

BİYO FİZİKSEL PERSPEKTİFLE FİZİK TEDAVİ MODALİTELERİ

Editörler

Hamit YILMAZ

Selma YAMAN



© Copyright 2025

Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Yayınevi A.Ş. 'ye aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kayıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçlı kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.

ISBN

978-625-375-882-0

Kitap Adı

Biyofiziksel Perspektifle Fizik Tedavi Modaliteleri

Editörler

Hamit YILMAZ

ORCID iD: 0000-0001-9286-5519

Selma YAMAN

ORCID iD: 0000-0002-9989-1194

Yayın Koordinatörü

Yasin DİLMEN

Sayfa ve Kapak Tasarımı

Akademisyen Dizgi Ünitesi

Yayıncı Sertifika No

47518

Baskı ve Cilt

Vadi Matbaacılık

Bisac Code

MED073000

DOI

10.37609/akya.3998

Kütüphane Kimlik Kartı

Biyofiziksel Perspektifle Fizik Tedavi Modaliteleri / ed. Selma Yaman, Hamit Yılmaz.

Ankara : Akademisyen Yayınevi Kitabevi, 2025.

210 s. : tablo, şekil. ; 160x235 mm.

Kaynakça var.

ISBN 9786253758820

GENEL DAĞITIM

Akademisyen YAYINEVİ A.Ş.

Halk Sokak 5 / A Yenışehir / Ankara

Tel: 0312 431 16 33

siparis@akademisyen.com

www.akademisyen.com

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1	Fizik Tedavi Modalitelerine İlişkin Biyofiziksel Temel Kavramlar1 <i>Yunus KARAKOÇ</i>
BÖLÜM 2	Terapötik Enerji Temelli Rehabilitasyon Modalitelerinin Biyofiziği9 <i>Aycan BAŞ</i>
BÖLÜM 3	Doğru Akım (Galvanik) ve İyontoforez33 <i>Bahar ÖZTÜRK KURT</i>
BÖLÜM 4	Alternatif Akımlar (Faradik, Sinüzoidal, Diadinamik).....57 <i>Denizhan KARIŞ</i>
BÖLÜM 5	Transkutanöz Elektriksel Sinir Stimülasyonu (Tens)83 <i>Cemalettin DEMİR</i>
BÖLÜM 6	Nöromusküler ve Fonksiyonel Elektriksel Stimülasyon.....93 <i>Aziz KARACA</i>
BÖLÜM 7	Magnetoterapinin Biyofiziksel Esasları ve Kullanım Alanları...105 <i>Selma YAMAN</i>
BÖLÜM 8	Fonksiyonel Elektrik Stimülasyonu ve Biofeedback Sistemlerinin Biyofiziksel Temelleri115 <i>Fulya YÜKÇÜ</i>
BÖLÜM 9	Nöromodülasyon ve İleri Elektriksel Stimülasyon Teknikleri...129 <i>Aişe Rumeysa MAZI</i>
BÖLÜM 10	Lazer ve Işık Terapilerin Biyofiziksel Mekanizmaları153 <i>Simge ÜNAY</i>

BÖLÜM 11	Ultrason ve Fonoforez Modalitelerinin Biyofiziksel Temelleri.....	167
	<i>Hamit YILMAZ</i>	
BÖLÜM 12	Yüksek Frekanslı Akımlar	177
	<i>Mehmet ASLAN</i> <i>Yalçın KARABULUT</i>	
BÖLÜM 13	Traksiyonun Biyomekanik Prensipleri	195
	<i>Barış TÜRKER</i> <i>Abdullah SARI</i>	

YAZARLAR

Prof. Dr. Yunus KARAKOÇ
Sağlık Bilimleri Üniversitesi Hamidiye
Tıp Fakültesi Biyofizik AD.

Dr. Aişe Rumeysa MAZI
Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye
Tıp Fakültesi, Biyofizik AD.

Dr. Öğr. Üyesi Aycan BAŞ
Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri
Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik AD.

Dr. Öğr. Üyesi Simge ÜNAY
Uşak Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik
AD.

Arş. Gör. Dr. Bahar ÖZTÜRK KURT
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Biyofizik AD.

Dr. Öğr. Üyesi Hamit YILMAZ
Kahramanmaraş Sütçü İmam
Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik AD.

Dr. Öğr. Üyesi Denizhan KARIŞ
İstinye Üniversitesi-Tıp Fakültesi-
Biyofizik AD.

Uzm. Fzt. Mehmet ASLAN
Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Sağlık
Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD.

Öğr. Gör. Dr. Cemalettin DEMİR
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu
Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü

Uzm. Fzt. Yalçın KARABULUT
Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Sağlık
Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD.

Dr. Öğr. Üyesi Aziz KARACA
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Tıp
Fakültesi, Fizyoloji AD.

Dr. Öğr. Üyesi Barış TÜRKER
Trabzon Üniversitesi, Tonya Meslek
Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon
Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Selma YAMAN
Kahramanmaraş Sütçü İmam
Üniversitesi Tıp Fakültesi, Biyofizik AD.

Öğr. Gör. Abdullah SARI
Trabzon Üniversitesi, Tonya Meslek
Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon
Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Fulya YÜKÇÜ
Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Tıp
Fakültesi, Biyofizik AD.

FİZİK TEDAVİ MODALİTELERİNE İLİŞKİN BİYOFİZİKSEL TEMEL KAVRAMLAR

Yunus KARAKOÇ¹

1. GİRİŞ

Modern tıbbın en dinamik alanlarından olan Fizyoterapi disiplini ağrı kontrolü, fonksiyonel kapasitenin artırılması, kas-iskelet sistemi hastalıklarının tedavisi ve doku restorasyonu gibi temel klinik hedeflere ulaşmak için elektro-fiziksel tedavi modalitelerinden faydalanmaktadır. Bu tedavi modaliteleri, geleneksel kullanımda büyük oranda klinik deneyimlere ve ampirik gözlemlere dayalı uygulanmış olsa da güncel bilimsel yaklaşım, modalitelerinin etkin ve güvenli kullanımının ancak altta yatan temel biyofiziksel mekanizmaların ayrıntılı şekilde anlaşılmasıyla mümkün olabileceğini açıkça ortaya koymaktadır (1).

Tedavi modalitelerinin klinik etkinliğin anlaşılmasında, uygulanan fiziksel enerjinin—mekanik, termal veya elektromanyetik nitelikte olsun—biyolojik dokularla nasıl etkileşime girdiğinin ve bu etkileşimlere bağlı hücresel ve moleküler çok katmanlı biyofiziksel süreçlerin nasıl ortaya çıktığının kapsamlı biçimde açıklanması önemli yer tutar (2–4). Bu süreç, yalnızca enerji- doku etkileşimi değil aynı zamanda hücre membranı elektriksel özelliklerindeki değişimleri, iyon kanallarının modifikasyonunu, sinyal iletim yollarının modülasyonunu, protein konformasyonlarının yeniden düzenlenmesini ve hatta gen ekspresyonunun belirli yönlerde etkilenmesini içeren karmaşık bir dizi biyolojik reaksiyonu kapsar (5).

Biyofizik disiplini, özetle, fiziksel yasaları ve ilkeleri kullanarak biyolojik sistemlerin davranışını açıklamayı amaçlayan disiplinler arası son derece dinamik bir bilim dalıdır. Fizyoterapi modaliteleri biyofiziksel perspektifle değerlendirildiğinde; bu modaliteler basit birer “ısı veren-alan” ya da “uyarı sağlayan” enstrüman olmaktan çıkıp, çok boyutlu ve sofistike biyolojik sinyal modülatörleri olarak yeniden tanımlanır (6). Bu bağlamda elektro-

¹ Prof. Dr., Sağlık Bilimleri Üniversitesi Hamidiye Tıp Fakültesi Biyofizik AD.,
yunus.karakoc@sbu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-5694-0737

DOI: 10.37609/akya.3998. c3409

5. SONUÇ

Kitabımızın bu giriş bölümü, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak irdelenecek her bir modalitenin detaylı biyofiziksel analizine sağlam bir zemin hazırlamaktadır. Genel hatlarıyla burada sunulan bilgiler, okuyucunun ilerleyen bölümlerdeki kavramları daha bütüncül bir bakış açısıyla yorumlayabilmesine olanak tanımanın yanında, teorik kuramlar ve klinik uygulamalar arasındaki bağlantıyı daha da netleştirmesine katkı sağlayacaktır. Böylece okur, kitabın ilerleyen bölümlerindeki derinlemesine incelemeleri daha anlaşılır, tutarlı ve bilimsel bir bağlam içerisinde takip edebilecektir.

KAYNAKLAR

1. Chimenti RL, Frey-Law LA, Sluka KA. A mechanism-based approach to physical therapist management of pain. *Physical Therapy*. 2018;98(5):302–314.
2. Vance CGT, Dailey DL, Chimenti RL, et al. Using TENS for pain control: Update on the state of the evidence. *Medicina*. 2022;58(10):1352.
3. Mayer Y, Shibli JA, Saada HA, et al. Pulsed electromagnetic therapy: Literature review and current update. *Brazilian Dental Journal*. 2024;35:1–10.
4. Quarato CMI, Lacedonia D, Salvemini M, et al. A review on biological effects of ultrasounds: Key messages for clinicians. *Diagnostics*. 2023;13(5):873.
5. Liu Z, Liu Q, Guo H, et al. Overview of physical and pharmacological therapy in enhancing bone regeneration formation during distraction osteogenesis. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2022;10:872409.
6. de Sire A, Lippi L, Marotta N, et al. Myths and truths on biophysics-based approach in rehabilitation of musculoskeletal disorders. *Therapeutic Advances in Musculoskeletal Disease*. 2023;15:1759720X231183867.
7. Wang Y, Lu H, Li S, et al. Effect of cold and heat therapies on pain relief in patients with delayed onset muscle soreness: A network meta-analysis. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2022;54:jrm00316.
8. White CR, Phillips NF, Seymour RS. The scaling and temperature dependence of vertebrate metabolism. *Biology Letters*. 2006;2(1):125–127.
9. Freiwald J, Magni A, Fanlo-Mazas P, et al. A role for superficial heat therapy in the management of non-specific, mild-to-moderate low back pain in current clinical practice: A narrative review. *Life*. 2021;11(8):780.
10. de Sire A, Marotta N, Prestifilippo E, et al. Effectiveness of physical agent modalities for pain relief in injured athletes: A systematic review. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*. 2025;38(4):674–699.
11. Sakamoto M. Effects of physical agents on muscle healing with a focus on animal model research. *Physical Therapy Research*. 2021;24(1):1–8.
12. Paolucci T, Pezzi L, Centra AM, et al. Electromagnetic field therapy: A rehabilitative perspective in the management of musculoskeletal pain – A systematic review. *Journal of Pain Research*. 2020;13:1385–1400.
13. Karaca ŞB, Ayan F. Yüksek yoğunluklu lazer tedavisinin kas-iskelet sistemi hastalıklarında kullanımı. *Kırıkkale Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*. 2023;25(1):143–151.
14. Dos Santos SA, Serra AJ, Stancker TG, et al. Effects of photobiomodulation therapy on oxidative stress in muscle injury animal models: A systematic review. *Oxidative Medicine and Cellular*

Longevity. 2017;2017:5273403.

