk olarak EMS'nin tarihsel gelişimine değinilmiş sonraki kısımda ise EMS'nin biyokimyasal, fizyolojik ve nöral mekanizmaları incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı EMS'nin insan vücuduna etkileri altında yatan mekanizmaların ortaya konarak bu yolla sportif performans ve rehabilitasyon amaçlı kullanımını daha net ve daha bilimsel temellere dayanarak daha EMS uygulamalarının etkin kullanımına katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektromyostimülasyon, İyon Hareketi, Aksiyon Potansiyeli, Refleks Kasılma, Motor Ünite Katılımı

BIOCHEMICAL, PHYSIOLOGICAL AND NEURAL MECHANISMS OF ELECTRICAL MUSCLE STIMULATIONS

Abstract: Electrical muscle stimulation (EMS), which is widely used for rehabilitation purposes and sporty performance enhancement, is used to obtain muscular contractions by means of electrical currents applied to the muscle or nerve regions via the skin, is an unconventional exercise method that is used to obtain functional gains in physical performance. In this way, EMS generates action potentials by triggering ion movements in both nerve branches and muscle fibers, activates spinal and supraspinal centers by motor and sensory neural inputs, as well as the generation of force gains after unilateral EMS training periods resultant contralateral homologues muscle strength, these factors support biochemical, physiological and neural effects on neuromuscular system. This review focuses on the biochemical, physiological and neural mechanisms underlying EMS's effects on the human body. The historical development of EMS discussed in the first part of the review and biochemical, physiological and neural mechanisms of EMS examined in the next section. The purpose of this study was to contribute to the effective use of EMS applications based on clearer and more scientific bases for the purposes of sportive performance and rehabilitation by examining underlying mechanisms of human body.

Key Words: Electromyostimulation, Ion Movement, Action Potential, Reflex Contraction, Motor Unit Recruitment

GİRİŞ

Teknolojideki son ilerlemeler ve yenilikçi alternatif egzersiz yöntemleri geliştirme ihtiyacı, konvansiyonel direnç antrenmanlarına benzer şekilde iskelet kasında kontraksiyona yol açan çeşitli konvansiyonel olmayan sistemlerin kullanımını artırmıştır. Yapay olarak kas ve sinir aktivasyonu elde etme yöntemi olan elektriksel kas uyarımları ya da diğer bir ifadeyle elektromyostimülasyon (EMS) özellikle elit sporcuların sakatlık sonrası rehabilitasyonlarında ve rehabilitasyon sonrasında kas kuvvetinin geri kazanılmasında, uzun süren hareketsizlik dönemlerinde kas kütlesi ve kuvvetinin devamlılığını sağlamada, ileri yaşlarda ortaya çıkan kas atrofilerinden korunmada, kas aktivasyonunu kolaylaştırma amaçlı kullanım örnekleri bulunmaktadır (Morrissey, 1988; Gregory ve Bickel, 2005; Press ve Bergfeld, 2007; Frontera, 2008; Blickenstorfer ve ark., 2009; Cardinale ve ark., 2010; Imoto ve ark., 2011; Seyri ve Mafiuletti, 2011; Adams, 2018). Sağlıklı bireylerde ve performans sporcularında kas kuvveti ve dayanıklılığını, kardiovasküler verimi, toparlanma hızını, kan dolaşımını, eklem hareket açısını arttırmak, ağrıyı, kas spazmlarını ve ödemi azaltmak, masaj etkisi yaratmak ve performansı maksimize etmek için kullanılmaktadır (Maffiuletti ve ark., 2000; Brocherie ve ark., 2005; Herrero ve ark., 2010; Seyri ve Mafiuletti, 2011; Mosole ve ark., 2018). Fakat yapılan çalışmalar bu tür yöntemlerin farklı popülasyonlarda nasıl kullanılabileceğini açıklama ve anlamaya çalışırken ticari kaygılardan dolayı EMS'nin etkilerinde maalesef abartılmalar da ortaya çıkmış ve bu şekilde EMS'ye olan ilgi muazzam bir şekilde artış göstermiştir (Siff, 1990; Press ve Bergfeld, 2007; Maffiuletti ve ark., 2009).

Bu derlemenin amacı elektriksel kas uyarımlarının insan bedeni üzerindeki muhtemel etki mekanizmalarını ortaya koymak ve böylelikle bu yenilikçi antrenman metodunun sportif performans gelişimi ve rehabilitasyon amaçlı kullanım etkilerinin temelinde neler yattığı hakkında daha anlaşılır ve daha objektif bir bakış açısı sunmaktır. Ayrıca bu araştırmanın, araştırmacıların, antrenörlerin ve spor uzmanlarının EMS antrenman metodunu daha iyi anlamalarına ve etkin kullanmalarına katkı sağlaması ve ulusal literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bu amaçtan hareketle bu derlemenin ilk kısmında elektriksel kas uyarımlarının tarihsel gelişiminden kısaca bahsedilmiş ikinci kısmında ise biyokimyasal, fizyolojik ve nöral mekanizmaları incelenmiştir.

ELEKTRİKSEL KAS UYARIM METODUNUN TARİHSEL GELİŞİMİ

Sinir sisteminin anatomik olarak incelenmesi çok eski tarihlere dayandığı gibi (Çetkin ve ark., 2017; Bahşi ve ark., 2017), sinirler üzerine elektrikle yapılan terapilerin geçmişi de milattan öncelere dayanmaktadır. Antik Mısırlılar, Yunanlar ve Romalılar elektrik üreten balıkları ağrı tedavisinde kullanmışlardır. Onyedinci yüzyılın sonlarında hem Jan Swammerdam hem de Giovanni Borelli, bir kurbağa kasını uyan sinire statik elektrik akımları uygulayarak kas kontraksiyonlarını dışsal olarak tetiklemeyi başarmalardır (Smith, 2007; Gondin ve ark., 2011a). Onsekiz ve 19. yüzyıllarda bu doğal elektriksel akımlar zaman içerisinde gelişen teknolojiyle insan yapımı elektrik cihazlarıyla elde edilmeye başlanmıştır (Schechter, 1971; Heidland ve ark., 2013).

Tıbbi amaçlı elektrik kullanımı Petrus van Musschenbroek'in 1746'da Leyden Kavanozu olarak bilinen basit kondansatörü geliştirmesinden hemen sonra daha kolay hale gelmiş ve medikal olarak kullanım alanı bulmuştur (Beaudreau ve Finger, 2006). İtalyan fizikçi Jean Jallabert 1747'de bir hastasının paralize eline Leyden kavanozuyla elektrik stimülasyonu kullanarak uyarılmış ve çalışmasının sonunda gelişim elde etmiştir. Bu çalışması tedavi amaçlı elektriksel kas uyarımının başlangıcı olmuştur (Malmivuo ve Plonsey, 1995; Singh, 2005).

Luigi Galvani 1789 yılında evinde deney yaptığı sırada şans eseri kurbağa bacağına güçlü bir kasılma elde etmiştir. Galvani bununla dışsal elektrik akımlarının kas kasılmalarına neden olabilecek aksiyon potansiyelleri oluşturulabileceğini ve ayrıca sinirlerin iyi birer iletken olduğunu keşfetmiştir (Geddes ve Hoff, 1971; Bresadola, 1998; Burns, 2003; Loeb, 2005; Barr, 2015).

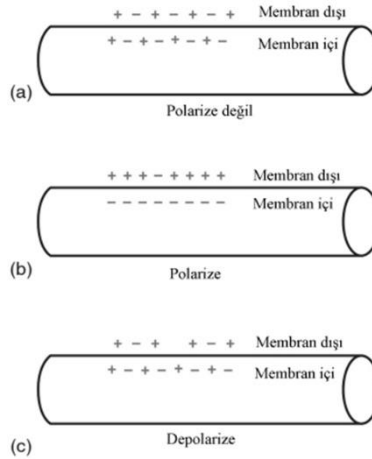
Modern elektroterapinin önde gelen isimlerinden olan Guillaume Duchenne de Boulogne 19. yüzyılın ortalarında Faraday'in geliştirdiği faradik akımları kullanarak yüz kaslarını uyarmayı başaran ilk kişidir (de Boulogne, 1990; Parent, 2005; Dehail ve ark., 2008; Singh, 2012).

Elektriksel akımların rehabilitasyon ve tedavi amaçlı kullanımı üzerine yapılan araştırmalar 20. yüzyılın başlarında artmaya başlamıştır. Sportif amaçlı kullanımına olan ilginin çoğu Rus bilim insanı Yakov Kots 1977 yılında Concordia Üniversitesinde verdiği bir konferansta yüksek frekanslı kısa süreli bir EMS yöntemiyle üst düzey sporcularda hızlı ve anlamlı derecede kuvvet kazanımları sağlanabileceğini iddialarından kaynaklanmıştır (Lloyd ve ark., 1986; Delitto, 2002; Ward ve Shkuratova, 2002; Dudley ve Stevenson, 2008). EMS uygulamalarının sportif performans artırma amaçlı olarak yüzme (Pichon ve ark., 1995), basketbol (Maffiuletti ve ark., 2000), voleybol (Malatesta ve ark., 2003; Marqueste ve ark., 2010), buz hokeyi (Brocherie ve ark., 2005), ragbi (Babault ve ark., 2007), tenis (Maffiuletti ve ark., 2009), futbol (Billot ve ark., 2010), jimnastik (Deley ve ark., 2011), atletizm (Russ ve ark., 2012), halter (Wax ve ark., 2013), kayaklı koşu (Govus ve ark., 2018) gibi birçok farklı spor dalında etkilerinin ele alındığı ve bu alanda literatüre katkılar sunmaya devam eden araştırmalarla birlikte EMS çalışmaları güncelliğini sürdürmeye devam etmektedir. Görüldüğü gibi yaklaşık 30 yıldır sporcularda yapılan EMS çalışmalarında büyük artışlar olmuş, çok çeşitli uygulamalar ve cihazlar üretilmiş ve bunun sonucu olarak EMS sporcular için yeni bir kuvvet antrenman metodu olarak dikkat çekmeye başlamıştır (Malatesta ve ark., 2003; Zatsiorsky ve Kraemer, 2006).