15. Pollet J, Ranica G, Pedersini P, et al. The efficacy of electromagnetic diathermy for the treatment of musculoskeletal disorders: A systematic review with meta-analysis. *Journal of Clinical Medicine*. 2023;12(12):3956. doi:10.3390/jcm12123956
16. Yang HL, Liu FC, Tsay PK. Use of transcutaneous electrical nerve stimulation to alleviate thirst after surgery: A randomized controlled trial. *Journal of Clinical Nursing*. 2023;38:1–10.
17. Jacques SL. Erratum: Optical properties of biological tissues: A review. *Physics in Medicine and Biology*. 2013;58(14):5007–5008.
18. Oliveira S, Andrade R, Silva FS, et al. Effects and mechanotransduction pathways of therapeutic ultrasound on healthy and osteoarthritic chondrocytes: A systematic review of in vitro studies. *Osteoarthritis and Cartilage*. 2023;31(3):317–339. doi:10.1016/j.joca.2022.07.014
19. Gao Q, Cooper PR, Walmsley AD, et al. Role of piezo channels in ultrasound-stimulated dental stem cells. *Journal of Endodontics*. 2017;43(7):1130–1136.
20. Dupont S, Morsut L, Aragona M, et al. Role of YAP/TAZ in mechanotransduction. *Nature*. 2011;474(7350):179–184.
21. Bohari SPM, Grover LM, Hukins DWL. Pulsed low-intensity ultrasound increases proliferation and extracellular matrix production by human dermal fibroblasts in three-dimensional culture. *Journal of Tissue Engineering*. 2015;6:2041731415612779.
22. Lake DA, Wofford NH. Effect of therapeutic modalities on patients with patellofemoral pain syndrome: A systematic review. *Sports Health*. 2011;3(2):182–189.
23. Miller DL, Smith NB, Bailey MR, et al. Overview of therapeutic ultrasound applications and safety considerations. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2012;31(4):623–634.
24. Hanna R, Miron IC, Dalvi S, et al. A systematic review of laser photobiomodulation dosimetry and treatment protocols in the management of medications-related osteonecrosis of the jaws. *Pharmaceutics*. 2024;17(8):1011.
25. Shaw A, Martin E, Haller J, et al. Equipment, measurement and dose—a survey for therapeutic ultrasound. *Journal of Therapeutic Ultrasound*. 2016;4(1):1–9. doi:10.1186/s40349-016-0051-1
26. Götz J, Richter-Stretton G, Cruz E. Therapeutic ultrasound as a treatment modality for physiological and pathological ageing including Alzheimer’s disease. *Pharmaceutics*. 2021;13(7):1014.

BÖLÜM 2

TERAPÖTİK ENERJİ TEMELLİ REHABİLİTASYON MODALİTELERİNİN BİYOFİZİĞİ

Aycañ BAŞ¹

GİRİŞ

Fizik tedavi ve rehabilitasyon uygulamalarının etkinliği, kullanılan modalitelerin biyofiziksel etki mekanizmalarının doğru anlaşılmasına ve bu mekanizmaların tedavi hedefleriyle uyumlu biçimde uygulanmasına bağlıdır. Termal, mekanik, elektriksel ve manyetik enerjiye dayalı yöntemler; doku sıcaklığını değiştirme, iyon akımlarını ve membran geçirgenliğini etkileme, mekanik stres oluşturma ve nörofizyolojik yanıtları modüle etme gibi farklı terapötik etkiler ortaya koyar. Özellikle terapötik ultrason gibi bazı modalitelerde termal ve non-termal etkiler bir arada bulunmakta ve bu bileşenlerin klinik ayrımı her zaman net olmayabilmektedir. Bu bağlamda fizik tedavi, biyolojik dokulara farklı enerji formlarının kontrollü ve hedefe yönelik olarak aktarılmasına dayanan biyofiziksel müdahaleler bütünü olarak tanımlanabilir. Enerji aktarımının klinik sonuçları yalnızca uygulanan fiziksel ajana değil, aynı zamanda dokuların elektriksel iletkenliği, elastik özellikleri, su ve iyon içeriği gibi biyofiziksel niteliklerine de bağlıdır. Fizik tedavide hedeflenen biyolojik yanıtlar ağırlıklı olarak uyarılabilir dokular üzerinden gelişir; sinir, eklem ve kas dokuları başta olmak üzere bağ dokusu yapıları da uygulanan enerjiye özgü yanıtlar verebilir. Bu nedenle rehabilitasyon modalitelerinin bilimsel temeli, hücresel membran potansiyelleri, iyon kanalları, aksiyon potansiyeli oluşumu ve mekanotransdüksiyon süreçleriyle yakından ilişkilidir. Bu bölüm, enerji temelli tüm rehabilitasyon yaklaşımları için ortak bir biyofiziksel ve kavramsal çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik AD.,
aycan.bas@afsu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-9376-8021

SONUÇ

Bu bölümde ele alınan terapötik enerji temelli rehabilitasyon modaliteleri, klinik etkinliğin yalnızca kullanılan cihaz ya da yöntemle değil, aktarılan enerjinin türü, dozu, süresi ve dokuya özgü özelliklerle kurduğu etkileşimle belirlendiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Elektriksel, elektromanyetik, mekanik, termal ve ışık temelli modaliteler, farklı fiziksel ilkeler üzerinden etki gösterse de, tümünde ortak hedef kontrollü enerji aktarımı yoluyla güvenli ve öngörülebilir biyolojik yanıt elde edilmesidir. İnsan dokularının heterojen yapısı ve bireyler arası değişkenlik, standart doz yaklaşımlarının sınırlı kalmasına neden olmakta ve klinik uygulamada parametrelerin hasta ve doku özelliklerine göre uyarlanması zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, modern rehabilitasyon pratiği yalnızca cihaz kullanımına değil, doz–zaman–etki ilişkilerinin rasyonel biçimde yönetilmesine ve uygulamaların güvenlik sınırları içinde sürdürülmesine dayanmalıdır. Enerji temelli modalitelerin bilimsel ilkeler doğrultusunda kullanılması, hem terapötik etkinliğin artırılmasını hem de yan etki risklerinin en aza indirilmesini sağlayarak rehabilitasyonun kanıta dayalı ve öngörülebilir bir klinik disiplin olarak güçlenmesine katkı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Bélanger A-Y. Kanıta dayalı elektroterapi: Therapeutic physical agents. Yakut E, çeviri editörü. Ankara: *Pelikan Tıp ve Teknik Kitapçılık*; 2008.
2. Esen H, Esen F. *Biyofizik: Yöntemler, biyolojik etkiler, önlemler*. Ankara: *Nobel Tıp Kitabevleri*; 2017.
3. Johnson M, Paley CA, Jones G, et al. Efficacy of transcutaneous electrical nerve stimulation for pain management: A meta-analysis. *Pain*. 2022;163(7):e829–e843. doi:10.1097/j.pain.0000000000002436
4. Hamblin MR. Mechanisms and applications of the anti-inflammatory effects of photobiomodulation. *APL Photonics*. 2018;3(10):100801. doi:10.1063/1.5040625
5. Huang YY, Sharma SK, Carroll J, et al. Biphasic dose response in low-level light therapy. *Dose-Response*. 2011;9(4):602–618. doi:10.2203/dose-response.11-009.
6. Leal-Junior ECP, Vanin AA, Miranda EF, et al. Effect of photobiomodulation therapy on performance and recovery in sports: A systematic review and meta-analysis. *Lasers in Medical Science*. 2019;34(6):1173–1185. doi:10.1007/s10103-018-2767-9
7. Zeng C, Li H, Yang T, et al. Therapeutic ultrasound for musculoskeletal disorders: A systematic review and meta-analysis. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2022;48(1):45–57. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2021.09.016
8. Yurdalan SU, Karaböce B, Gün N, et al. Investigation of therapeutic ultrasound dose on muscle phantom: An experimental study. *Clinical and Experimental Health Sciences*. 2022;1–10. doi:10.33808/clinexphealthsci.950896
9. Peplow PV, Chung TY. Advances in photobiomodulation therapy devices for musculoskeletal rehabilitation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;217:112152. doi:10.1016/j.jphotobiol.2021.112152
10. Fitzgerald M, McLaughlin P, McDonough S. Safety, calibration, and performance assessment of electrotherapy and therapeutic devices in rehabilitation. *Physical Therapy Reviews*.

- 2020;25(2):123–132. doi:10.1080/10833196.2019.1703896
11. Knecht O, Kolar JW. Impact of transcutaneous energy transfer on the electric field and specific absorption rate in the human tissue. In: *Proceedings of the 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015)*. Yokohama: IEEE; 2015. p. 1–8. doi:10.1109/IECON.2015.7392881
 12. Foster KR, Glaser R. Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2007;35(4):1464–1471. doi:10.1109/TPS.2007.905964
 13. Özdiñler AR, ed. *Fiziksel modaliteler ve elektroterapi*. İstanbul: İstanbul Tıp Kitabevi; 2016.
 14. de Sire A, Lippi L, Marotta N, et al. Myths and truths on biophysics-based approach in rehabilitation of musculoskeletal disorders. *Therapeutic Advances in Musculoskeletal Disease*. 2023;15:1–12. doi:10.1177/1759720X231183867
 15. Schwartz MS, Andrasik F. *Biofeedback: A practitioner's guide*. 4th ed. New York: Guilford Press; 2017.
 16. Li S, Francisco GE, Zhou P. Combined EMG biofeedback and neuromuscular electrical stimulation for motor recovery after neurological injury: Mechanisms and clinical evidence. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2023;20(1):45. doi:10.1186/s12984-023-01192-1
 17. Özdiñler AR. *Elektromiyografik biyofeedback ve nöromüsküler yeniden eğitim*. İstanbul: Nobel Tıp Kitabevleri; 2016.
 18. Thibault RT, Lifshitz M, Raz A. The self-regulating brain and neurofeedback: Experimental science and clinical promise. *Cortex*. 2016;74:247–261. doi:10.1016/j.cortex.2015.10.024
 19. Lehrer PM, Kaur K, Sharma A, Shah K, Huseby R, Bhavsar J, Zhang Y. Heart rate variability biofeedback improves emotional and physical health and performance: A systematic review and meta-analysis. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*. 2020;45(3):109–129. doi:10.1007/s10484-020-09466-z

BÖLÜM 3

DOĞRU AKIM (GALVANİK) VE İYONTOFOREZ

Bahar ÖZTÜRK KURT¹

GİRİŞ

Elektrik akımı, elektrik yüklerinin bir iletken boyunca yönlü hareketidir ve bir iletken birim zamanda geçen elektrik yükü miktarı olarak tanımlanır. Uluslararası birimler sistemine (SI) göre birimi Amper (A) olup 'I' sembolü ile gösterilir. Akım şiddetinin ölçülmesi için devreye seri olarak bağlanan ampermetre kullanılır. Akım şiddeti, devredeki gerilim ve direnç arasındaki ilişkiyi tanımlayan Ohm Yasası ($I=V/R$) ile açıklanır. Bu yasa bir iletken üzerinden geçen elektrik akımının (I), uygulanan gerilimle (V) doğru, devre direnciyle (R) ters orantılı olduğunu belirtir. Devre elemanlarının direnci arttıkça, aynı gerilim altında akımın azalması beklenir (1-3). Bu ilişki, cilt direnci yüksek olan bireylerde başlangıç akımının daha düşük hissedilmesini açıklayan önemli bir biyofiziksel prensiptir. Bu yasa, doku direnci, deri empedansı ve uygulanan gerilim arasındaki etkileşimin anlaşılmasında klinik pratikte önemli bir yere sahiptir (4). Geleneksel yaklaşımda akımın yönü, pozitif yüklerin hareket yönü olarak kabul edilir; ancak fizikte elektronlar negatif yük taşıdıkları için gerçek yük hareketi bu yönün tersinedir (1-3).

Elektrik akımı genel olarak doğru akım (galvanik, DC) ve alternatif akım (AC) olmak üzere iki temel sınıfta incelenir: Doğru akımda elektrik yükleri tek yönde sürekli hareket ederken, alternatif akımda yüklerin hareket yönü zamanla periyodik olarak değişir (1). Klinik elektroterapi uygulamalarında bu iki akım türü, biyolojik dokular üzerinde oluşturdukları elektriksel, kimyasal ve fizyolojik etkiler açısından farklı terapötik sonuçlar ortaya çıkarır (5). Elektrik akımını ileten yük taşıyıcılarının türü, içinde bulundukları ortama bağlı olarak değişir; katı iletkenlerde akımın taşınmasından serbest elektronlar sorumlu iken, sıvı ve gaz ortamlarda iletimi pozitif ve negatif iyonlar gerçekleştirir (1,2). Bu durum, fizik tedavi uygulamalarında doğru akımın hedeflediği doku içi iyon hareketliliğinin biyolojik temelini oluşturur. Elektrik akımı, uygulandığı sistemde çeşitli enerji dönüşümlerine yol açar. Akımın dirençli dokulardan geçişi ısı artışına; filamentli

¹ Arş. Gör. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Biyofizik AD.,
bahar.ozturkkurt@iuc.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-1171-002X

kullanıldığında fizyoterapi pratiğinde klinik sonuçları olumlu yönde etkileyebilen önemli modalitelerdir. Ancak yöntemin klinik yerinin daha kesin biçimde tanımlanabilmesi, gelecekte yapılacak daha kapsamlı ve metodolojik açıdan güçlü araştırmalarla mümkün hâle gelecektir.

KAYNAKLAR

1. Arygunartha, G., Prayoga, K., & Setianingsih, N. (2023). The level of electrical resistance on electrolyte materials. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023;19(03): 132–136. doi:10.30574/wjarr.2023.19.3.1767
2. Demtröder W. Electric Currents. In: *Electrodynamics and Optics*. Undergraduate Lecture Notes in Physics. Springer, Cham; 2019. doi:10.1007/978-3-030-02291-4_2.
3. Glisson T.H. Current, Voltage, and Resistance. In: *Introduction to Circuit Analysis and Design*. Springer, Dordrecht. 2011. doi:10.1007/978-90-481-9443-8_2
4. Ma S.X. Low Electrical Resistance Properties of Acupoints: Roles of NOergic Signaling Molecules and Neuropeptides in Skin Electrical Conductance. *Chinese journal of integrative medicine*. 2021;27(8): 563–569. doi:10.1007/s11655-021-3318-5
5. Hunckler J, de Mel A. A current affair: electrotherapy in wound healing. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*. 2017;10: 179-194. doi: 10.2147/JMDH.S127207
6. NASA. *Electric current*. [Online] <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19690003108/downloads/19690003108.pdf> [Accessed: 5th December 2025]
7. Barutçu B. Elektrik akımlarının doku üzerindeki etkileri Dursun Ş (ed) *Biyofizik Ders Kitabı* içinde. İstanbul Üniversitesi Basım ve Yayınevi; 2010. p. 405-430.
8. Dzhumamukhambetov N, Yashkov V, Kulzhanov D, et al. Transport of directcurrent electricity: research and prospects. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2025;14(4): 2488-2496. doi:10.11591/eei.v14i4.9463
9. Eisenberg RS. Current flow in nerves and mitochondria: an electro-osmotic approach. *Biomolecules*. 2025; 15(8): 1063. <https://doi.org/10.3390/biom15081063>
10. Lamberti P, Sieni E, Sundararajan R. Design of electrical characterization method for electroporation-treated biological tissues. *Designs*. 2023;7(2): 35. doi:10.3390/designs7020035
11. Matter L, Abdullaeva O, Shaner S, et al. Bioelectronic direct current stimulation at the transition between reversible and irreversible charge transfer. *Advanced Science*. 2024;11: 2306244. doi:10.1002/advs.202306244
12. Leal, J., Jedrusik, N., Shaner, S., et al. SIROF stabilized PEDOT/PSS allows biocompatible and reversible direct current stimulation capable of driving electrotaxis in cells. *Biomaterials*, 2021;275: 120949. doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.120949
13. Vargas, F. Accommodation of Normal and Pathologic Pulp Nerves. *Journal of Dental Research*. 1956;35: 723-733. doi:10.1177/00220345560350051001
14. Stagg C, Antal A, Nitsche M. Physiology of Transcranial Direct Current Stimulation. *The Journal of ECT*. 2018;34(3): 144–152. doi:10.1097/yct.0000000000000510
15. Sengupta A, Gupta S, Sharda A, et al. Effect of low frequency electrical current on the biophysical and molecular properties of cancer cells. *International Journal of Cancer and Clinical Research*. 2021;8: 145. doi:10.23937/2378-3419/1410145
16. Gauguin G, Quéguiner L, Bikson M, et al. Quasi-static approximation error of electric field analysis for transcranial current stimulation. *Journal of Neural Engineering*. 2023;20(1): 016027. doi:10.1088/1741-2552/acb14d
17. Wang B, Peterchev AV, Gauguin G, et al. Quasistatic approximation in neuromodulation. *Journal of neural engineering*. 2024;21(4). doi:10.1088/1741-2552/ad625e

18. Eisenberg RS. Maxwell equations without a polarization field, using a paradigm from biophysics. *Entropy*. 2021, 23(2): 172. doi:10.3390/e23020172
19. Gratiy S, Haines G, Denman D, et al. From Maxwell's equations to the theory of current- source density analysis. *The European Journal of Neuroscience*. 2017;45: 1013-1023. doi:10.1111/ejn.13534.
20. Saturnino G, Thielscher A, Madsen K, et al. A principled approach to conductivity uncertainty analysis in electric field calculations. *NeuroImage*. 2019;188:821-834. doi:10.1016/j.neuroimage.2018.12.053.
21. Balduino R, Mcdermott B, Porter E, et al. Feasibility of water content-based dielectric characterisation of biological tissues using mixture models. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2019;26: 187-193. doi:10.1109/tdei.2018.007412.
22. Šmerc R, Ramirez D, Mahnič-Kalamiza S, et al. A multiscale computational model of skeletal muscle electroporation validated using in situ porcine experiments. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2023;70: 1826-1837. doi:10.1109/tbme.2022.3229560
23. Etoz S, Brace C. Development of water content dependent tissue dielectric property models. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*. 2019;3: 105-110. doi:10.1109/jerm.2018.2881692
24. Leal J, Shaner S, Jedrusik N, et al. Electrotaxis evokes directional separation of co-cultured keratinocytes and fibroblasts. *Scientific Reports*. 2023;13: 11444. doi:10.1038/s41598-023-38664-y
25. Naggay BK, Farahani SK, Gao X. et al. Direct current electrical fields inhibit cancer cell motility in microchannel confinements. *Scientific Reports*. 2025;15: 4605. doi:10.1038/s41598-025-87737-7
26. Bertagna F, Lewis R, Silva S, et al. Effects of electromagnetic fields on neuronal ion channels: a systematic review. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2021;1499(1): 82-103. doi:10.1111/nyas.14597
27. Kulkarni S, Tebar F, Rentero C, et al. Competing signaling pathways controls electrotaxis. *iScience*. 2025;28(5): 112329. doi:10.1016/j.isci.2025.112329
28. Oh, B. Phosphoinositides and intracellular calcium signaling: novel insights into phosphoinositides and calcium coupling as negative regulators of cellular signaling. *Experimental & Molecular Medicine*. 2023;55(8): 1702-1712. doi:10.1038/s12276-023-01067-0
29. Piccoli M, Barbato L, Maiorana N, et al. Direct current stimulation (dcs) modulates lipid metabolism and intercellular vesicular trafficking in SHSY-5Y cell line: implications for parkinson's disease. *Journal of Neurochemistry*. 2025; 169(2): e70014. doi: 10.1111/jnc.70014.
30. Liu M, Xie D, Zeng H, et al. Direct-current electric field stimulation promotes proliferation and maintains stemness of mesenchymal stem cells. *BioTechniques*. 2023;74(6): 293-301.
31. Bianconi S, Leppik L, Oppermann E, et al. Direct current electrical stimulation shifts thp-1-derived macrophage polarization towards pro-regenerative M2 phenotype. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(13): 7272. doi:10.3390/ijms25137272.
32. Kostopoulos D, Rizopoulos K, McGilvrey J, et al. An open-label comparative study of the impact of two types of electrical stimulation (direct current neuromuscular electrical stimulation and transcutaneous electrical stimulation) on physical therapy treatment of diabetic peripheral neuropathy. *Journal of Diabetes Research*. 2025: 9970124. doi: 10.1155/jdr/9970124
33. Euskirchen N, Nitsche MA, van Thriel C. Direct current stimulation in cell culture systems and brain slices-new approaches for mechanistic evaluation of neuronal plasticity and neuromodulation: state of the art. *Cells*. 2021;10(12) :3583. doi:10.3390/cells10123583
34. Martín D, Bocio-Núñez J, Scagliusi SF, et al. DC electrical stimulation enhances proliferation and differentiation on N2a and MC3T3 cell lines. *Journal of Biological Engineering*. 2022;16(1): 27. doi:10.1186/s13036-022-00306-8
35. David SL, Absolom DR, Smith CR, et al. Effect of low level direct current on in vivo tumor

- growth in hamsters. *Cancer Research*. 1985;45(11 Pt 2): 5625-5631.
36. Reinauer S, Neusser A, Schauf G, et al. Iontophoresis with alternating current and direct current offset (AC/DC iontophoresis): a new approach for the treatment of hyperhidrosis. *British Journal of Dermatology*. 1993;129(2): 166-169. doi:10.1111/j.1365-2133.1993.tb03521.x
37. Wang Y, Zeng L, Song W, et al. Influencing factors and drug application of iontophoresis in transdermal drug delivery: an overview of recent progress. *Drug Delivery Translation Research*. 2022;12(1): 15-26. doi:10.1007/s13346-021-00898-6
38. Kamalabadi M, Ghoorchian A, Derakhshandeh K, Haddadi R. Controlled transdermal delivery of oxycodone by pulsed iontophoresis: In vitro and in vivo evaluations. *Therapeutic Delivery*. 2025;16(9): 807-818. doi:10.1080/20415990.2025.2534322
39. Karpiński TM. Selected medicines used in iontophoresis. *Pharmaceutics*. 2018;10(4): 204. doi:10.3390/pharmaceutics10040204
40. González Iglesias LG, Messaoudi S, Kalia YN. Non-invasive iontophoretic delivery of cytochrome c to the posterior segment and determination of its ocular biodistribution. *Pharmaceutics*. 2022;14(9): 1832. doi:10.3390/pharmaceutics14091832
41. Wei D, Pu N, Li SY, et al. Application of iontophoresis in ophthalmic practice: an innovative strategy to deliver drugs into the eye. *Drug Delivery*. 2023;30(1): 2165736. doi:10.1080/10717544.2023.2165736
42. Min JWS, Saeed N, Coene A, Adriaens M, Ceelen W. Electromotive enhanced drug administration in oncology: principles, evidence, current and emerging applications. *Cancers (Basel)*. 2022;14(20): 4980. doi:10.3390/cancers14204980
43. Wang T, Kleiven S, Li X. Electroosmosis based novel treatment approach for cerebral edema. *IEEE Transactions and Biomedical Engineering*. 2021;68(9): 2645-2653. doi:10.1109/TBME.2020.3045916
44. Martin-Vega FJ, Vinolo-Gil MJ, Gonzalez-Medina G, et al. Use of iontophoresis with corticosteroid in carpal tunnel syndrome: systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research*. 2023;20(5): 4287. doi:10.3390/ijerph20054287
45. Leduc BE, Caya J, Tremblay S, et al. Treatment of calcifying tendinitis of the shoulder by acetic acid iontophoresis: a double-blind randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2003;84(10): 1523-1527. doi:10.1016/s0003-9993(03)00284-3
46. Meena R, Kumar T, Reinai, T. Fentanyl iontophoresis can facilitate early physiotherapy in post surgical acute pain: a literature review. *International Journal of Health Sciences and Research*. 2021; 11(7): 137-143. doi:10.52403/ijhsr.20210720
47. Bertolucci LE. Introduction of antiinflammatory drugs by iontophoresis: double blind study. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 1982;4(2): 103-108. doi:10.2519/jospt.1982.4.2.103
48. Ibrahim NA, Abdel Raoof NA, Mosaad DM, et al. Effect of magnesium sulfate iontophoresis on myofascial trigger points in the upper fibres of the trapezius. *The Journal of Taibah University Medical Sciences*. 2021;16(3): 369-378. doi:10.1016/j.jtumed.2020.12.015
49. Kim DH, Kim TH, Lee SH, et al. Treatment of palmar hyperhidrosis with tap water iontophoresis: a randomized, sham-controlled, single-blind, and parallel-designed clinical trial. *Annals of Dermatology*. 2017;29(6): 728-734. doi:10.5021/ad.2017.29.6.728
50. Fernández-Guarino M, Bacci S, Pérez González LA, et al. The role of physical therapies in wound healing and assisted scarring. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(8): 7487. doi:10.3390/ijms24087487
51. Krueger E, Fontoura J, Scheeren E, et al. Iontophoresis: principles and applications. *Fisioterapia em Movimento*. 2014;27: 469-481. doi:10.1590/0103-5150.027.003.ar02
52. Zuo J, Du L, Li M, et al. Transdermal enhancement effect and mechanism of iontophoresis for non-steroidal anti-inflammatory drugs. *The International Journal of Pharmaceutics*. 2014;466(1-2): 76-82. doi:10.1016/j.ijpharm.2014.03.013