EMS'İN BİYOKİMYASAL MEKANİZMASI

EMS'nin biyokimyasal etkisi vücuttaki iyonları hareket ettirmesidir. Uyarılabilir dokulara elektriksel bir akım uygulandığında vücuttaki pozitif yüklü iyonlar negatif kutba doğru (katod), negatif yüklü iyonlar ise pozitif kutba doğru hareket ederler (anod). Eğer uyarı aralıklıysa akışın olmadığı aralıklarda elektronlar başlangıç pozisyonlarına geri dönerler. Normal bir sinirin içindeki ve dışındaki iyon konsantrasyonu sinir membranının dışındaki birikmiş sodyum ve kalsiyum konsantrasyonu ile membran içi sıvıda birikmiş potasyum iyonlarından dolayı farklıdır. Bundan dolayı bir sinirin içi ve dışı arasında -60 ile -90 milivolt (mV) arası potansiyel fark vardır. Dinlenim halindeki bir sinirde pozitif iyonlar hücre dışındayken negatif iyonlar hücre içindedir. Dinlenim membran potansiyelinde hücre dışı sodyum konsantrasyonu hücre içi sodyum konsantrasyonundan daha fazlayken potasyum için de bunun tam tersi söz konusudur. Bunun yanında membranın potasyum geçirgenliği sodyum geçirgenliğinden daha fazladır. Çünkü membranda sodyum kapısız-kanalından daha fazla potasyum kapısız-kanalı vardır. Bu yüzden dinlenim membran potansiyeli sodyum denge potansiyeline göre potasyum denge potansiyeline çok daha yakındır. Denge potansiyeli sinirde sodyum için +60mV potasyum için ise -100mV'dir. İyon dengesi membran boyunca yayılmış kanallardan etkilenir. Bu kanallar seçici şekilde belli iyonların geçişine izin verirken bazılarını engeller. Açık ya da kapalı halde bulunan iki tip kapı vardır. Bunlar voltaj kapılı ve kapısız kanallardır. Dinlenim potansiyelin korunmasında en büyük öneme sahip kapısız kanallar daima açıktır ve dış faktörlerden belirgin şekilde etkilenmezler. Bu geçitler sodyum ve potasyum iyonlarının pasif geçişlerine izin verirler (Nanda, 2008; Forehand, 2009; Treacy, 2013).

Uyarım olmadığında hücre membranı kutuplaşmamıştır (Şekil 1 a). Pozitif iyon sayısı membranın diğer tarafındaki negatif iyon sayısına eşittir. Elektriksel bir uyarıyla uyarılan bölge üzerinden plazma membranı boyunca potansiyel farkta bir düşüş meydana gelir. Bu düşüş belirli bir seviyeye ulaştığında membran sodyum iyonlarına karşı geçirgen hale gelir ve membran içi ve dışı arasında eşit olmayan iyon geçişi olur. Bundan dolayı membranda polarizasyon meydana gelir (Şekil 1 b). Membranın dışında negatif iyonlardan çok pozitif iyonlar, membran içinde ise pozitif iyonlardan çok negatif iyonlar vardır. Geçirgenliğin artmasıyla sodyum iyonları hücre içine hızlı bir şekilde akmaya başlar. Bu geçirgenlik hücre içindeki ve dışındaki iyon konsantrasyonunda farka neden olur. Potansiyel farktaki düşüş +25 ile +50 mV eşiğine gelene kadar polarizasyon ters yönlü olarak devam eder. Bu durumda membranın içi pozitif, dışı ise negatif yüklü olur ve buna sinirin depolarizasyonu denir (Şekil 1 c). Bu aktiviteden hemen sonra sodyum iyonları tekrar geri çekilirler ve uyarılmış bölüm dinlenik membran potansiyeline geri döner. Buna repolarizasyon denir. Membran potansiyellerindeki bu değişim aksiyon potansiyelidir ve aksiyon potansiyelinin oluşması için uyarının 12 mV'den büyük olması gerekir. Bu durumda sinirin aktif ve dinlenik bölümleri arasındaki potansiyel fark, aktif ve dinlenik bölümler arasında lokal elektron akışına neden olur (Nanda, 2008; Knight ve Draper, 2012).

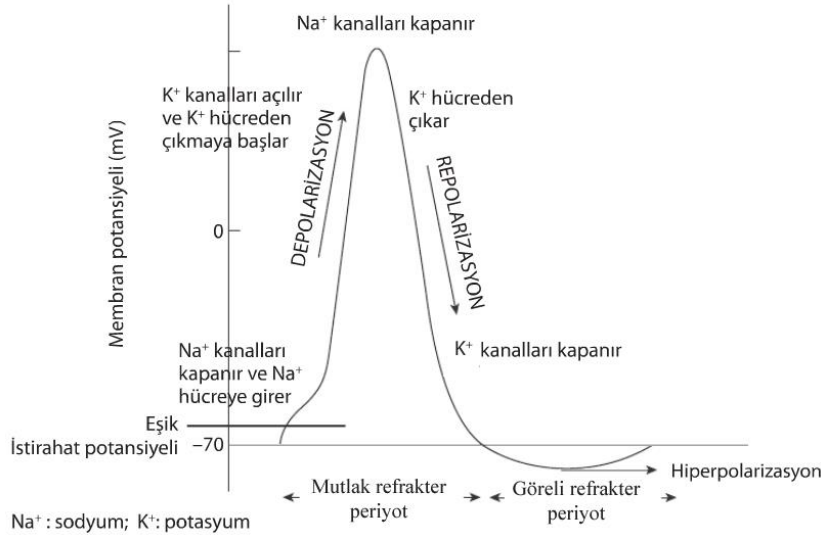


Şekil 1. Bir sinir membranın içi ve dışının üç durumda (polarize değil, polarize, depolarize) pozitif ve negatif iyon dağılımı (Knight ve Draper, 2012)

Aksiyon Potansiyeli

Aksiyon potansiyeli temel sinir iletim birimidir ve uyarıya yanıt olarak ortaya çıkan birbirini izleyen depolarizasyon ve repolarizasyonlarla gerçekleşir. Bunun anlamı bir uyarının sinir boyunca yayılmasıdır. Bir sinirin dinlenik haldeyken içi dışından daha negatif yüklüdür ve hücre içi ve dışı arasında -60 ile -90 mV potansiyel fark vardır (dinlenik membran potansiyeli). Bir sinir elektriksel olarak yeterli şiddet ve süreyle uyarıldığında membran uyarı bölgesi hızlı bir şekilde depolarize olur ve pozitif iyonlar hücre içine hareket ederken negatif iyonlar dışarı çıkar. Elektrik potansiyelindeki değişim, yakın membran dokusunun depolarize olmasına neden olur. Bu da yakındaki dokuda depolarizasyona neden olur ve depolarizasyon bu şekilde ilerlemeye devam eder. Bu membran potansiyeli +30 mV'a ulaşana kadar devam eder. Bundan sonra membranın sodyum geçirgenliği düşer ve potasyum kanalları açılarak potasyum geçirgenliği artar. Çünkü hücre içi potasyum konsantrasyonu artar. Daha sonra potasyum iyonları hücre dışına çıkar. Bu da sinirin repolarizasyonuna neden olur ve membran potansiyeli -60 ila -90 mV olan dinlenik duruma geri döner. Hücre membranın bu birbirini izleyen

depolarizasyon ve repolarizasyonu hücre membranı boyunca iyon akışıyla oluşur ve buna aksiyon potansiyeli denir. Uyarının şiddetini ya da süresini arttırmak için oluşan aksiyon potansiyelinin hızına ya da genliğine etkisi yoktur. Potansiyel oluşturabilecek bir uyarı bu uyarıdan binlerce kez daha şiddetli uyarıyla aynı aksiyon potansiyelinin oluşmasına neden olur. Bir aksiyon potansiyeli aynı zamanda sinir boyunca ilerleyen depolarizasyon dalgası olarak da tanımlanabilir (Şekil 2) (Nanda, 2008; Knight ve Draper, 2012).



Şekil 2. Bir aksiyon potansiyeli (Nanda, 2008; Treacy, 2013'ten uyarlanmıştır)

Aksiyon potansiyeli akson terminaline ulaştığında postsinaptik sinir ya da kas hücresiyle sinaps yaparak siniri uyarır. Bir motor sinirin akson dalları çok sayıda kas fibriliyle (bazı kaslarda binlerce) sinaps yapar. Bir motor sinirin sinaps yaptığı bütün kas fibrilleri motor ünite olarak tanımlanır. Bir motor ünite kas fibrillerinin tümü sinaps yaptığı sinir hücresinden gelen eşik seviyede uyarıyla (-70 ila +40 mV arası) tek bir aksiyon potansiyeline yanıt olarak maksimum kasılırlar. Yani eşik değerinde bir uyarıyla sodyum kanalları açılarak aksiyon potansiyeli tetiklenir. Bir aksonun başlangıcından itibaren aynı hızda ve birbirini izleyecek şekilde devam ederek azalma göstermeden aksonun sonlanım noktasına kadar devam eder. Eşik altı uyarılar ise aksiyon potansiyeli oluşturmak için yetersiz kalır. Eşik altı uyarılar sodyum kanallarının açılmasına yetecek kadar şiddetli olmadığından aksiyon potansiyeli oluşmaz. Bu fenomene "ya hep ya hiç" yasası denir. Buna göre yarım bir aksiyon potansiyeli oluşturmak da mümkün değildir (Clark, 2005; Khurana, 2005; MacIntosh ve ark., 2006; Sherwood, 2006; Sircar, 2008; Forehand, 2009; Knight ve Draper, 2012; Plotnik ve Kouyoumdjian, 2013).