53. Ibrahim NA, Hamdy HA, Elbanna RHM, Mohamed DMA, Ali EA. Transdermal iontophoresis versus high power pain threshold ultrasound in mechanical neck pain: a randomized controlled trial. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2024;19(1): 658. doi:10.1186/s13018-024-05078-z
54. Alibegashvili M, Loladze M, Gabisonia T, et al. Hyaluronidase ointment in treatment of hypertrophic scars. *Georgian Medical News*. 2020;(308): 140-143.
55. Lasisi K, Onigbinde A, Ayinla S, et al. Comparative effects of isometric quadriceps training, glucosamine and chondroitin sulphate iontophoresis on pain intensity and physical functions of patients with knee osteoarthritis. *European Journal of Medical and Health Research*, 2024;2(4): 183-194. doi:10.59324/ejmhr.2024.2(4).25
56. Gomez I, Szabó A, Pap L Jr, et al. In vivo calcium and phosphate iontophoresis for the topical treatment of osteoporosis. *Physical Therapy*. 2012;92(2): 289-297. doi:10.2522/ptj.20100400
57. da Rocha FR, Haupenthal DPDS, Zaccaron RP, et al. Therapeutic effects of iontophoresis with gold nanoparticles in the repair of traumatic muscle injury. *Journal of Drug Targeting*. 2020;28(3): 307-319. doi:10.1080/1061186X.2019.1652617
58. Pirri C, Manocchio N, Sorbino A, et al. Percutaneous electrolysis for musculoskeletal disorders management in rehabilitation settings: a systematic review. *Healthcare (Basel)*. 2025;13(15):1793. doi:10.3390/healthcare13151793
59. Bastos CM, Rocha F, Gomes N, et al. The challenge in combining pelotherapy and electrotherapy (iontophoresis) in one single therapeutic modality. *Applied Sciences*. 2022;12(3): 1509. doi:10.3390/app12031509
60. Başkurt F, Özcan A, Algun C. Comparison of effects of phonophoresis and iontophoresis of naproxen in the treatment of lateral epicondylitis. *Clinical Rehabilitation*. 2003;17(1): 96-100. doi:10.1191/0269215503cr588oa
61. Buyuksireci DE, Turk AC. Evaluation of the effectiveness of dexamethasone iontophoresis in patients with subacromial impingement syndrome. *The Journal of Orthopaedic Science*. 2021;26(5): 786-791. doi:10.1016/j.jos.2020.09.007
62. Emelin Y, Konchugova T, Marchenkova L. Evaluation of the effectiveness of combined calcium-phosphorus iontophoresis and interferential therapy in children with adolescent tibial osteochondrosis. *Vrach*. 2025;36(6): 89-92. doi: 10.29296/25877305-2025-06-20
63. Dakowicz A, Dziecioł-Anikiej Z, Hryniewicz A, et al. Evaluation of the effectiveness of iontophoresis with perskindol gel in patients with osteoarthritis of the knee joints. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(14): 8489. doi:10.3390/ijerph19148489
64. Ashish G. A study to find the effectiveness of iontophoresis with open kinematic chain exercises in pesanserine bursitis in sports persons. *International Journal of Medical and Exercise Science*. 2021;7: 916-926. doi:10.36678/ijmaes.2021.v07i01.001
65. Amirjani N, Ashworth NL, Watt MJ, et al. Corticosteroid iontophoresis to treat carpal tunnel syndrome: a double-blind randomized controlled trial. *Muscle Nerve*. 2009;39(5): 627-633. doi:10.1002/mus.21300
66. Pérez-Merino L, Casajuana M, Bernal G, et al. Evaluation of the effectiveness of three physiotherapeutic treatments for subacromial impingement syndrome: a randomised clinical trial. *Physiotherapy*. 2016;102(1): 57-63. doi:10.1016/j.physio.2015.01.010

BÖLÜM 4

ALTERNATİF AKIMLAR (FARADİK, SİNÜZOİDAL, DİADİNAMİK)

Denizhan KARIŞ¹

GİRİŞ

Hücrelere ve dokulara gelen bir sinyalin eşik değeri geçmesi durumunda, aksiyon potansiyeli oluşacak ve gelen sinyal depolarizasyon ile ilgili hücre ve dokuda bir cevap oluşturacaktır. Gelen sinyalin hücre ve dokuda oluşturduğu cevap, repolarizasyon fazını takiben sükun durumuna tekrar döner. Hücre ve dokularda cevap oluşturabilen sinyaller; kimyasal, fiziko-kimyasal, hormonal, mekanik, termal, ışık, ses, radyasyon ve elektrik kaynaklı olabilmektedir. Bu sinyallerden şiddeti ve süresi en kolay ayarlanabilir, kontrol edilebilir, kolayca uygulanabilir ve tekrarlanabilir, ve en elverişli ve olanı elektrik akımlarıdır.

İki farklı nokta arasındaki elektron sayısının dengesizliğine bağlı olarak oluşan kuvvettir. Elektronların bu farkı eşitlemeye yönelik olarak hareket etmesiyle elektrik akımı oluşur. Elektrik akımı, elektronların iletkenler üzerinde negatif kutuptan pozitif kutupa doğru hareketiyle oluşur. Elektron konsantrasyonu katotta yüksek, anotta ise düşüktür. Elektrik akımının yönü, elektron akış yönünün tersi olarak tanımlanır. Akım şiddeti (I), iletken ortamın herhangi bir kesitinden birim zamanda geçen yük miktarına amper (A) olarak tanımlanır. Voltaj (V) ise, iki nokta arasında bir yükün enerjisinde meydana gelen değişikliğin matematiksel bir ifadesidir. Elektronların kolaylıkla hareket ettiği iletkenler maddelerde, farklı derecelerde görülen ve elektron geçişine karşı oluşan kuvvetlere, direnç denir. Elektrik akımlarında direncin birimi ohm (Ω) ile ölçülür. Voltaj, akım ve direnç arasındaki ilişkinin matematiksel ifadesi Ohm Yasası ile ifade edilmektedir. Maddenin direnci yüksekse, o bölgeden daha az akım geçerek etki yapmaktadır. Elektrik akımı, direncin daha az olduğu yere doğrudur (1,2,3).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İstinye Üniversitesi-Tıp Fakültesi-Biyofizik AD., denizhan.karis@istinye.edu.tr,
ORCID iD: 0000-0002-5976-4107

DOI: 10.37609/akya.3998. c3412

özellikle ultrason ve terapötik egzersizler gibi diğer yöntemlerle birlikte kullanıldığında, kapsamlı ağrı yönetimi ve rehabilitasyon için değerli bir yöntem haline getirir. Diadinamik terapi, çok çeşitli akut ve kronik ağrı durumlarının tedavisinde güçlü bir seçenek olmaya devam etmektedir.

Elektroterapi, antik çağlardaki gözlemlerden başlayarak bilimsel keşifler ve teknolojik gelişmeler yoluyla modern tıbbın önemli ve etkili tedavi yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Alçak elektrik akımlarla uygulanan elektroterapi; ağrıyı yönetmek, kas fonksiyonlarını korumak, rehabilitasyon sürecini hızlandırmak ve yaşam kalitesini iyileştirmek için klinikte önemli bir rol oynar. Doğru hasta, uygun yöntem ve uygun tedavi seçenekleri kullanıldığında uygun bir tedavi seçeneğidir.

Günümüzde bilgisayar kontrollü cihazların da yaygınlaşmasıyla, elektroterapi uygulama yöntemleri daha güvenli ve kişiye özel terapi seçenekleri için elverişli hale gelmiş durumdadır.

KAYNAKLAR

1. Pehlivan F. *Tıbbi Fizik*. Ankara: Pelikan Yayınevi; 2016.
2. Barutçu B. Elektrik Akımlarının Doku Üzerindeki Etkileri. Dursun Ş (ed.) *İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Biyofizik Ders Kitabı*, içinde. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınevi, 2010. p. 403-431.
3. Çelebi G. *Biyomedikal Fizik*. İzmir: Barış Yayınları Fakülteler Kitabevi; 2008.
4. Kırdı N. Terminoloji. Kırdı N (ed.) *Elektroterapide Temel Prensipler Ve Klinik Uygulamalar* (2. Baskı) içinde. Ankara: Hipokrat Kitabevi; 2016. p. 7-13.
5. Kırdı N. Elektrik Stimülasyonu. Kırdı N (ed.) *Elektroterapide Temel Prensipler Ve Klinik Uygulamalar* (2. Baskı) içinde. Ankara: Hipokrat Kitabevi; 2016. p. 25-35.
6. Tarakçı E. Kısa EP. Elektrik Stimülasyonu Genel Bilgiler. Razak Özdinçler A (ed.), *Elektroterapi ve Fiziksel Modaliteler: Kanıtlar ve Olgular Eşliğinde* içinde. İstanbul: İstanbul Tıp Kitabevleri, 2020. p. 201-205.
7. Kırdı N, Şimşek N. Elektroterapinin Tarihçesi. Kırdı N (ed.) *Elektroterapide Temel Prensipler Ve Klinik Uygulamalar* (2. Baskı) içinde. Ankara: Hipokrat Kitabevi; 2016. p. 1-6.
8. Alaca N. Hücre Zarı, Sinir ve Kas Fizyolojisi. Razak Özdinçler A (ed.), *Elektroterapi ve Fiziksel Modaliteler: Kanıtlar ve Olgular Eşliğinde* içinde. İstanbul: İstanbul Tıp Kitabevleri, 2020. p. 11-56.
9. Guyton AC, Hall JE. Membrane Physiology, Nerve, and Muscle. *Textbook Of Medical Physiology* (11. ed.) içinde. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2006. p. 43-100.
10. Akırmak Ü, Aksoy C, Alpkalyon T. ve ark. *Elektroterapi*. (2. Baskı). İstanbul: Nobel Kitabevi; 2001.
11. Tarakçı E, Ersöz Hüseyinsinoğlu B, Zengin Alpözgen A ve ark. *Fiziksel Modaliteler ve Elektroterapi*. Razak Özdinçler A (ed.) (2. Baskı). İstanbul: İstanbul Tıp Kitabevi; 2016.
12. Ayhan Ç, Kırdı N, Şimşek N. Alçak Frekanslı Akımlar. Kırdı N (ed.) *Elektroterapide Temel Prensipler Ve Klinik Uygulamalar* (2. Baskı) içinde. Ankara: Hipokrat Kitabevi; 2016. p. 35-45.
13. Analay Akbaba Y, Baktır S. Alçak Frekanslı Akımlar. Razak Özdinçler A (ed.), *Elektroterapi ve Fiziksel Modaliteler: Kanıtlar ve Olgular Eşliğinde* içinde. İstanbul: İstanbul Tıp Kitabevleri, 2020. p. 229-247.
14. Jagmorhan S. *Textbook of Electrotherapy*, India: Jaypee Brothers Medical Publishers Ltd.; 2012.

15. Jagmorhan S. *Manual of Practical Electrotherapy*. India: Jaypee Brothers Medical Publishers Ltd.; 2011.
16. Low J, Reed A. *Electrotherapy Explained: Principles and Practice*. Oxford: Butterworth-Heinemann Publishing; 1995.
17. Saeed M. *Faradic Current*. 05/12/2025 tarihinde <https://www.slideshare.net/slideshow/faradic-currentpdf/254273499> adresinden ulaşılmıştır).
18. Patel N. *Faradism Under Pressure*. 03/12/2025 tarihinde <https://mobilephysiotherapyclinic.in/faradism-under-pressure/> adresinden ulaşılmıştır).
19. Bickell CS, Gregory CM, Bellew JW. Electrotherapy for Musculoskeletal Disorders Bellew JW, Michlovitz SL, Nolan Jr TP (eds.) Michlovitz's Modalities for Therapeutic Intervention içinde. (6. ed.). Philadelphia: McGraw-Hill Education; 2016. p. 253-322.
20. Saeed M. Periodical waveforms in electrical and electronic engineering. Garcia J (ed.) Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering içinde. Elsevier, Spain: 2023. p. 614-621. doi: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00091-X
21. Nelson RM, Currier Dean P. *Clinical Electrotherapy*. (2. ed). Connecticut, USA: Appleton and Lange; 1991.
22. Kandel ER, Schwartz J, Jessell TM, Principles of Neural Science. (4th Ed.). New York: McGraw-Hill Health Professions Division, 2000.
23. Kahn J. *Principles and Practice of Electrotherapy* (4. ed.). London: Churchill Livingstone Publishing; 2001.
24. Belager AY. *Kamta dayalı Elektroterapi*. (Edibe ÜNAL, Çev. Ed.). Ankara: Pelikan Yayınevi; 2012.
25. Kitchen S. *Electrotherapy Evidence Based Practice*. (11. Ed). London: Churchill Livingstone Publishing; 2001.