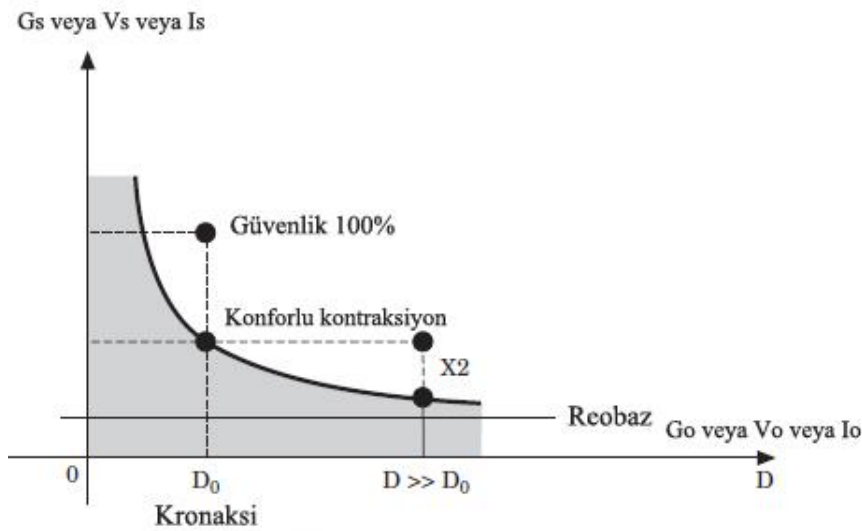
Bir aksiyon potansiyeli başladıktan sonra sinir repolarize olana kadar bir başka aksiyon potansiyeli oluşturulamaz. Membranın depolarizasyonunun başlangıcından tekrar uyarılabilir olacağı hiperpolarizasyon sonuna kadar olan süreye refrakter periyot denir (Şekil 2). Bu periyot görece ve mutlak refrakter periyot olmak üzere iki fazdan oluşur. Mutlak refrakter periyotta depolarizasyon ve repolarizasyon süresini içeren bu süre sırasında sodyum kanallarının açık olmasından dolayı hücre membranı bir aksiyon potansiyeli oluşturamaz. Bir aksiyon potansiyelinin repolarizasyon fazı sırasında aktive edilemeyen kanalların kapanmasından sonra kanallar bir süre daha kapalı kalır ve hiçbir şekilde başka bir aksiyon potansiyeli oluşturulamaz. Yani sinire güçlü bir uyarı uygulansa bile sinir daha fazla uyarılamaz. Mutlak refrakter periyodun önemi aksiyon potansiyeli ateşleme oranını sınırlaması ve aksiyon potansiyelinin yanlış yöne gitmesini engellemesidir. Göreli refrakter periyotta ise sodyum kanallarının bazıları

kaplanmış ve bir sonraki aksiyon potansiyeli için hazır durumdadır. Bazen bir aksiyon potansiyelinin repolarizasyonu dinlenik potansiyeli aşar ve dinlenik potansiyele dönmeden önce membranda kısa bir hiperpolarizasyon oluşturur. Bu potasyum geçirgenliği yüksek olduğu zaman meydana gelir. Böylece membran potansiyeli potasyum denge potansiyeline yaklaşır. Bu hiperpolarizasyon süresine karşılık gelen görece refrakter periyotta membran uyarılabilir. Fakat bunun için daha büyük bir uyarı gerekir. Uyarılabilirlik bu periyotta kademeli olarak geri kazanılır. Böylece yeni bir aksiyon potansiyeli için membran kısa zaman sonra uyarılabilir olur (Reilly, 1992; MacIntosh ve ark., 2006; Nanda, 2008; Forehand, 2009; Knight ve Draper, 2012).

Elektriksel Akımların Şiddet-Süre Eğrisi

Luigi Galvani, pil ve kapasitör kullanarak sinir uyarısı oluşturma çalışmaları sırasında bir sinir uyarısı oluşturmak için uyarının ne kadar şiddette ve süreyle uygulanacağı, uyarı ve uyarılabilirlik arasındaki ilişkisinin nasıl açıklanacağı gibi zorluklarla karşılaşmıştır. Akımın şiddet ve süresi arasındaki ilişki Hoorweg ve Weiss tarafından daha önce empirik olarak tanımlanmış olmasına rağmen ilk olarak Louis Lapicque bunu açıklayan teorik bir model oluşturmuştur. Lapicque, bir kontraksiyon oluşması için gerekli minimum akım şiddeti olan reobaz ve reobaz değerinin iki katı şiddetteki akımın bir uyarıya neden olması için gereken minimum süre olan kronaksi kavramlarını literatüre kazandırmıştır (Irnich, 2002; Brunel ve Van Rossum, 2007; Irnich, 2010).

Sinir fibrili eğer yeterli şiddette ve sürede uyarılırsa bir aksiyon potansiyeli ortaya çıkar. Belirli bir süre boyunca uygulanan minimum şiddette bir uyarı aksiyon potansiyeli oluşturur ve bu değer eşik şiddet olarak tanımlanır. Bir doku uyarılabilirliğinin uyarının şiddeti ve süresi tarafından belirlenmesi şiddet-süre eğrisi olarak tanımlanır (Ashley ve ark., 2005; Merrill ve ark., 2005). Uyarının şiddeti ve süresi arasındaki ilişki uyarının farklı sürelerde uygulanmasıyla her süre için farklı eşik şiddet değeri ortaya çıkar ve bunun sonucunda grafik şiddet-süre eğrisi ortaya çıkar (Khurana, 2005). Bu eğri atım süresi artarken uyarı genliğinin (şiddeti) düşüşüyle karakterizedir (Şekil 3) (Holsheimer ve ark., 2000). Şiddet ve süre ilişkisi sinir fibrili boyunca ilerleyen potansiyele göre değişiklik gösterir. Elektrot boyutuna, ısıya, polarizasyona ve elektrotlar arası mesafeye göre değişiklik gösterir (Tasaki, 1939; Irnich, 2010).



Şekil 3. Lapicque modeli: Elektriksel alan eşiği (Gs) ve atım süresi arasındaki ilişki (D). Gri bölge depolarizasyon için yetersiz elektriksel alan, beyaz bölge elektriksel alan için yeterli alan. İki bölgeyi ayıran eğri zamana göre eşik değer varyasyonlarını

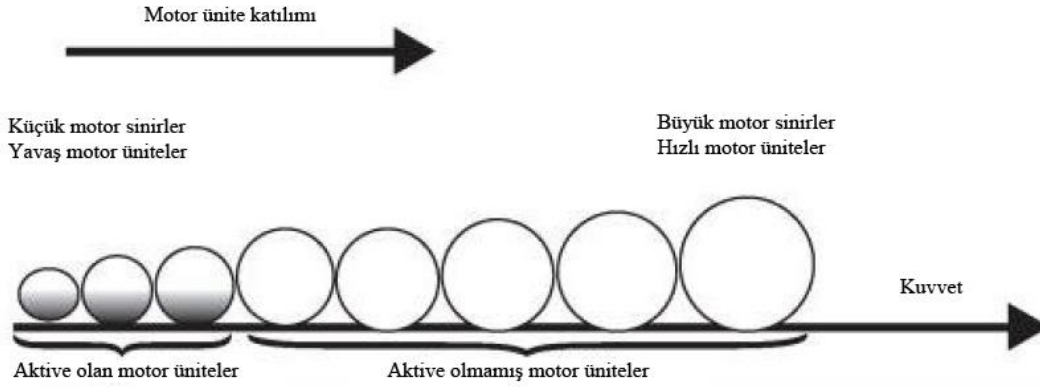
göstermektedir. Zamana bağlı olarak akım (Is) ya da Voltaj (Vs) değerlerini kullanarak aynı eğri elde edilebilir (Clementy ve ark., 2002).

EMS'İN FİZYOLOJİK MEKANİZMASI

Deri üzerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla kas ve sinirlere iletilen elektriksel akımlar motor nöronların depolarizasyonu ile direk, duyuşal afferentlerin depolarizasyonu ile da indirek aksiyon potansiyelleri oluşturarak kasta istemsiz bir kasılmaya neden olmaktadır. Uyarı bölgesine bakılmaksızın kontraksiyonlar öncelikle uyarıcı elektrodun altındaki motor aksonları uyarır. Bununla beraber duyuşal aksonları da aktive edebilir. Uyarıcıyı ileten elektrotlar lokal bir elektriksel alan yaratırlar ve bu da nöronlara yakın olan hücre membranlarını depolarize eder. Eğer depolarizasyon kritik eşiğe ulaşırsa hücre dışı boşluktan hücre içi boşluğa olan sodyum iyonlarının akışı uyarı bölgesinden her iki yöne doğru ilerlemeye başlayan bir aksiyon potansiyeli oluşturur. Distal yönlü olan potansiyel motor son plağa ulaşır ve kas fibrilinin kasılmasına neden olur (Siff, 1990; Peckham ve Knutson, 2005; Dehail ve ark., 2008; Bergquist ve ark., 2011; Kemmler ve von Stengel, 2012).

İstemli olarak aktive edilmesi zor olan çoğunlukta hızlı motor liflerin aktivasyonu EMS'nin teoride tek avantajıdır. EMS sırasında Henneman'ın motor ünite katılımını ifade eden boyut prensibi, geçerliliğini kaybetmektedir (Şekil 4) (Henneman ve ark., 1965; Zatsiorsky ve Kraemer, 2006; Dudley ve Stevenson, 2008; Ratamess, 2008). Bu boyut prensibine göre istemli kas kontraksiyonları sırasında inen yönlü nöral sürüş ve refleksif girdiler tarafından aktive edilen motor ünitelerin katılımı öncelikle küçük ünitelerden (daha az sayıda, daha küçük çaplı, yorgunluğa daha dirençli, yavaş kasılan fibriller), büyük ünitelere (daha çok sayıda, daha büyük çapta, çabuk yorulan, hızlı kasılan fibriller) doğrudur (Henneman ve ark., 1965; Dudley ve Stevenson, 2008; Bergquist ve ark., 2011). EMS sırasında ise motor ünite katılımında bu tür bir sıralama ve seçicilik olmadığından motor ünitelerin senkronize katılımı söz konusudur (Gregory ve Bickel, 2005). Katılım şeklinin elektrotların tipine, yüzeyine, yerleştirildiği konuma, uyarının geçtiği dokuların iletkenliğine ve elektrik akımının şiddetine bağlıdır (Dehail ve ark., 2008).

Elektriksel uyarılı kontraksiyonlar esnasında aktive olan motor ünitelerin aktivasyon sırasının istemli kasılma esnasındaki aktivasyon sırasının tersine dönerek hızlı motor ünitelerin ilk olarak aktive olduğu teorisini destekleyen araştırmalar olduğu gibi (Delitto ve Snyder-Mackler, 1990; Sinacore ve ark., 1990; Trimble ve Enoka, 1991; Enoka, 2002; Sheffler ve Chae, 2007; Paillard, 2008) seçici olmayan senkron motor ünite katılımını destekleyen araştırmalar (Gregory ve Bickel, 2005; Jubeau ve ark., 2007; Maffiuletti, 2010; Seyri ve Maffiuletti, 2011) ve motor ünite katılımının istemli kasılmalar sırasındaki katılımı aynı olduğunu belirten araştırmalar da bulunmaktadır (Knaflitz ve ark., 1990; Binder-Macleod ve ark., 1995; Thomas ve ark., 2002). Bunun yanında elektriksel uyarılı ve istemli kontraksiyonlar esnasındaki motor ünite katılımı arasında net bir ayırım olmadığını belirten araştırmalar (Requena ve ark., 2005; Dudley ve Stevenson, 2008) da bulunmaktadır.



Şekil 4. Henneman'ın motor nöron katılımında boyut prensibi (Zatsiorsky ve Kraemer, 2006)

EMS sırasında dışsal olarak uygulanan düşük elektriksel akımlarla büyük motor ünitelerin büyük çaplı aksonlarındaki ranvier boğumlarının, küçük aksonlara göre daha geniş aralıklarla sıralanmasından dolayı hücre zarında voltaj değişimi artar. Bu nedenle büyük motor üniteler daha düşük akson direncine sahiptirler ve dışsal olarak uygulanan akımlarla daha kolay depolarize olurlar (Peckham ve Knutson, 2005; Bergquist ve ark., 2011). Böylelikle elektriksel akımlarla kastaki motor üniteler seçici olmayan ve senkron katılımı aktif olurlar. Bununla beraber EMS sırasında ağrı reseptörleri aracılığıyla (yani refleks yolla) büyük motor üniteler de aktive olmaktadır. Elektriksel akımlarla uyarılmış kasta motor ünite aktivasyon şekli ve enerjisi ile ilgili yapılmış olan çalışmalara ve duyuşal nöronlar aracılığıyla yayılan EMS'nin kontraksiyon oluşturmak için boyut prensibinin izlediği spinal ve supraspinal yollardan birini izlemesine dayanarak elektriksel uyarılı kontraksiyonların karakteristiklerinde seçicilik olduğu da iddia edilmektedir (Hainaut ve Duchateau, 1992; Aagaard ve ark., 2002; Vanderthommen ve Duchateau, 2007; Bergquist ve ark., 2011;). Hızlı kasılan kasların çoğu, kas lifi demetlerinin dış yüzeylerine yakın bölgelerde bulunmasına rağmen elektriksel akımlarla aktive edildiğinde kasın tümü aktive olmaktadır. Bu noktadan hareketle EMS ile hızlı motor ünitelerin aktivasyonunu kolaylaştırmak hedeflenir (Strauss ve Domenico, 1986; Knaflitz ve ark., 1990; Fuentes ve ark., 1998; Gregory ve Bickel, 2005; Zatsiorsky ve Kraemer, 2006).

EMS'nin en önemli avantajı daha önce de belirtildiği gibi istemli olarak aktive edilmesi zor olan hızlı motor ünitelerin aktivasyonudur (Zatsiorsky ve Kraemer, 2006). Bunun yanında EMS'nin kuvvet (nöral ve kassal) (Singer, 1986; Pichon ve ark., 1995; Maffiuletti ve ark., 2002a; Brocherie ve ark., 2005; Farthing, 2009), kas kütlesi (hipetrofi) (Maffiuletti ve ark., 2006; Gondin ve ark., 2011b), sıçrama yüksekliği (Maffiuletti ve ark., 2002b; Babault ve ark., 2007; Maffiuletti ve ark., 2009), sprint (Brocherie ve ark., 2005; Maffiuletti ve ark., 2009), atrofiden korunma (Hainaut ve Duchateau, 1992; Delitto ve ark., 1988; Bax ve ark., 2005; Maffiuletti, 2010), toparlanma (Babault ve ark., 2011) ya da spor dalına özgü performans (Pichon ve ark., 1995; Brocherie ve ark., 2005) üzerine pozitif etkilerini ortaya koyan çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Bununla beraber sağlıklı bir istemli kasılmanın kas kuvveti açısından EMS'den daha üstün olduğu bilinmektedir (Garhammer, 1983; Hainaut ve Duchateau, 1992; Holcomb, 2005; Requena ve ark., 2005; Seyri ve Maffiuletti, 2011). Bunun nedenlerinden biri optimal spatial motor ünite aktivitesini sınırlayan kesintisiz elektrik akımıdır. Diğer bir neden ise istemli kasılma sırasında aktive olan sinerjist ve stabilizatör kas gruplarının EMS sırasında stimüle edilmemesi ve EMS'nin kaslar arası koordinasyonu kolaylaştırmada etkisiz kalmasıdır. Ayrıca EMS sırasında gerekli enerjinin anaerobik glikoliz sisteminden sağlanmasına dayalı olarak fosfokreatin ve glikojen azalması, laktik asit birikimi ve hücre içi Ph düşüşü nedeniyle

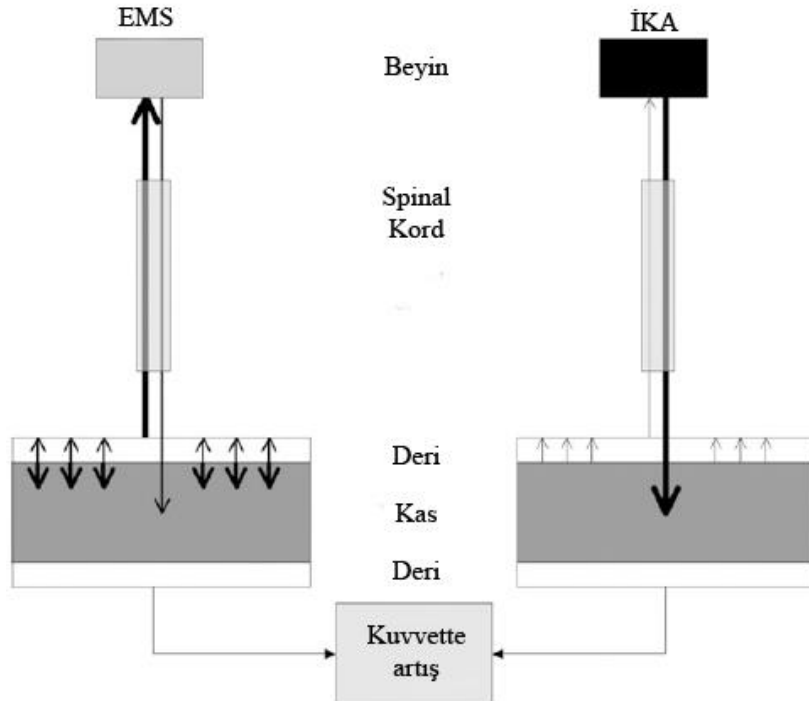
erken yorgunluğa neden olmaktadır. EMS'nin tek sınırlılığı motor ünitelerin senkron katılımı ve sabit aralıklı aktivasyonlar nedeniyle kaslarda yorgunluğun istemli efora göre daha çabuk ortaya çıkmasıdır (Sheffler ve Chae, 2007; Paillard, 2008; Papaioordanidou ve ark., 2010; Hennessy ve ark., 2010; Kemmler ve ark., 2012).

EMS'NİN NÖRAL MEKANİZMASI

İstemli egzersizler gibi EMS antrenmanları sonucunda elektromyografi (EMG), twitch interpolasyon ve V-dalgası (istemli) ölçümüyle kas aktivasyonlarında artışın, kısa süreli EMS antrenmanları sonucu (3 hafta) hipertrofisiz kuvvet artışlarının ve ünilateral EMS sonrası kontralateral kasta kuvvet artışlarının meydana gelmesi EMS'nin nöral adaptasyonlarla da kuvvet artışı sağladığını ortaya koymaktadır (Zhou ve ark., 2002; Kale ve ark., 2014; Cattagni ve ark., 2018).

EMS antrenmanları sonucunda hipertrofisiz kuvvet gelişimlerinin ortaya çıkması elektriksel uyarılı kuvvet antrenmanlarının da istemli eforlarda olduğu gibi nöral etkisi olduğunu göstermektedir. Ünilateral EMS antrenmanlarına bağlı olarak kontralateral homolog kasta da kuvvet artışları oluşması EMS antrenmanlarının supraspinal merkezlere ve kortikal bölgelere etkisi olduğunu göstermektedir (Hortobagyi ve Maffiuletti, 2011; Kale ve ark., 2014; Minetto ve ark., 2018).

EMS'de yukarı yönlü afferent girdiler sensorimotor kortikal bölgelere yayılırlar ve aşağı yönlü motor yolları etkilerler. Şekil 5'te görülebileceği gibi elektriksel uyarılar çıkan yönlü (kalın ok) afferentleri uyarır ve EMS'nin nöral mekanizması da genel olarak bununla ilgilidir (Hortobagyi ve Maffiuletti, 2011).