BÖLÜM 5

TRANSKUTANÖZ ELEKTRİKSEL SİNİR STİMÜLASYONU (TENS)

Cemalettin DEMİR¹

1. GİRİŞ

Transkutanöz elektriksel sinir stimülasyonu (TENS) akut ve kronik ağrının tedavisinde kullanılan ve farmakolojik olmayan noninvaziv bir müdahale yöntemidir. TENS ünitesi ile oluşturulan belirli parametrelerdeki (frekans, yoğunluk vs.) alternatif akım, ağrılı bölgeye cilt üzerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla uygulanır. Birçok ülkede reçetesiz olarak temin edilebilen TENS aygıtları ucuz, ayarlanabilir, kolay uygulanabilir olma ve kendi kendine uygulanabilme gibi avantajlara sahiptir (Şekil 1) (1,2). Hafif ve orta şiddetli ağrıda tek başına tedavi olarak kullanılırken orta ve şiddetli ağrı durumlarında ilaç tedavisine ek olarak kullanılmaktadır. Klinik deneyimler ve çalışmalar TENS'in çeşitli ağrılı durumlarda etkili olduğunu gösterdiği gibi birçok hasta TENS tedavisinden memnun kaldığını ifade etmektedir. Öte yandan TENS ile ilgili sistematik incelemelerin kesin sonuç vermemesi ve henüz yeteri kadar kanıt sağlayacak klinik çalışmanın olmaması ağrıyı hafifletmedeki klinik etkinliğinde belirsizliğe neden olmaktadır (1,3). TENS'in analjezik etkisini açıklayan çeşitli mekanizmalar öne sürülmüştür ancak bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.



Şekil 1. Portatif TENS cihazı ve elektrotları

¹ Öğr. Gör. Dr., Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, cemalettin.demir@erdogan.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-8140-9892

KAYNAKLAR

1. Vance CGT, Dailey DL, Chimenti RL, et al. Using TENS for Pain Control: Update on the State of the Evidence. *Medicina (Kaunas)*. 2022 Sep 22;58(10):1332. doi: 10.3390/medicina58101332.
2. Johnson MI, Paley CA, Jones G, et al. Efficacy and safety of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) for acute and chronic pain in adults: a systematic review and meta-analysis of 381 studies (the meta-TENS study). *BMJ Open*. 2022 Feb 10;12(2):e051073. doi: 10.1136/bmjopen-2021-051073.
3. Jones I, Johnson MI. Transcutaneous electrical nerve stimulation. *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain*. 2009;9(4):130-135. doi:10.1093/BJACEACCP/MKP021
4. Teoli D, Dua A, An J. Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation [Internet]. *StatPearls*. 2025. (05/12/2025 tarihinde <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537188/> adresinden ulaşılmıştır).
5. Melzack R, Wall PD. Pain mechanisms: a new theory. *Science (New York, NY)*. 1965;150(3699):971-979. doi:10.1126/SCIENCE.150.3699.971
6. Gildenberg PL. History of Electrical Neuromodulation for Chronic Pain. *Pain Medicine*. 2006;7(suppl_1):S7-S13. doi:10.1111/J.1526-4637.2006.00118.X
7. Vance CGT, Dailey DL, Rakel BA, Sluka KA. Using TENS for pain control: the state of the evidence. *Pain management*. 2014;4(3):197. doi:10.2217/PMT.14.13
8. Johnson MI. Resolving Long-Standing Uncertainty about the Clinical Efficacy of Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation (TENS) to Relieve Pain: A Comprehensive Review of Factors Influencing Outcome. *Medicina*. 2021; 57(4):378. doi:10.3390/MEDICINA57040378
9. Johnson PM. Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation: Mechanisms, Clinical Application and Evidence. *Reviews in Pain*. 2007;1(1):7. doi:10.1177/204946370700100103
10. Machi A, Patel A, Ottestad E. Nerve stimulation and neuromodulation for painful nerves: a narrative review. *International Orthopaedics*. 2025;49(5):989-996. doi:10.1007/S00264-025-06498-0
11. Carly M, Webb, Charlotte E. Steeds. The anatomy and physiology of pain. *Clinics in Integrated Care*. 2022;14(5):100115. doi:10.1016/J.INTCAR.2022.100115
12. Raffaelli W, Arnaudo E. Pain as a disease: an overview. *Journal of Pain Research*. 2017;10:2003. doi:10.2147/JPR.S138864
13. Karcz M, Abd-Elsayed A, Chakravarthy K, et al. Pathophysiology of Pain and Mechanisms of Neuromodulation: A Narrative Review (A Neuron Project). *Journal of Pain Research*. 2024;17:3757-3790. doi:10.2147/JPR.S475351
14. Kağan Yücel R, Özdemir F, Ural Ulucan H, Hizli Yücel S. Endogenous opioid system in pain management: Mechanisms, influences, and clinical implications. *Journal of Experimental and Clinical Medicine (Turkey)*. 2025;42(2):207-211. doi:10.52142/OMUJECM.42.2.15
15. Ferdousi M, Finn DP. Stress-induced modulation of pain: Role of the endogenous opioid system. *Progress in Brain Research*. 2018;239:121-177. doi:10.1016/BS.PBR.2018.07.002
16. Reddi D, Curran N, Stephens R. An introduction to pain pathways and mechanisms. *British journal of hospital medicine*. 2013, 74.Sup12: C188-C191. doi:10.12968/HMED.2013.74.SUP12.C188
17. Patel P, Green M, Tram J, et al. Latest Advancements in Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation (TENS) and Electronic Muscle Stimulation (EMS): Revisiting an Established Therapy with New Possibilities. *Journal of Pain Research*. 2025;18:137-153. doi:10.2147/JPR.S493162
18. Sluka KA, Vance CGT, Lisi TL. High-frequency, but not low-frequency, transcutaneous electrical nerve stimulation reduces aspartate and glutamate release in the spinal cord dorsal horn. *Journal of Neurochemistry*. 2005;95(6):1794-1801. doi:10.1111/J.1471-4159.2005.03511.X
19. Sluka KA, Bjordal JM, Marchand S, Rakel BA. What Makes Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation Work? Making Sense of the Mixed Results in the Clinical Literature. *Physical*

- Therapy*. 2013;93(10):1397. doi:10.2522/PTJ.20120281
20. Léonard G, Cloutier C, Marchand S. Reduced Analgesic Effect of Acupuncture-like TENS but Not Conventional TENS in Opioid-Treated Patients. *The Journal of Pain*. 2011;12(2):213–221. doi:10.1016/J.JPAIN.2010.07.003
 21. Gozani SN. Remote analgesic effects of conventional transcutaneous electrical nerve stimulation: A scientific and clinical review with a focus on chronic pain. *Journal of Pain Research*. 2019;12:3185–3201. doi:10.2147/JPR.S226600
 22. Han JS, Chen XH, Sun SL, et al. Effect of low- and high-frequency TENS on Met-enkephalin-Arg-Phe and dynorphin A immunoreactivity in human lumbar CSF. *Pain*. 1991;47(3):295–298. doi:10.1016/0304-3959(91)90218-M
 23. Salar G, Job I, Mingrino S, et al. Effect of transcutaneous electrotherapy on CSF beta-endorphin content in patients without pain problems. *Pain*. 1981;10(2):169–172. doi:10.1016/0304-3959(81)90192-5
 24. Leonard G, Goffaux P, Marchand S. Deciphering the role of endogenous opioids in high-frequency TENS using low and high doses of naloxone. *Pain*. 2010;151(1):215–219. doi:10.1016/J.PAIN.2010.07.012
 25. Sluka KA, Deacon M, Stibal A, et al. Spinal blockade of opioid receptors prevents the analgesia produced by TENS in arthritic rats. *The Journal of pharmacology and experimental therapeutics*. 1999;289(2):840–846. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10215661>
 26. Kalra A, Urban MO, Sluka KA. Blockade of opioid receptors in rostral ventral medulla prevents antihyperalgesia produced by transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS). *The Journal of pharmacology and experimental therapeutics*. 2001;298(1):257–263. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11408550>
 27. Sjölund BH, Eriksson MBE. The influence of naloxone on analgesia produced by peripheral conditioning stimulation. *Brain Research*. 1979;173(2):295–301. doi:10.1016/0006-8993(79)90629-2
 28. Radhakrishnan R, King EW, Dickman JK, et al. Spinal 5-HT₂ and 5-HT₃ receptors mediate low, but not high, frequency TENS-induced antihyperalgesia in rats. *Pain*. 2003;105(1–2):205. doi:10.1016/S0304-3959(03)00207-0
 29. Radhakrishnan R, Sluka KA. Spinal muscarinic receptors are activated during low or high frequency TENS-induced antihyperalgesia in rats. *Neuropharmacology*. 2003;45(8):1111. doi:10.1016/S0028-3908(03)00280-6
 30. Maeda Y, Lisi TL, Vance CGT, Sluka KA. Release of GABA and activation of GABAA in the spinal cord mediates the effects of TENS in rats. *Brain research*. 2007;1136(1):43. doi:10.1016/J.BRAINRES.2006.11.061
 31. de Oliveira HU, dos Santos RS, Malta IHS, et al. Investigation of the Involvement of the Endocannabinoid System in TENS-Induced Antinociception. *Journal of Pain*. 2020;21(7–8):820–835. doi:10.1016/j.jpain.2019.11.009
 32. Mokhtari T, Ren Q, Li N, et al. Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation in Relieving Neuropathic Pain: Basic Mechanisms and Clinical Applications. *Current Pain and Headache Reports*. 2020;24(4):14-. doi:10.1007/S11916-020-0846-1/TABLES/1
 33. Sabino GS, Santos CMF, Francischi JN, de Resende MA. Release of Endogenous Opioids Following Transcutaneous Electric Nerve Stimulation in an Experimental Model of Acute Inflammatory Pain. *Journal of Pain*. 2008;9(2):157–163. doi:10.1016/j.jpain.2007.09.003

BÖLÜM 6

NÖROMÜSKÜLER VE FONKSİYONEL ELEKTRİKSEL STİMÜLASYON

Aziz KARACA ¹

GİRİŞ

Elektrik akımının kas dokusunda kasılma meydana getirdiği olgusu ilk olarak 1790 yılında Luigi Galvani tarafından ortaya konulmasından beri, elektriksel stimülasyonun uzun yıllar bilimsel ilgi odağı olmasına zemin hazırlamış ve zaman içerisinde farklı akım tiplerinin çeşitli klinik durumların tedavisinde kullanılmasına öncülük etmiştir (1). Bu bağlamda, özellikle son yıllarda geliştirilen Nöromusküler Elektriksel Stimülasyon (NMES) ve Fonksiyonel Elektriksel Stimülasyon (FES), modern rehabilitasyon tıbbının vazgeçilmez araçları haline gelmiştir (Şekil 1).

Bu uygulamalar uyarılabilir dokuların (sinir ve kas) membran potansiyellerini değiştirerek aksiyon potansiyeli oluşturma prensibine dayanır. Kökleri 20. yüzyılın başlarına uzansa da modern fizyolojideki karşılıkları 1960'larda şekillenmeye başlamıştır (2). Özellikle 1977'de peroneal sinir stimülasyonu ile motor ünite rekrütmanının artırılabilceğinin gösterilmesi alanda dönüm noktası olmuştur (3). Bu tarihten itibaren, dışsal elektrik akımlarının biyofiziksel uyarıları taklit etme yeteneği hem mühendislik hem de klinik bilimler açısından detaylandırılmıştır. Güncel araştırmalar bu uygulamaların sadece periferik kas üzerinde değil, afferent geri bildirim yoluyla merkezi sinir sisteminde kortikal plastisiteyi de modüle ettiğini ortaya koymaktadır (4).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Fizyoloji AD., drazizkaraca@gmail.com, ORCID iD: 0000-0001-9408-5073

DOI: 10.37609/akya.3998. c3414

KAYNAKLAR

1. Kale M, Kaçoğlu C, Gürol B. Elektromyostimülasyon antrenmanlarının nöral adaptasyon ve sportif performans üzerine etkileri. *Spor Bilimleri Dergisi*. 2014;25(3):142-158. doi:10.17644/sbd.171318
2. Bickel CS, Gregory CM, Dean JC. Motor unit recruitment during neuromuscular electrical stimulation: a critical appraisal. *Eur J Appl Physiol*. 2011;111(10):2399-407, doi:10.1007/s00421-011-2128-4
3. Devi S, Lovelace RE, Duarte N. Proximal peroneal nerve conduction velocity: Recording from anterior tibial and peroneus brevis muscles. *Annals of Neurology*. 1977;2(116-119. doi:10.1002/ana.410020205
4. Cui Y, Cong F, Huang F, et al. Cortical activation of neuromuscular electrical stimulation synchronized mirror neuron rehabilitation strategies: an fNIRS study. *Front Neurol*. 2023;14:1232436. doi:10.3389/fneur.2023.1232436
5. Nussbaum EL, Houghton P, Anthony J, et al. Neuromuscular Electrical Stimulation for Treatment of Muscle Impairment: Critical Review and Recommendations for Clinical Practice. *Physiother Can*. 2017;69(5):1-76. doi:10.3138/ptc.2015-88
6. Doucet BM, Lam A, Griffin L. Neuromuscular electrical stimulation for skeletal muscle function. *Yale J Biol Med*. 2012;85(2):201-15
7. Popović DB, Popović-Maneski L. Neuroprosthesis and Functional Electrical Stimulation (Peripheral). Thakor NV. (ed.) In: Handbook of Neuroengineering. Singapore: Springer Singapore; 2020; pp. 1-40.
8. 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;42:101-5.
9. Lin C, Cheng KH, Pan W, et al. Adaptive Closed-Loop Functional Electrical Stimulation System With Visual Feedback for Enhanced Grasping in Neurological Impairments. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*. 2025;7(2):678-686. doi:10.1109/TMRB.2025.3557197
10. Fessard A, Zavoriti A, Boyer N, et al. Neuromuscular electrical stimulation training induces myonuclear accretion and hypertrophy in mice without overt signs of muscle damage and regeneration. *Skeletal Muscle* 2025;15(1):3, doi:10.1186/s13395-024-00372-0
11. Evancho A, Tyler WJ, McGregor K. A review of combined neuromodulation and physical therapy interventions for enhanced neurorehabilitation. *Front Hum Neurosci*. 2023;17;1151218. doi:10.3389/fnhum.2023.1151218
12. Henneman E. Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science*. 1957;126(3287):1345-7. doi:10.1126/science.126.3287.1345
13. Martin R, Sadowsky C, Obst K, et al. Functional electrical stimulation in spinal cord injury:: from theory to practice. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2012;18(1):28-33. doi:10.1310/sci1801-28
14. Gregory CM, Bickel CS. Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation. *Phys Ther*. 2005;85(4):358-64
15. Abitante TJ, Rutkove SB, Duda KR, et al. Effect of Athletic Training on Fatigue During Neuromuscular Electrical Stimulation. *Front Sports Act Living*. 2022;4(894395. doi:10.3389/fspor.2022.894395
16. Krueger J, Krauth R, Reichert C, et al. Hebbian plasticity induced by temporally coincident BCI enhances post-stroke motor recovery. *Scientific Reports*. 2024;14(1):18700. doi:10.1038/s41598-024-69037-8
17. Carson RG, Buick AR. Neuromuscular electrical stimulation-promoted plasticity of the human brain. *J Physiol*. 2021;599(9):2375-2399. doi:10.1113/jp278298
18. Milosevic M, Marquez-Chin C, Masani K, et al. Why brain-controlled neuroprosthetics matter: mechanisms underlying electrical stimulation of muscles and nerves in rehabilitation.

- BioMedical Engineering OnLine*. 2020;19(1):81. doi:10.1186/s12938-020-00824-w
19. Blickenstorfer A, Kleiser R, Keller T, et al. Cortical and subcortical correlates of functional electrical stimulation of wrist extensor and flexor muscles revealed by fMRI. *Hum Brain Mapp*. 2009;30(3):963-75. doi:10.1002/hbm.20559
20. Gandolla M, Niero L, Molteni F, et al. Brain Plasticity Mechanisms Underlying Motor Control Reorganization: Pilot Longitudinal Study on Post-Stroke Subjects. *Brain Sci*. 2021;11(3). doi:10.3390/brainsci11030329
21. Biasucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke. *Nature Communications*. 2018;9(1):2421. doi:10.1038/s41467-018-04673-z
22. Knutson JS, Harley MY, Hisel TZ, et al. Contralaterally controlled functional electrical stimulation for stroke rehabilitation. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2012;2012(314-7). doi:10.1109/embs.2012.6345932
23. Huang S, Zhang Y, Liu P, et al. Effectiveness of contralaterally controlled functional electrical stimulation vs. neuromuscular electrical stimulation for recovery of lower extremity function in patients with subacute stroke: A randomized controlled trial. *Front Neurol*. 2022;13(1010975). doi:10.3389/fneur.2022.1010975
24. Takeda K, Tanino G, Miyasaka H. Review of devices used in neuromuscular electrical stimulation for stroke rehabilitation. *Med Devices (Auckl)*. 2017;10(207-213). doi:10.2147/med.S123464
25. Gorgey AS, Dudley GA. The role of pulse duration and stimulation duration in maximizing the normalized torque during neuromuscular electrical stimulation. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2008;38(8):508-16. doi:10.2519/jospt.2008.2734
26. Arpin DJ, Ugiliweneza B, Forrest G, et al. Optimizing Neuromuscular Electrical Stimulation Pulse Width and Amplitude to Promote Central Activation in Individuals With Severe Spinal Cord Injury. *Front Physiol*. 2019;10:1310. doi:10.3389/fphys.2019.01310
27. Taylor MJ, Fornusek C, Ruys AJ. Reporting for Duty: The duty cycle in Functional Electrical Stimulation research. Part I: Critical commentaries of the literature. *Eur J Transl Myol*. 2018;28(4):7732. doi:10.4081/ejtm.2018.7732
28. Glaviano NR, Saliba S. Can the Use of Neuromuscular Electrical Stimulation Be Improved to Optimize Quadriceps Strengthening? *Sports Health*. 2016;8(1):79-85. doi:10.1177/1941738115618174
29. Lee JH, Baker LL, Johnson RE, et al. Effectiveness of neuromuscular electrical stimulation for management of shoulder subluxation post-stroke: a systematic review with meta-analysis. *Clin Rehabil*. 2017;31(11):1431-1444. doi:10.1177/0269215517700696
30. Berenpas F, Schiemanck S, Beelen A, et al. Kinematic and kinetic benefits of implantable peroneal nerve stimulation in people with post-stroke drop foot using an ankle-foot orthosis. *Restor Neurol Neurosci*. 2018;36(4):547-558. doi:10.3233/rnn-180822
31. Street T, Swain I, Taylor P. Training and orthotic effects related to functional electrical stimulation of the peroneal nerve in stroke. *J Rehabil Med*. 2017;49(2):113-119. doi:10.2340/16501977-2181
32. Zhang YW, Dou ZL, Zhao F, et al. Neuromuscular electrical stimulation improves swallowing initiation in patients with post-stroke dysphagia. *Front Neurosci*. 2022;16:1011824. doi:10.3389/fnins.2022.1011824
33. van der Scheer JW, Goosey-Tolfrey VL, Valentino SE, et al. Functional electrical stimulation cycling exercise after spinal cord injury: a systematic review of health and fitness-related outcomes. *J Neuroeng Rehabil*. 2021;18(1):99. doi:10.1186/s12984-021-00882-8
34. Dolbow DR, Holcomb WR, Gorgey AS. Improving the Efficiency of Electrical Stimulation Activities After Spinal Cord Injury. *Curr Phys Med Rehabil Rep*. 2014;2(3):169-175. doi:10.1007/s40141-014-0053-2
35. Taylor P, Esnouf J, Hobby J. The functional impact of the Freehand System on tetraplegic hand

- function. *Clinical Results. Spinal Cord*. 2002;40(11):560-6. doi:10.1038/sj.sc.3101373
36. Kilgore KL, Bryden A, Keith MW, et al. Evolution of Neuroprosthetic Approaches to Restoration of Upper Extremity Function in Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2018;24(3):252-264. doi:10.1310/sci2403-252
37. Miller L, McFadyen A, Lord AC, et al. Functional Electrical Stimulation for Foot Drop in Multiple Sclerosis: A Systematic Review and Meta-Analysis of the Effect on Gait Speed. *Arch Phys Med Rehabil*. 2017;98(7):1435-1452. doi:10.1016/j.apmr.2016.12.007
38. Greve KR, Joseph CF, Berry BE, et al. Neuromuscular electrical stimulation to augment lower limb exercise and mobility in individuals with spastic cerebral palsy: A scoping review. *Front Physiol*. 2022;13(951899). doi:10.3389/fphys.2022.951899
39. Elnaggar RK, Alqahtani BA, Elbanna MF. Functional outcomes of botulinum neurotoxin-A injection followed by reciprocal electrical stimulation in children with cerebral palsy: A randomized controlled trial. *Restor Neurol Neurosci*. 2020;38(6):431-441. doi:10.3233/rnn-201088
40. Rice DA, McNair PJ. Quadriceps arthrogenic muscle inhibition: neural mechanisms and treatment perspectives. *Semin Arthritis Rheum*. 2010;40(3):250-66. doi:10.1016/j.semarthrit.2009.10.001
41. Stevens-Lapsley JE, Balter JE, Wolfe P, et al. Early neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps muscle strength after total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *Phys Ther*. 2012;92(2):210-26. doi:10.2522/ptj.20110124
42. Klika AK, Yakubek G, Piuze N, et al. Neuromuscular Electrical Stimulation Use after Total Knee Arthroplasty Improves Early Return to Function: A Randomized Trial. *J Knee Surg*. 2022;35(1):104-111. doi:10.1055/s-0040-1713420
43. Toth MJ, Tourville TW, Voigt TB, et al. Utility of Neuromuscular Electrical Stimulation to Preserve Quadriceps Muscle Fiber Size and Contractility After Anterior Cruciate Ligament Injuries and Reconstruction: A Randomized, Sham-Controlled, Blinded Trial. *Am J Sports Med*. 2020;48(10):2429-2437. doi:10.1177/0363546520933622
44. Logerstedt DS, Scalzitti D, Risberg MA, et al. Knee Stability and Movement Coordination Impairments: Knee Ligament Sprain Revision 2017. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2017;47(11):A1-a47. doi:10.2519/jospt.2017.0303
45. Vaz MA, Baroni BM, Geremia JM, et al. Neuromuscular electrical stimulation (NMES) reduces structural and functional losses of quadriceps muscle and improves health status in patients with knee osteoarthritis. *J Orthop Res*. 2013;31(4):511-6. doi:10.1002/jor.22264
46. Carvalho MTX, Guesser Pinheiro VH, Alberton CL. Effectiveness of neuromuscular electrical stimulation training combined with exercise on patient-reported outcomes measures in people with knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis. *Physiother Res Int*. 2024;29(1):e2062, doi:10.1002/pri.2062
47. Ploesteanu RL, Nechita AC, Turcu D, et al. Effects of neuromuscular electrical stimulation in patients with heart failure - review. *J Med Life*. 2018;11(2):107-118
48. Nuhr MJ, Pette D, Berger R, et al. Beneficial effects of chronic low-frequency stimulation of thigh muscles in patients with advanced chronic heart failure. *Eur Heart J*. 2004;25(2):136-43. doi:10.1016/j.ehj.2003.09.027
49. Gomes Neto M, Oliveira FA, Reis HF, et al. Effects of Neuromuscular Electrical Stimulation on Physiologic and Functional Measurements in Patients With Heart Failure: A systematic review with meta-analysis. *J Cardiopulm Rehabil Prev*. 2016;36(3):157-66. doi:10.1097/hcr.0000000000000151
50. Dirks ML, Hansen D, Van Assche A, et al. Neuromuscular electrical stimulation prevents muscle wasting in critically ill comatose patients. *Clin Sci (Lond)*. 2015;128(6):357-65. doi:10.1042/cs20140447
51. Liu M, Luo J, Zhou J, et al. Intervention effect of neuromuscular electrical stimulation on