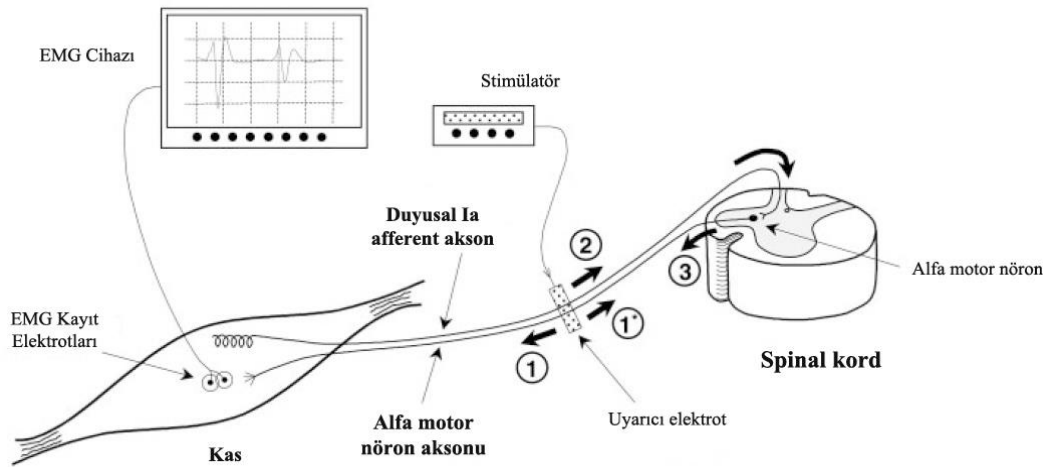


Şekil 5. EMS ve İstemli Kas Aktivasyonlarının (İKA) kaynağını karşılaştıran afferent girdi modeli (Hortobagyi ve Maffiuletti, 2011)

Periferel duyu sinirleri kas fibrillerini saran sarkolemma ile karşılaştırıldığında daha düşük uyarılma eşğine sahiptirler ve bu nedenle EMS kütenez ve nosiseptif girdilere neden olmaktadır. Bu yukarı yönlü duyusal potansiyel sensorimotor kortese ulaşır beyindeki motor alanlara girdi sağlar. Buradan da kortikospinal yol ve motor nöronlarla daha sonrasında kasta kontraksiyon sağlayacak olan aşağı yönlü potansiyeller olarak gönderilir. Bu afferent etkili çıktıya ek olarak deri üzerinden uygulanan elektriksel akım süperfisyal kas fibrillerini direkt olarak uyarır ve kas kasılmasına neden olur. Yani EMS sadece afferent fibrilleri değil aynı zamanda motor nöronları da uyarır (alfa, gama ve beta motor nöronlar, alfa-gama koaktivasyonu). EMS, hem kasiçi sinir dallarında hem de kütenez reseptörlerde aksiyon potansiyeli oluşturarak motor aksonların aktivasyonu ile direkt spinal motor nöronların refleks katılımıyla da endirekt güç üretimi sağlar (Collins ve ark., 2001; Pierrot-Deseilligny ve Burke, 2005; Lindquist ve ark., 2007; Hortobagyi ve Maffiuletti, 2011).

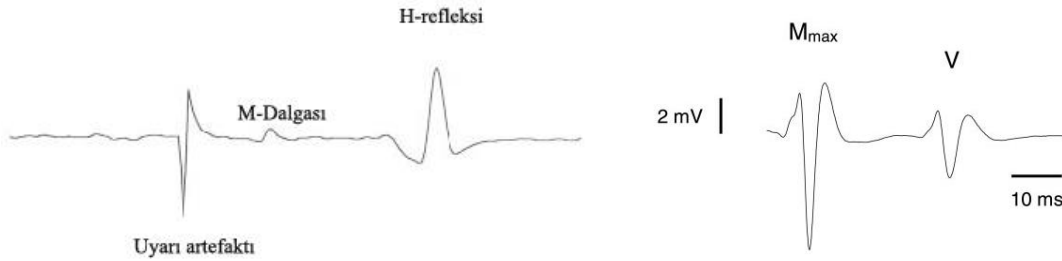
Submaksimal elektrik stimülasyonu öncelikle Ia afferent fibrilleri aktive eder. Ia afferent fibriller spinal kordun dorsal boynuzuna bağ yapar ve ventral boynuzdaki alfa motor nöron hücre gövdesine sinaps yapar. Bu alfa motor nöron aksonu boyunca yayılan bir aksiyon potansiyeli başlatır ve sonraki potansiyel kasin plazma membranı boyunca ilerlemesiyle sonuçlanır. Afferent sinirlerin submaksimal stimülasyonu sonucu oluşan bu elektriksel potansiyel H-refleksi (Hoffmann Refleksi) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 6). H-refleksi, motor üniteleri afferent ve monosinaptik yolla aktive eder (Schieppati, 1987; Aagaard ve ark., 2002; Hardy ve ark., 2002; Duclay ve Martin, 2005; Knikou, 2008).

H-refleksi, spinal gerilme refleksinin elektriksel olarak uyarıldığı bir analogudur ve aynı zamanda submaksimal elektriksel uyarıların izlediği refleks yoldur. H-refleksi ve spinal gerilme refleksleri arasındaki fark H-refleksinin kas içciklerini ve gama motor nöronları atlayarak başladığı için spinal gerilme refleksinde varolan kas içciklerinin deşarj ve gama motor nöronların etkileri H-refleksinde yoktur. Spinal gerilme refleksleri bir kas gerilmesi sonucu uyarılırken H-refleksi elektriksel stimülasyon yoluyla uyarılmaktadır. H-refleksi ve spinal gerilme refleksleri aynı yolu izlemektedirler. Uygun bir elektriksel uyarı sonrası aksiyon potansiyelleri kas içciklerini atlayarak Ia afferentler aracılığıyla spinal korda ulaşır. Alfa motor nöronlarla sinaps yaparak efferent yollarla kasta doğru hareket eden bu refleks uyarı kasta ulaşır ve sonrasında kasta bir kasılma yanıtıyla sonuçlanır (Schieppati 1987; Brooke ve ark., 1997; Aagaard ve ark., 2002; Zehr, 2002; Pierrot-Deseilligny ve Burke, 2005).



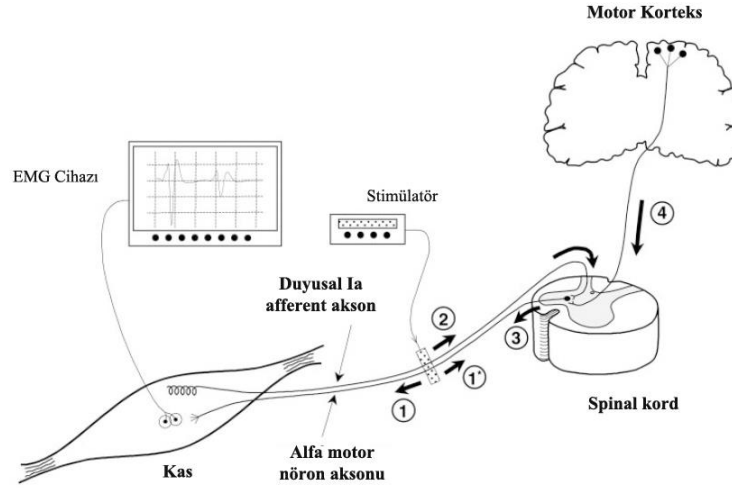
Şekil 6. H-refleks arki ve M-dalgası (Aagaard ve ark., 2002)

Kısa süreli ve submaksimal elektriksel uyarı sinire iletildiğinde aksiyon potansiyelleri büyük çaplı aksonlarından dolayı daha önce de belirtildiği gibi seçici olarak Ia afferentlerde oluşur (yanıt 2). Bu aksiyon potansiyelleri uyarıcı postsinaptik potansiyeller oluşturacakları spinal korda doğru hareket eder ve sonrasında aşağı yönlü alfa motor nöron aksonlarından kasa doğru hareket eden aksiyon potansiyelleri oluştururlar (yanıt 3). Daha sonrasında efferent aksiyon potansiyelleri kasta H-refleksi olarak kaydedilir. Kademeli olarak artan uyarı şiddeti en küçük çaplı alfa motor nöronların aksonlarında direkt kasa doğru hareket eden ve M-dalgası olarak adlandırılan aksiyon potansiyelleri oluşmasına neden olur (yanıt 1). Aynı zamanda alfa motor nöronlarda antidromik (spinal korda doğru) olarak spinal korda doğru yayılan aksiyon potansiyelleri (yanıt 1*), refleks yanıt olarak uyarılan aksiyon potansiyelleriyle çarpışır (yanıt 3) ve bu durum refleks yanıtın kısmi olarak bozulmasıyla sonuçlanır (Şekil 6). Supramaksimal uyarı şiddetlerinde tüm alfa motor nöronların aksonları aksiyon potansiyelini hem ortodromik (kasa doğru) hem de antidromik olarak yayarlar. Antidromik potansiyel Ia afferent fibriller tarafından aktive edilen alfa motor nöron hücre gövdelerinin aktivasyonu ile ilişkili olan ortodromik potansiyelle çarpışır ve ilk olarak maksimum M-dalgası (M_{max}) oluşmasına ve sonrasında ise H-refleksinin tamamen iptal olmasıyla sonuçlanır. H-refleksine katılan afferent ve efferent yolların yanı sıra çevresel sinirlerin elektriksel olarak stimüle edilmesi stimülasyon noktasından motor son plağa doğru gönderilen direk aksiyon potansiyelleriyle efferent fibrillerin direk aktivasyonuna neden olur. Bu efferent yol elektromyogramda kas yanıtı olarak bir sinyal oluşturur. Maksimal stimülasyon sonucu oluşan bu elektriksel potansiyel M-dalgası olarak tanımlanmaktadır (Şekil 7) (Aagaard ve ark., 2002; Smith ve Motl, 2005).



Şekil 7. H-refleksi, M-dalgası, M_{max} ve V-dalgası potansiyelleri (Zehr, 2002; Aagaard ve ark., 2002)

İstemli yanıt olarak tanımlanan V-dalgası maksimal istemli efor sırasında supramaksimal elektriksel sinir stimülasyonu uygulanarak kaydedilen H-refleksinin elektrofizyolojik bir varyasyonudur ve maksimal istemli kasılmalar (MİK) sırasında uygulanan maksimal elektriksel uyarıların izlediği sinir yolunu ifade eder (Şekil 8). Uyarılmış V-dalgası yanıtları maksimal istemli kas kontraksiyonu sırasında Ia afferent ve alfa motor nöronların sinapslarındaki iletimin etkinliğini değerlendirmek (presinaptik inhibisyon gibi) ve spinal alfa motor nöronlardan çıkan efferent nöral sürüşün derecesini yansıtmak için kullanılabilir (Upton ve ark., 1971; Aagaard ve ark., 2002; Pensini ve Martin 2004; Duclay ve Martin 2005).



Şekil 8. V-dalgası (Aagaard ve ark., 2002)

SONUÇ

Sporda performans gelişimi sağlamak için kullanılan yenilikçi antrenman metodlarının sayısı her geçen gün artmaktadır. EMS'nin kuvvet artışı sağladığı fenomeninin etkisiyle son 30 yılda sağlıklı bireyler üzerinde sportif performansı artırma amaçlı olarak yapılan EMS çalışmalarında büyük artışlar olmuştur (Kılıç ve Uğurlu, 2018; Schink ve ark., 2018). Uzun bir tarihsel geçmişe sahip olan EMS'nin medikal alandaki uygulamalarından olan normal fonksiyonunda düşüş olan kaslardaki kuvvet kayıplarını gidermeye yönelik rehabilitasyon amaçlı kullanımının etkileri doğrultusunda sağlıklı bireylerde sportif performansı geliştirme amaçlı olarak da çeşitli uygulamaları popülerlik kazanmıştır. Bunun sonucunda performansın geliştirilmesi konusunda EMS antrenmanları farklı spor dallarında yaygın olarak ilgi görmeye başlayan yeni bir antrenman metodu olmuştur. Ancak, antrenman ve uygulama yöntemlerinin farklılığı ve EMS'ye olan yanıtlardaki bireysel farklılıklar sonuçların da farklılıklar göstermesine neden olmaktadır. Buna rağmen teorik olarak EMS ile kısmen ya da tamamıyla nöromusküler adaptasyonun mümkün olabileceği görülmektedir (Paillard, 2008).

Elektrotlar aracılığıyla deri üzerinden kaslara ve sinirlere iletilen elektriksel akımların vücuttaki iyonları hareket ettirmesi, motor nöronların (alfa, gama ve beta motor nöronlar, alfa-gama koaktivasyonu) ve duyuşal afferentlerin depolarizasyonu ile aksiyon potansiyelleri oluşturarak kasta refleks yolla kasılma meydana getirmesi, hızlı ve yavaş motor üniteleri senkronize katılımla aktive etmesi, kas fibrillerinde, kasiçi sinir dallarında ve kütanöz reseptörlerde aksiyon potansiyeli oluşturması dışsal kaynaklı elektriksel uyarıların insan vücudunda çok farklı etkileri olduğu fikrini desteklemektedir. Bunun yanında EMS antrenmanları sonucunda hipertrofisiz kuvvet gelişimlerinin ortaya çıkması ve ünilateral EMS antrenmanları sonucu kontralateral homolog kasta da kuvvet artışlarının ortaya çıkması EMS antrenmanlarının nöral etki sonucu supraspinal merkezlere ve kortikal bölgeleri etkilediğini göstermektedir.

Bu derlemede EMS'nin insan bedeni üzerine etkileri altında yatan biyokimyasal, fizyolojik ve nöral mekanizmalar incelenmiştir. EMS'nin sportif performans ya da rehabilitasyon amaçlı kullanımlarından daha etkin ve faydalı sonuçlar elde etme olanağı sağlaması açısından bu bilgilerin önemli olduğu düşünülmektedir. EMS alanında ulusal ve uluslararası bilimsel araştırmaların artması elektriksel kas uyarımlarının nöromusküler etkilerinin daha iyi anlaşılması sportif amaçlı kullanımlarını daha kesin ve etkin temellere dayanması konusunda öneme sahip olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aagaard, P., Simonsen, E.B., Andersen, J.L., Magnusson, P., Dyhre-Poulsen, P., (2002). Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses, *J. Appl. Physiol.*, 92 (6), 2309-2318.
- Adams, V. (2018). Electromyostimulation to fight atrophy and to build muscle: Facts and numbers. *Journal of cachexia, sarcopenia and muscle*, 9(4), 631-634.
- Ashley, Z., Sutherland, H., Lanmuller, H., Unger, E., Li, F., Mayr, W., Kern, H., Jarvis, J.C., Salmons, S., (2005). Determination of the chronaxie and rheobase of denervated limb muscles in conscious rabbits, *Artif. Organs*, 29 (3), 212-215.
- Babault, N., Cometti, G., Bernardin, M., Pousson, M., Chatard, J.C., (2007). Effects of electromyostimulation training on muscle strength and power of elite rugby players, *J. Strength Cond. Res.*, 21 (2), 431-437.
- Babault, N., Cometti, C., Maffiuletti, N.A., Deley, G., (2011). Does electrical stimulation enhance post-exercise recovery?, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111 (10), 2501-2507.
- Bahşi, İ., Orhan, M., Çetkin, M., Turhan, B., Sayın, S. (2017). Anatomy of cranial nerves in the first Turkish illustrated anatomy manuscript, *Childs Nerv Syst*, 33 (11), 1855-1862.
- Barr, R.C., (2015): Basic electrophysiology, In: Biomedical Engineering Fundamentals, J.D. Bronzino, D.R. Peterson (Eds.), 4th Ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, FL, USA, 38-1.
- Bax, L., Staes, F., Verhagen, A., (2005). Does neuromuscular electrical stimulation strengthen the quadriceps femoris? A systematic review of randomised controlled trials, *Sports Med.*, 35 (3), 191-212.
- Beaudreau, S.A., Finger, S., (2006). Medical electricity and madness in the 18th century: The legacies of Benjamin Franklin and Jan Ingenhousz, *Perspect. Biol. Med.*, 49 (3), 333.
- Bergquist, A.J., Clair, J.M., Lagerquist, O., Mang, C.S., Okuma, Y., Collins, D.F., (2011). Neuromuscular electrical stimulation: implications of the electrically evoked sensory volley, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111 (10), 2409-26.
- Billot, M., Martin, A., Paizis, C., Cometti, C., Babault, N., (2010). Effects of an electrostimulation training program on strength, jumping, and kicking capacities in soccer players, *J. Strength Cond. Res.*, 24 (5), 1407-1413.
- Binder-Macleod, S.A., Halden, E.E., Jungles, K.A., (1995). Effects of stimulation intensity on the physiological responses of human motor units, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27 (4), 556-565.
- Blickenstorfer, A., Kleiser, R., Keller, T., Keisker, B., Meyer, M., Riener, R., Kollias, S., (2009). Cortical and subcortical correlates of functional electrical stimulation of wrist extensor and flexor muscles revealed by fMRI, *Hum. Brain Mapp.*, 30 (3), 963-975.
- Bresadola, M., (1998). Medicine and science in the life of Luigi Galvani (1737-1798), *Brain Res. Bull.*, 46 (5), 372.
- Brocherie, F., Babault, N., Cometti, G., Maffiuletti, N., Chatard, J.C., (2005). Electrostimulation training effects on the physical performance of ice hockey players, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 37 (3), 455-60.
- Brooke, J.D., Cheng, J., Collins, D.F., McIlroy, W.E., Misiaszek, J.E., Staines, W.R., (1997). Sensori-sensory afferent conditioning with leg movement: Gain control in spinal reflex and ascending paths, *Prog. Neurobiol.*, 51 (4), 393-421.
- Brunel, N., van Rossum, M.C., (2007). Lapicque's 1907 paper: From frogs to integrate-and-fire, *Biol. Cybern.*, 97 (5-6), 337-339.
- Burns, W.E., (2003). Science in The Enlightenment: An Encyclopedia, ABC-CLIO, California, USA, 107.