- ICU acquired weakness: A meta-analysis. *Int J Nurs Sci.* 2020;7(2):228-237. doi:10.1016/j.ijnss.2020.03.002
52. Maneski LZ, Malešević NM, Savić AM, et al. Surface-distributed low-frequency asynchronous stimulation delays fatigue of stimulated muscles. *Muscle Nerve.* 2013;48(6):930-7. doi:10.1002/mus.23840
 53. Downey RJ, Cheng TH, Bellman MJ, et al. Closed-Loop Asynchronous Neuromuscular Electrical Stimulation Prolongs Functional Movements in the Lower Body. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2015;23(6):1117-27. doi:10.1109/tnsre.2015.2427658
 54. Doheny EP, Caulfield BM, Minogue CM, et al. Effect of subcutaneous fat thickness and surface electrode configuration during neuromuscular electrical stimulation. *Med Eng Phys.* 2010;32(5):468-74. doi:10.1016/j.medengphy.2010.03.004
 55. Ben Abdallah I, Bouteraa Y, Alotaibi A. AI-driven hybrid rehabilitation: synergizing robotics and electrical stimulation for upper-limb recovery after stroke. *Front Bioeng Biotechnol.* 2025;13:1619247. doi:10.3389/fbioe.2025.1619247
 56. Besio W, Sharma V, Spaulding J. The effects of concentric ring electrode electrical stimulation on rat skin. *Ann Biomed Eng.* 2010;38(3):1111-8. doi:10.1007/s10439-009-9891-y
 57. Badger J, Taylor P, Swain I. The safety of electrical stimulation in patients with pacemakers and implantable cardioverter defibrillators: A systematic review. *J Rehabil Assist Technol Eng.* 2017;4(2055668317745498). doi:10.1177/2055668317745498
 58. Bilgin Badur N, Winkle MJ, Leslie SW. Autonomic Dysreflexia. In: StatPearls. Treasure Island (FL); 2025.
 59. Hosseiniravandi M, Kahlaee AH, Karim H, et al. Home-based telerehabilitation software systems for remote supervising: a systematic review. *Int J Technol Assess Health Care.* 2020;36(2): 113-125. doi:10.1017/s0266462320000021
 60. Covarrubias-Escudero F, Balbontín-Miranda F, Urzúa-Soler B, et al. Home-based functional electrical stimulation protocol for people with chronic stroke. Efficacy and usability of a single-center cohort. *Artif Organs.* 2025;49(7): 1141-1152. doi:10.1111/aor.14922

BÖLÜM 7

MAGNETOTERAPİNİN BİYOFİZİKSEL ESASLARI VE KULLANIM ALANLARI

Selma YAMAN¹

1. GİRİŞ

Ağrı, organik bir kökenden kaynak alan ya da travma, bası, darp gibi dış etmenlerle gelişen, kişinin deneyimleri ve duygu durumu ile yakından ilişkili sensoryal, emosyonel, hoş olmayan bir durum olarak tanımlanır (1,2). Nosisepsiyonun farklı basamaklarında bir takım metabolik olaylar ile birlikte ortaya çıkan allodini, hiperaljezi vb. duyu yoksunluğu ya da aşırı duyu hissi gibi fiziksel semptomları olan ağrının tedavi edilmesi için farmakolojik, termal, elektrik uyarıları vb. bir takım tekniklere başvurulmuş olup bunlardan bir tanesi de manyetik alan ile ilişkilendirilen Magnetoterapidir (3,4).

2. MAGNETOTERAPİ VE BİYOFİZİKSEL TEMELLERİ

“Manyetizim” kelimesinin; yer altı zenginliklerinden biri olan magnetitin varlığı ile karşılaştığı yerleşimin ismi olan Magnesia (Manisa)’ dan türetildiği öngörülmektedir. Mıknatıslar; kuzey (N) ve güney (S) olmak üzere iki kutbu bulunan ve bu iki kutup arasında manyetik alan çizgilerinin giriş ve çıkışları olduğu bilinen doğal ya da sentetik yapılardır (Şekil 1) (5).

Manyetik alan ile elektrik alan fiziksel zeminde birbirleri ile yakından ilişkilidir. Standart koşullarda; iletken bir malzemede, ortamın direncini (R) yenen hareketli yükler, elektrik akımını (I) meydana getirir ve hareketli elektrik yüklerinin de bir elektrik alan (EA) oluşturduğu bilinmektedir (6). Bu temel bilgi ışığında I varlığında bir de manyetik alanın (MA) var olduğundan bahsetmek doğru olacaktır. İletken bir telde hareket eden yükler dolayısıyla meydana gelen I, etrafında bir de MA oluşturur. Manyetik alan şiddeti

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tıp Fakültesi, Biyofizik AD., syaman@ksu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-9301-9119

DOI: 10.37609/akya.3998. c3415

KAYNAKLAR

1. Mert T, Sahin E, Yaman S, et al. (2018). Pain-relieving effectiveness of co-treatment with local tramadol and systemic minocycline in carrageenan-induced inflammatory pain model. *Inflammation*, 41(4), 1238–1249. <https://doi.org/10.1007/s10753-018-0771-1>.
2. Zhang JM, An J. (2007). Cytokines, inflammation, and pain. *International Anesthesiology Clinics*, 45, 27–37.
3. Shi X, Xie Y, Zhao N, et al. (2025). Internet of Things-based pulsed electromagnetic field combined with exercise therapy in patients with knee osteoarthritis: Randomized, controlled, noninferiority trial protocol. *Trials*, 26(1), 529. <https://doi.org/10.1186/s13063-025-09162-5>.
4. Zečević Luković T, Ristić B, Jovanović Z, et al. (2012). Complex regional pain syndrome type I in the upper extremity: How efficient physical therapy and rehabilitation are. *Medical Glasnik (Zenica)*, 9(2), 334–340.
5. Çelebi G. (2008). *Biyomedikal fizik*. İzmir: Barış Yayınları Fakülteler Kitabevi.
6. Markov MS. (2007). Expanding use of pulsed electromagnetic field therapies. *lectromagnetic Biology and Medicine*, 26(3), 257–274. <https://doi.org/10.1080/15368370701580806>.
7. Shupak NM, Prato FS, Thomas AW. (2004). Human exposure to a specific pulsed magnetic field: Effects on thermal sensory and pain thresholds. *Neuroscience Letters*, 363(2), 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.03.069>.
8. Güneş S, Büyükkakılı B. (2013). Düşük frekanslı sinüzoidal manyetik alanın sıçan kas elektriksel ve mekanik aktiviteleri üzerine etkileri.
9. Tran M. (2018). Evidence for Maxwell's equations, fields, force laws and alternative theories of classical electrodynamics. *European Journal of Physics*, 39(6), 063001.
10. Ramesh K, Tripathi D, Bég O, et al. (2019). Slip and Hall current effects on Jeffrey fluid suspension flow in a peristaltic hydromagnetic blood micropump. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 43(4), 675–692.
11. Pehlivan F. (2016). *Tıbbi fizik*. Ankara: Pelikan Yayınevi.
12. Hayat T, Asghar S, Tanveer A, et al. (2019). Effects of Hall current and ion-slip on the peristaltic motion of couple stress fluid with thermal deposition. *Neural Computing & Applications*, 31, 117–126. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2984-x>.
13. Aykut İ, Günay İ. (1997). AC manyetik alana maruz bırakılan deneysel olarak oluşturulan diyabetli sıçanların *extensor digitorum longus* ve *soleus* kasının biyoelektrik, biyomekanik, biyokimyasal ve histolojik özellikleri.
14. Tasić T, Lozić M, Glumac S, et al. (2021). Static magnetic field on behavior, hematological parameters and organ damage in spontaneously hypertensive rats. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111085.
15. Zhang X, Yarema K, Xu A. (2017). *Biological effects of static magnetic fields* (ss. 1–21). Beijing: Science Press.
16. Zhang B, Yuan X, Lv H, et al. (2023). Biophysical mechanisms underlying the effects of static magnetic fields on biological systems. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 177, 14–23.
17. Pauling L. (1977). Magnetic properties and structure of oxyhemoglobin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 74(7), 2612–2613. <https://doi.org/10.1073/pnas.74.7.2612>.
18. Zamanian A, Hardiman CJHFE. (2005). Electromagnetic radiation and human health: A review of sources and effects. *High Frequency Electronics*, 4(3), 16–26.
19. Panagopoulos DJ, Yakymenko I, De Iuliis GN, et al. (2025). A comprehensive mechanism of biological and health effects of anthropogenic extremely low frequency and wireless communication electromagnetic fields. *Frontiers in Public Health*, 13, 1585441. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1585441>.

20. Li W, Liu W, Wang W, et al. (2021). Sinusoidal electromagnetic fields accelerate bone regeneration by boosting the multifunctionality of bone marrow mesenchymal stem cells. *Stem Cell Research & Therapy*, 12(1), 234. <https://doi.org/10.1186/s13287-021-02302-z>.
21. Nelson I. (2025). Exploring the influence of Schumann resonance and electromagnetic fields on bioelectricity and human health. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 44(3), 348–358. <https://doi.org/10.1080/15368378.2025.2508466>.
22. Rosen AD. (2003). Mechanism of action of moderate-intensity static magnetic fields on biological systems. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 39(2), 163–173.
23. Lisi A., Pozzi D, Pasquali E, et al. (2000). Three-dimensional (3D) analysis of the morphological changes induced by 50 Hz magnetic field exposure on human lymphoblastoid cells (Raji). *Bioelectromagnetics*, 21(1), 46–51.
24. Belova NA, Lednev VV. (2000). Dependence of gravitotropic reaction in segments of flax stems on frequency and amplitude of variable components of a weak combined magnetic field. *Biofizika*, 45(6), 1108–1111.
25. Jenrow KA, Smith CH, Liboff AR. (1995). Weak extremely-low-frequency magnetic fields and regeneration in the planarian *Dugesia tigrina*. *Bioelectromagnetics*, 16(2), 106–112.
26. Krylov VV, Osipova EA. (2023). Molecular biological effects of weak low-frequency magnetic fields: Frequency–amplitude efficiency windows and possible mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 10989. <https://doi.org/10.3390/ijms241310989>.
27. Özkan N. (2015). Manyetik alan tedavisi (Magnetoterapi). *Bilimsel Tamamlayıcı Tıp, Regülasyon ve Nöral Terapi Dergisi*, 9(3), 17–22.
28. Markov MS. (2007). Magnetic field therapy: A review. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/15368370600925342>.
29. Mert T. (2017). Pulsed magnetic field treatment as antineuropathic pain therapy. *Reviews in the Neurosciences*, 28(7), 751–758. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2017-0003>.
30. Yu S, Shang P. (2014). A review of bioeffects of static magnetic field on rodent models. *Progress in biophysics and molecular biology*, 114(1), 14–24.
31. Mert T, Metin TO, Sahin E, et al. (2021). Neuroprotective and anti-neuropathic actions of pulsed magnetic fields with low frequencies in rats with chronic peripheral neuropathic pain. *Brain Research Bulletin*, 177, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2021.10.012>.
32. Mert T, Sahin M, Sahin E, et al. (2020). Magnetic field exposure modulates the anti-inflammatory efficiency of minocycline in rats with peripheral acute inflammation. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 26(6), 18–28.
33. Mert T, Sahin E, Yaman S, et al. (2022). Pulsed magnetic field treatment ameliorates the progression of peripheral neuropathy by modulating neuronal oxidative stress, apoptosis, and angiogenesis in a rat model of experimental diabetes. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 128(6), 1658–1665. <https://doi.org/10.1080/13813455.2020.1788098>.
34. Mert T, Yaman S. (2020). Pro-inflammatory or anti-inflammatory effects of pulsed magnetic field treatments in rats with experimental acute inflammation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(25), 31543–31554. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09401-z>.
35. Wang X, Wang X, Zhao C, et al. (2025). Enhancement of cognitive behavior and hippocampal neural oscillations by rhythmic unipolar pulsed magnetic stimulation in 5xFAD Alzheimer's disease mice. *Behavioural Brain Research*, 500, 115995. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2025.115995>.
36. Patricio P, Tittley J, de Oliveira FCL, et al. (2026). Repetitive transcranial magnetic stimulation and motor control exercise for chronic low back pain: The ExTraStim randomized placebo-controlled trial. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 56(1), 1–10. <https://doi.org/10.2519/jospt.2025.13681>.
37. Fan Y, Ji X, Zhang L, et al. (2021). The analgesic effects of static magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 42(2), 115–127. <https://doi.org/10.1002/bem.22323>.