- Cardinale, M., Newton, R., Kazunori, N., (2010). *Strength and Conditioning: Biological Principles and Practical Applications*, Wiley-Blackwell, NJ, USA, 193-197.
- Cattagni, T., Lepers, R., & Maffiuletti, N.A., (2018). Effects of neuromuscular electrical stimulation on contralateral quadriceps function. *J Electromyogr Kinesiol.*, 38 (2018), 111-118.
- Clark, R.B., (2005). *Anatomy and Physiology: Understanding The Human Body*, Jones Barlett Publishers, MA, USA, 173.
- Clementy, J., Rouves, D., Garrigue, S., Barold, S.S., Jaïs, P., Haïssaguerre, M., (2002). High impedance leads and safety margin. Electrical considerations based on a simplified expression of the 'paradigm', *Europace*, 4 (2), 121-128.
- Collins, D.F., Burke, D., Gandevia, S.C., (2001). Large involuntary forces consistent with plateau-like behavior of human motoneurons, *J. Neurosci.*, 21 (11), 4059-4065.
- Çetkin, M., Orhan, M., Bahşi, İ., Turhan, B. (2017). Anatomy of spinal nerves in the first Turkish illustrated anatomy handwritten textbook, *Childs Nerv Syst*, 33 (2), 205-209.
- de Boulogne, G.B.D., (1990). *The Mechanism of Human Facial Expression (Studies in Emotion and Social Interaction)*, R.A. Cuthbertson (Ed.&Translate), Cambridge Uni. Press, Cambridge, 9-10.
- Dehail, P., Duclos, C., Barat, M., (2008). Electrical stimulation and muscle strengthening, *Ann. Readapt. Med. Phys.*, 51 (6), 441-451.
- Deley, G., Cometti, C., Fatnassi, A., Paizis, C., & Babault, N. (2011). Effects of combined electromyostimulation and gymnastics training in prepubertal girls. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2), 520-526.
- Delitto, A., Rose, S.J., McKowen, J.M., Lehman, R.C., Thomas, J.A., Shively, R.A., (1988). Electrical stimulation versus voluntary exercise in strengthening thigh musculature after anterior cruciate ligament surgery, *Phys. Ther.*, 68 (5), 660-663.
- Delitto, A., Snyder-Mackler, L., (1990). Two theories of muscle strength augmentation using percutaneous electrical stimulation, *Phys. Ther.*, 70 (3), 158-164.
- Delitto, A., (2002). "Russian electrical stimulation": Putting this perspective into perspective, *Phys. Ther.*, 82 (10), 1017-8.
- Duclay, J., Martin, A., (2005). Evoked H-reflex and V-wave responses during maximal isometric, concentric, and eccentric muscle contraction, *J. Neurophysiol.*, 94 (5), 3555-3562.
- Dudley, G.A., Stevenson, S.W., (2008). Use of electrical stimulation in strength and power training, In: *Strength and Power in Sport*, 2nd Ed., P.V. Komi (Ed.), Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, 426-437.
- Enoka, R.M., (2002). Activation order of motor axons in electrically evoked contractions, *Muscle Nerve*, 25 (6), 763-764.
- Farthing, J.P., (2009). Cross-education of strength depends on limb dominance: Implications for theory and application, *Exerc. Sport. Sci. Rev.*, 37 (4), 179-187.
- Forehand, C.J., (2009). The action potential, synaptic transmission, and maintenance of nerve function, In: *Medical Physiology: Principles for Clinical Medicine*, R. Rhoades, D.R. Bell (Eds.), 3rd Ed., Wolters Kluwer/Lippincott Williams&Wilkins, Baltimore, USA, 41,45,46.
- Frontera, W.R., (2008). Part 1: Epidemiology and pathology, Section 1: Epidemiology of sports injuries: Implications for rehabilitation, In: *Rehabilitation of Sports Injuries-Scientific Basis: Olympic Encyclopaedia of Sports Medicine*, W.R. Frontera (Ed.), Wiley Publisher, Massachusetts, USA, 8.
- Fuentes, I., Cobos, A.R., Segade, L.A.D., (1998). Muscle fibre types and their distribution in the biceps and triceps brachii of the rat and rabbit, *J. Anat.*, 192 (2), 203-210.

- Garhammer, J., (1983). An introduction to the use of electrical muscle stimulation with athletes, *Natl. Strength & Cond. Assoc. J.*, 5 (4), 44-45.
- Geddes, L.A., Hoff, H.E., (1971). The discovery of bioelectricity and current electricity, the Galvani-Volta controversy, *IEEE Spectrum*, 8 (12), 38-46.
- Gondin, J., Cozzone, P.J., Bendahan, D., (2011a). Is high-frequency neuromuscular electrical stimulation a suitable tool for muscle performance improvement in both healthy humans and athletes?, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111 (10), 2473-87.
- Gondin, J., Brocca, L., Bellinzona, E., D'Antona, G., Maffiuletti, N.A., Miotti, D., Pellegrino, M.A., Bottinelli, R., (2011b). Neuromuscular electrical stimulation training induces atypical adaptations of the human skeletal muscle phenotype: A functional and proteomic analysis, *J. Appl. Physiol.*, 110 (2), 433-450.
- Govus, A. D., Andersson, E. P., Shannon, O. M., Provis, H., Karlsson, M., & McGawley, K. (2018). Commercially available compression garments or electrical stimulation do not enhance recovery following a sprint competition in elite cross-country skiers. *European Journal of Sport Science*, 1-10.
- Gregory, C.M., Bickel, C.S., (2005). Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation, *Phys. Ther.*, 85 (4), 358-364.
- Hainaut, K, Duchateau, J., (1992). Neuromuscular electrical stimulation and voluntary exercise, *Sports Med.*, 14 (2), 100-113.
- Hardy, S.G.P., Spalding, T.B., Liu, H., Nick, T.G., Pearson, R.H., Hayes, A.V., Stokic, D.S., (2002). The Effect of transcutaneous electrical stimulation on spinal motor neuron excitability in people without known neuromuscular diseases: The roles of stimulus intensity and location, *Phys. Ther.*, 82 (4), 354-363.
- Heidland, A., Fazeli, G., Klassen, A., Sebekova, K., Hennemann, H., Bahner, U., Di Iorio, B., (2013). Neuromuscular electrostimulation techniques: Historical aspects and current possibilities in treatment of pain and muscle waisting, *Clin. Nephrol.*, 79 (1), 12-23.
- Henneman, E., Somjen, G., Carpenter, D.O., (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons, *J. Neurophysiol.*, 28 (3), 560-580.
- Hennessy, E., Coughlan, G., Caulfield, B., Crowe, L., Perumal, S.D., McDonnell, T.J., (2010). An investigation into the acute effects of electrical muscle stimulation on cardiopulmonary function in a chronic obstructive pulmonary disease patient - A pilot case study. Presented at: 1st Annual Conference of the International Functional Electrical Stimulation Society (UK and Ireland Chapter), University of Salford, 15-16 April, Manchester, UK.
- Herrero, A.J., Martin, J., Martin, T., Abadia, O., Fernandez, B., Garcia-Lopez, D., (2010). Short-term effect of strength training with and without superimposed electrical stimulation on muscle strength and anaerobic performance. A randomized controlled trial. Part I, *J. Strength Cond. Res.*, 24 (6), 1609-1615.
- Holcomb, W.R., (2005). Is neuromuscular electrical stimulation an effective alternative to resistance training?, *Strength & Cond. J.*, 27 (3), 76-79.
- Holsheimer, J., Dijkstra, E.A., Demeulemeester, H., Nuttin, B., (2000). Chronaxie calculated from current-duration and voltage-duration data, *J. Neurosci. Methods*, 97 (1), 45-50.
- Hortobagyi, T., Maffiuletti, N.A., (2011). Neural adaptations to electrical stimulation strength training, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111 (10), 2439-49.
- Imoto, A. M., Peccin, S., Almeida, G. J. M., Saconato, H., & Atallah, Á. N. (2011). Effectiveness of electrical stimulation on rehabilitation after ligament and meniscal injuries: A systematic review. *Sao Paulo Medical Journal*, 129(6), 414-423.
- Irnich, W., (2002). Georges Weiss' fundamental law of electrostimulation is 100 years old, *Pacing Clin. Electrophysiol.*, 25 (2), 245-8.

- Irnich, W., (2010). The terms "chronaxie" and "rheobase" are 100 years old, *Pacing Clin. Electrophysiol.*, 33 (4), 491-6.
- Jubeau, M., Gondin, J., Martin, A., Sartorio, A., Maffiuletti N.A., (2007). Random motor unit activation by electrostimulation, *Int. J. Sports Med.*, 28 (11), 901-4.
- Kale, M., Kaçoğlu, C., Gürol, B., (2014). Elektromyostimülasyon antrenmanlarının nöral adaptasyon ve sportif performans üzerine etkileri, *Spor Bilimleri Dergisi*, 25 (3), 142-158.
- Kemmler, W., von Stengel, S., Schwarz, J., Mayhew, J.L., (2012). Effect of whole-body electromyostimulation on energy expenditure during exercise, *J. Strength Cond. Res.*, 26 (1), 240-5.
- Kemmler, W., von Stengel, S., (2012). Alternative exercise technologies to fight against sarcopenia at old age: A series of studies and review, *J. Aging Res.*, Vol.2012, 1-8.
- Khurana, I., (2005). Textbook of Medical Physiology, Elsevier, UP, India, 66-67.
- Kılıç, T., & Ugurlu, A. (2018). Investigation of the Effect of Six Weeks Electro Muscle Stimulation Training on Physical Changes in the Sedentary Men and Women. *Journal of Education and Training Studies*, 6(9), 21-25.
- Knaflitz, M., Merletti, R., De Luca, C.J., (1990). Inference of motor unit recruitment order in voluntary and electrically elicited contractions, *J. Appl. Physiol.*, 68 (4), 1657-1667.
- Knight, K.L., Draper, D.O., (2012). Therapeutic Modalities: The Art and Science, 2nd Ed., Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, USA, 323-324.
- Knikou, M., (2008). The H-reflex as a probe: Pathways and pitfalls, *J. Neurosci. Methods.*, 171 (1), 1-12.
- Lindquist, A.R.R., Prado, C.L., Barros, R.M.L., Mattioli, R., Costa, P.H.L., Salvini, T.F., (2007). Gait training combining partial body-weight support a treadmill, and functional electrical stimulation: Effects on poststroke gait, *Phys. Ther.*, 87 (9), 1144-1154.
- Lloyd, T., Domenico, G.G., Strauss, G.R., Singer, K., (1986). A review of the use of electro-motor stimulation in human muscles, *Aust. J. Physiother.*, 32 (1), 18-30.
- Loeb, G.E., (2005). Galvani's delayed legacy: Neuromuscular electrical stimulation, *Expert Rev. Med. Devices*, 2 (4), 379-81.
- MacIntosh, B.R., Gardiner, P.F., McComas, A.J., (2006). Skeletal Muscle: Form and Function, Human Kinetics, IL, USA, 130,131.
- Maffiuletti, N.A., Cometti, G., Amiridis, I.G., Martin, A., Pousson, M., Chatard, J.C., (2000). The effects of electromyostimulation training and basketball practice on muscle strength and jumping ability, *Int. J. Sports Med.*, 21 (6), 437-43.
- Maffiuletti, N.A., Pensini, M., Martin, A., (2002a). Activation of human plantar flexor muscles increases after electromyostimulation training, *J. Appl. Physiol.*, 92 (4), 1383-1392.
- Maffiuletti, N.A., Dugnani, S., Folz, M., Di Pierno, E., Mauro, F., (2002b). Effect of combined electrostimulation and plyometric training on vertical jump height, *Med. Sci. Sports Exerc*, 34 (10), 1638-1644.
- Maffiuletti, N.A., Zory, R., Miotti, D., Pellegrino, M.A., Jubeau, M., Bottinelli, R., (2006). Neuromuscular adaptations to electrostimulation resistance training, *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, 85 (2), 167-75.
- Maffiuletti, N.A., Bramanti, J., Jubeau, M., Bizzini, M., Deley, G., Cometti, G., (2009). Feasibility and efficacy of progressive electrostimulation strength training for competitive tennis players, *J. Strength. Cond. Res.*, 23 (2), 677-682.
- Maffiuletti, N.A., (2010). Physiological and methodological considerations for the use of neuromuscular electrical stimulation, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 110 (2), 223-234.

- Malatesta, D., Cattaneo, F., Dugnani, S., Maffiuletti, N.A., (2003). Effects of electromyostimulation training and volleyball practice on jumping ability, *J. Strength Cond. Res.*, 17 (3), 573-579.
- Malmivuo, J., Plonsey, R., (1995). Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields, Oxford University Press, NY, USA, 13.
- Marqueste, T., Messan, F., Hug, F., Laurin, J., Dousset, E., Grelot, L., Decherchi, P., (2010). Effect of repetitive biphasic muscle electrostimulation training on vertical jump performances in female volleyball players, *Int. J. Sport Health Sci.*, 8 (0), 50-55.
- Merrill, D.R., Bikson, M., Jefferys, J.G., (2005). Electrical stimulation of excitable tissue: Design of efficacious and safe protocols, *J. Neurosci. Methods*, 141 (2),184.
- Minetto, M. A., Botter, A., Gambero, G., Varvello, I., Massazza, G., Bellomo, R. G., Maffiuletti, N.A., Saggini, R., (2018). Contralateral effect of short-duration unilateral neuromuscular electrical stimulation and focal vibration in healthy subjects. *Eur J Phys Rehabil Med*, Online First.
- Morrissey, M. C. (1988). Electromyostimulation from a clinical perspective. *Sports medicine*, 6(1), 29-41.
- Mosole, S., Zampieri, S., Furlan, S., Carraro, U., Löefler, S., Kern, H., Volpe, P., Nori, A., (2018). Effects of Electrical Stimulation on Skeletal Muscle of Old Sedentary People, *Gerontology and Geriatric Medicine*, 4 (11), 1-11.
- Nanda, K. B., (2008). Electrotherapy Simplified, Jaypee Brothers Medical Publishers, New Delhi, India, 112-114.
- Paillard, T., (2008). Combined application of neuromuscular electrical stimulation and voluntary muscular contractions, *Sports Med.*, 38 (2), 161-177.
- Papaiordanidou, M., Guiraud, D., Varray, A., (2010). Kinetics of neuromuscular changes during low-frequency electrical stimulation, *Muscle Nerve*, 41(1), 54-62.
- Parent, A., (2005). Duchenne De Boulogne: A pioneer in neurology and medical photography, *Can. J. Neurol. Sci.*, 32 (3), 369-77.
- Peckham, P.H., Knutson, J.S., (2005). Functional electrical stimulation for neuromuscular applications, *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, (7), 327-360.
- Pensini, M., Martin, A., (2004). Effect of voluntary contraction intensity on the H-reflex and V-wave responses, *Neurosci. Lett.*, 367 (3), 369-374.
- Pichon, F., Chatard, J.C., Martin, A., Cometti, G., (1995). Electrical stimulation and swimming performance, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 27 (12), 1671-1676.
- Pierrot-Deseilligny, E., Burke, D., (2005). The Circuitry Of The Human Spinal Cord: Its Role In Motor Control And Movement Disorders, Cambridge University Press., Cambridge, UK, 2.
- Plotnik, R., Kouyoumdjian, H., (2013). Introduction to Psychology, 10th Ed., Wadsworth/Cengage Learning, Belmont, USA, 52.
- Press, J.M., Bergfeld, D.A., (2007). Physical modalities, In: Clinical Sports Medicine: Medical Management and Rehabilitation, W.R. Frontera (Ed.), Elsevier Inc., Philadelphia, USA, 214-215.
- Ratamess, N.A., (2008). Adaptation to anaerobic training programs, In: Essentials of Strength Training and Conditioning/National Strength and Conditioning Association, 3rd Ed., T.R. Baechle, W.E. Roger, (Eds.), Human Kinetics, IL, USA, 97.
- Reilly, J.P., (1992). Electrical Stimulation and Electropathology, Cambridge University Press, NY, USA, 145.
- Requena, S.B., Padial, P.P., González-Badillo, J.J., (2005). Percutaneous electrical stimulation in strength training: An update, *J. Strength Cond. Res.*, 19 (2), 438-448.

- Russ, D.W., Clark, B.C., Krause, J., Hagerman, F.C., (2012). Development of a neuromuscular electrical stimulation protocol for sprint training, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 44 (9), 1810-1819.
- Schechter, D.C., (1971). Origins of electrotherapy, Part I., *NY State J Med.*, 71: 997-1008.
- Schieppati, M., (1987). The Hoffmann reflex: A means of assessing spinal reflex excitability and its descending control in man, *Prog. Neurobiol.*, 28 (4), 345-376.
- Schink, K., Herrmann, H.J., Schwappacher, R., Meyer, J., Orlemann, T., Waldmann, E., ... & Beckmann, M. W. (2018). Effects of whole-body electromyostimulation combined with individualized nutritional support on body composition in patients with advanced cancer: A controlled pilot trial. *BMC cancer*, 18(1), 886.
- Seyri, K., Maffiuletti, N., (2011). Effect of electromyostimulation training on muscle strength and sports performance, *Strength Cond. J.*, 33 (1), 70-75.
- Sheffler, L.R., Chae, J., (2007). Neuromuscular electrical stimulation in neurorehabilitation, *Muscle Nerve*, 35 (5), 562-590.
- Sherwood, L., (2006). Principles of neural and hormonal communication, In: *Fundamentals of Physiology: A Human Perspective*, 3rd Ed., Thomson Brooks/Cole, Southbank, Australia, 83.
- Siff, M., (1990). Applications of electrostimulation in physical conditioning: A review, *J. Strength Cond. Res.*, 4 (1), 20-26.
- Sinacore, D.R., Delitto, A., King, D.S., Roset, S.J., (1990). Type II fiber activation with electrical stimulation: A preliminary-report, *Phys. Ther.*, 70 (7), 416-422.
- Singer, K.P., (1986). The influence of unilateral electrical muscle stimulation on motor unit activity patterns in atrophic human quadriceps, *Aust. J. Physiother.*, 32 (1), 31-37.
- Singh, J., (2005). *Textbook of Electrotherapy*, Jaypee Digital, New Delhi, India, 1-68.
- Singh, J., (2012). *Textbook of Electrotherapy*, 2nd Ed., Jaypee Digital, New Delhi, India, 1.
- Sircar, S., (2008). *Principles of Medical Physiology*, Thieme, Stuttgart, Germany, 80.
- Smith, C.U.M., (2007). Brain and mind in the "long" eighteenth century, In: *Brain, Mind and Medicine: Essays in Eighteenth-Century Neuroscience*, H.A. Whitaker, C.U.M. Smith, S. Finger (Eds.), Springer, MI, USA, 17.
- Smith, J.C., Motl, R.W., (2005). Electromyographic indices of neuromuscular reflexes, *Int. J. Sports Psychol.*, 3 (3), 322-337.
- Strauss, G.R., Domenico, D.D., (1986). Torque production in human upper and lower limb muscles with voluntary and electrically stimulated contractions, *Aust. J. Physiother.*, 32 (1), 38-49
- Tasaki, I., (1939). Electric stimulation and the excitatory process in the nerve fiber, *Am. J. Physiol.*, 125, 380-395.
- Thomas, C.K., Nelson, G., Than, L., Zijdewind, I., (2002). Motor unit activation order during electrically evoked contractions of paralyzed or partially paralyzed muscles, *Muscle Nerve*, 25 (6), 797-804.
- Treacy, C., (2013). SSS hücreleri ve aralarındaki iletişim, (Çeviri: D.F. Baş), In: *Nörolojik Bilimler Hemşireliği Kanıta Dayalı Uygulamalar*, S. Woodward, A. Mestecky (Eds.), (Çeviri: M.A. Topçuoğlu, Z. Durna, A. Karadakovan), Nobel Tıp Kitap Evi, İstanbul, Turkey, 9,11-12.
- Trimble, M.H., Enoka, R.M., (1991). Mechanisms underlying the training effects associated with neuromuscular electrical stimulation, *Phys. Ther.*, 71 (4), 273-280.
- Upton, A.R., McComas, A.J., Sica, R.E., (1971). Potentiation of "late" responses evoked in muscles during effort, *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.*, 34 (6), 699-711.

Vanderthommen, M., Duchateau, J., (2007). Electrical stimulation as a modality to improve performance of the neuromuscular system, *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 35 (4), 180-185.

Ward, A.R., Shkuratova, N., (2002). Russian electrical stimulation: The early experiments, *Phys. Ther.*, 82 (10), 1019-1030.

Wax, B., Kavazis, A. N., & Brown, S. P. (2013). Effects of supplemental carbohydrate ingestion during superimposed electromyostimulation exercise in elite weightlifters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(11), 3084-3090.

Zatsiorsky, V.M., Kraemer, W.J., (2006). Science and Practice of Strength Training, 2nd Ed., Human Kinetics, IL, USA, 62,132-133.

Zehr, P.E., (2002). Considerations for use of the Hoffmann reflex in exercise studies, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 86 (6), 455-468.

Zhou, S., Oakman, A., & Davie, A. J. (2002). Effects of unilateral voluntary and electromyostimulation training on muscular strength on the contralateral limb. *Hong Kong Journal of Sports Medicine and Sports Science*, 14, 1.