38. Weintraub MI, Wolfe G, Barohn RA, et al. (2003). Static magnetic field therapy for symptomatic diabetic neuropathy: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 84, 736–746.
39. Vallbona C, Hazlewood CF, Jurida G. (1997). Response of pain to static magnetic fields in postpolio patients: A double-blind pilot study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78, 1200–1203.
40. Brown CS, Ling FW, Wan JY, et al. (2002). Efficacy of static magnetic field therapy in chronic pelvic pain: A double-blind pilot study. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 187, 1581–1587.
41. Hinman RM, Ford J, Heyl H. (2002). Effects of static magnets on chronic knee pain and physical function: A double-blind study. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 8, 50–55.
42. Gao YG, Tan YZ, Chen H, et al. (1993). Clinical observation of 1128 cases of enteric spastic abdominal pain treated by magnetic field therapy. *Journal of Clinical Pediatrics*, 18, 140–141.
43. Dou JL. (2016). *The observation of effect for distal radial fractures by magnet therapy cooperating with pyritum pills* Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin, China. Erişim adresi: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201701&filename=1016324210.nh>
44. László JF, János F, Farkas P, et al. (2012). Effect of local exposure to inhomogeneous static magnetic field on stomatological pain sensation: A double-blind, randomized, placebo-controlled study. *International Journal of Radiation Biology*, 88, 430–438.
45. Harlow T, Greaves C, White A, et al. (2004). Randomised controlled trial of magnetic bracelets for relieving pain in osteoarthritis of the hip and knee. *BMJ*, 329, 1450–1454.
46. Luo Y. (2016). *The effect of static high magnetic field on chronic epididymitis* Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou, China. Erişim adresi: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201701&filename=1016276944.nh>
47. Kovács-Bálint Z, Csathó A, László JF, et al. (2011). Exposure to an inhomogeneous static magnetic field increases thermal pain threshold in healthy human volunteers. *Bioelectromagnetics*, 32, 131–139.

BÖLÜM 8

FONKSİYONEL ELEKTRİK STİMÜLASYONU VE BIOFEEDBACK SİSTEMLERİNİN BİYOFİZİKSEL TEMELLERİ

Fulya YÜKÇÜ¹

GİRİŞ

Fonksiyonel elektrik stimülasyonu (FES), periferik sinir ve kas dokusunun düşük düzey elektrik akımlarıyla kontrollü biçimde aktive edilmesine dayanan ve özellikle nörolojik hasar sonrası kaybedilen fonksiyonların yeniden kazandırılmasında kullanılan temel bir nörorehabilitasyon yöntemidir (1). İlk klinik uygulamalar düşük ayak gibi spesifik fonksiyon kayıplarının telafisi üzerine geliştirilmiştir. Günümüzde ise modern FES sistemleri; omurilik yaralanması, inme ve diğer üst motor nöron lezyonlarında yürüme, kavrama, postür ve alt ekstremitte fonksiyonlarının yeniden kazandırılmasına yönelik geniş bir kullanım alanına sahiptir (1,2). FES'in rehabilitasyondaki bu rolü, elektriksel uyarının sinir-kas membranı üzerinde oluşturduğu aksiyon potansiyeli, motor ünite aktivasyonu, tetanik kasılma ve fonksiyonel hareket üretimi gibi temel biyofiziksel mekanizmalara dayanmaktadır. Bu nedenle yöntem, hem klinik uygulamalardaki fonksiyonel kazanımlar hem de sinir-kas sisteminin elektriksel uyarılabilirliğine ilişkin biyofiziksel mekanizmaların anlaşılması açısından nörorehabilitasyonun temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (3).

FES'i tamamlayan bir diğer modern nörorehabilitasyon yaklaşımı ise biofeedback sistemleridir. Biofeedback, kas aktivitesi, eklem hareketi, postür ya da fizyolojik yanıtların sensörler aracılığıyla kaydedilip kullanıcıya gerçek zamanlı geri bildirim olarak sunulması temeline dayanır (4). Bu anlık geri bildirim, bireyin hareketi sırasında ortaya çıkan kas aktivitesi veya postürel sapmaları anında algılamasını sağlayarak hatalı motor paternleri düzeltmesine olanak tanır. Bu süreç, sensörimotor döngülerin etkin biçimde yeniden

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Tıp Fakültesi, Biyofizik AD., fulya.yukcu@ksbu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-3468-2655

Yapay zekâ destekli algoritmalar ile taşınabilir EEG teknolojilerindeki gelişmeler, FES–biofeedback uygulamalarının daha kişiye özel ve gerçek zamanlı olarak uyarlanmasını mümkün kılacaktır. Bu teknolojik ilerlemeler, FES ve biofeedback entegrasyonunun gelecekte nörorehabilitasyon süreçlerinde daha merkezi bir konuma ulaşacağını göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomedical Engineering Online*. 2020;19(1):34. doi:10.1186/s12938-020-00773-4
2. Khan MA, Fares H, Ghayvat H, et al. A systematic review on functional electrical stimulation based rehabilitation systems for upper limb post-stroke recovery. *Frontiers in Neurology*. 2023;14:1272992. doi:10.3389/fneur.2023.1272992
3. Milosevic M, Marquez-Chin C, Masani K, et al. Why brain-controlled neuroprosthetics matter: mechanisms underlying electrical stimulation of muscles and nerves in rehabilitation. *Biomedical Engineering Online*. 2020;19(1):81. doi:10.1186/s12938-020-00824-w.
4. Tosti B, Corrado S, Mancone S, et al. Integrated use of biofeedback and neurofeedback techniques in treating pathological conditions and improving performance: A narrative review. *Frontiers in Neuroscience*. 2024;18:1358481. doi:10.3389/fnins.2024.1358481
5. Bowman T, Gervasoni E, Arienti C, et al. Wearable devices for biofeedback rehabilitation: A systematic review and meta-analysis to design application rules and estimate the effectiveness on balance and gait outcomes in neurological diseases. *Sensors*. 2021;21(10):3444. doi:10.3390/s21103444
6. Campbell KR, Peterka RJ, Fino PC, et al. The effects of augmenting traditional rehabilitation with audio biofeedback in people with persistent imbalance following mild traumatic brain injury. *Frontiers in Neurology*. 2022;13:926691. doi:10.3389/fneur.2022.926691
7. Papachristos A. Functional electrical stimulation in paraplegia. In: Stillman BC, McGinnis PM (eds.). *Topics in Paraplegia*. Rijeka: InTechOpen; 2014. p. 109–126.
8. Catterall WA. Voltage gated sodium and calcium channels: Discovery, structure, function, and pharmacology. *Channels*. 2023;17(1):2281714. doi:10.1080/19336950.2023.2281714
9. Rodríguez Cruz PM, Cossins J, Beeson D, Vincent A. The neuromuscular junction in health and disease: Molecular mechanisms governing synaptic formation and homeostasis. *Frontiers in Molecular Neuroscience*. 2020;13:610964. doi:10.3389/fnmol.2020.610964
10. Bennett DL, Clark AJ, Huang J, et al. The role of voltage-gated sodium channels in pain signaling. *Physiological Reviews*. 2019;99(2):1079–1151. doi:10.1152/physrev.00052.2017
11. Feher J. The neuromuscular junction and excitation–contraction coupling. In: *Quantitative Human Physiology*. 2nd ed. Academic Press; 2017. p.318–333. doi:10.1016/b978-0-12-800883-6.00029-x
12. Allard B. From excitation to intracellular Ca^{2+} movements in skeletal muscle: Basic aspects and related clinical disorders. *Neuromuscular Disorders*. 2018;28(5):394–401. doi:10.1016/j.nmd.2018.03.004
13. Chandrasekaran S, Davis J, Bersch I, et al. Electrical stimulation and denervated muscles after spinal cord injury. *Neural Regeneration Research*. 2020;15(8):1397–1407. doi:10.4103/1673-5374.274326
14. Kern H, Carraro U. Home-based functional electrical stimulation for long-term denervated human muscle: History, basics, results and perspectives of the Vienna rehabilitation strategy.

- European Journal of Translational Myology*. 2014;24(1):3296. doi:10.4081/ejtm.2014.3296
15. Tomita A, Kawade S, Moritani T, et al. Novel perspective on contractile properties and intensity-dependent verification of force–frequency relationship during neuromuscular electrical stimulation. *Physiological Reports*. 2020;8(22):e14598. doi:10.14814/phy2.14598
 16. MacIntosh BR, Willis JC. Force–frequency relationship and potentiation in mammalian skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*. 2000;88(6):2088–2096. doi:10.1152/jappl.2000.88.6.2088
 17. Zhou X, Knisley SB, Smith WM, et al. Spatial changes in transmembrane potential during extracellular electrical stimulation. *Circulation Research*. 1998;83(10):1003–1014. doi:10.1161/01.res.83.10.1003
 18. Knisley SB, Blitchington TF, Hill BC, et al. Optical measurements of transmembrane potential changes during electric field stimulation of ventricular cells. *Circulation Research*. 1993;72(2):255–270. doi:10.1161/01.RES.72.2.255
 19. Howell B, Medina LE, Grill WM, et al. Effects of frequency-dependent membrane capacitance on neural excitability. *Journal of Neural Engineering*. 2015;12(5):056015. doi:10.1088/1741-2560/12/5/056015
 20. Grill WM Jr. Modeling the effects of electric fields on nerve fibers: Influence of tissue electrical properties. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1999;46(8):918–928. doi:10.1109/10.775401
 21. Gielen FL, Cruts HE, Albers BA, et al. Model of electrical conductivity of skeletal muscle based on tissue structure. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 1986;24(1):34–40. doi:10.1007/BF02441603
 22. Bickel CS, Gregory CM, Dean JC. Motor unit recruitment during neuromuscular electrical stimulation: A critical appraisal. *European Journal of Applied Physiology*. 2011;111(10):2399–2407. doi:10.1007/s00421-011-2128-4
 23. Hays MA, Kamali G, Koubeissi MZ, et al. Towards optimizing single pulse electrical stimulation: High current intensity, short pulse width stimulation most effectively elicits evoked potentials. *Brain Stimulation*. 2023;16(3):772–782. doi:10.1016/j.brs.2023.04.023
 24. Biasiucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke. *Nature Communications*. 2018;9:2421. doi:10.1038/s41467-018-04673-z
 25. Milosevic M, Nakanishi T, Sasaki A, et al. Cortical re-organization after traumatic brain injury elicited using functional electrical stimulation therapy: A case report. *Frontiers in Neuroscience*. 2021;15:693861. doi:10.3389/fnins.2021.693861
 26. Albert S, Shadmehr R. The neural feedback response to error as a teaching signal for the motor learning system. *The Journal of Neuroscience*. 2016;36(17):4832–4845. doi:10.1523/JNEUROSCI.0159-16.2016
 27. Remsik AB, van Kan PLE, Gloe S, et al. BCI-FES with multimodal feedback for motor recovery poststroke. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2022;16:725715. doi:10.3389/fnhum.2022.725715
 28. Chou L, Kou M, Lee H, et al. The neural correlates and behavioral impact of peripheral noise electrical stimulation on motor learning. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2025;33(1):1263–1270. doi:10.1109/TNSRE.2025.3555203
 29. Bhattacharyya S, Hayashibe M. Brain–computer interface–functional electrical stimulation: From control to neurofeedback in rehabilitation. In: Kumar B, Majumder S (eds.). *Bioelectronics and Medical Devices*. Oxford: Elsevier; 2019. p. 779–792. doi:10.1016/B978-0-08-102420-1.00037-6
 30. Kronberg G, Rahman A, Sharma M, et al. Direct current stimulation boosts Hebbian plasticity in vitro. *Brain Stimulation*. 2020;13(2):287–301. doi:10.1016/j.brs.2019.10.014
 31. Bjørndal JR, Beck MM, Jespersen L, et al. Hebbian priming of human motor learning. *Nature Communications*. 2024;15:5126. doi:10.1038/s41467-024-49478-5
 32. Lin CW, Chen SH, Cheng SM, et al. Distal electrical stimulation enhances neuromuscular

- reinnervation and satellite cell differentiation for functional recovery. *Stem Cell Research & Therapy*. 2025;16(1):322. doi:10.1186/s13287-025-04459-3
33. Guo Y, Phillips B, Atherton PJ, et al. Molecular and neural adaptations to neuromuscular electrical stimulation: Implications for ageing muscle. *Mechanisms of Ageing and Development*. 2021;193:111402. doi:10.1016/j.mad.2020.111402
34. Giggins OM, Persson UM, Caulfield B. Biofeedback in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2013;10:60. doi:10.1186/1743-0003-10-60.
35. Escamilla-Nunez R, Michelini A, Andrysek J. Biofeedback systems for gait rehabilitation of individuals with lower-limb amputation: A systematic review. *Sensors (Basel)*. 2020;20(6):1628. doi:10.3390/s20061628
36. Safavynia SA, Ting LH. Long-latency muscle activity reflects continuous, delayed sensorimotor feedback of task-level and not joint-level error. *Journal of Neurophysiology*. 2013;110(6):1278–1290. doi:10.1152/jn.00609.2012.
37. Farina D, Cescon C, Merletti R. Influence of anatomical, physical, and detection-system parameters on surface EMG. *Biological Cybernetics*. 2002;86(6):445–456. doi:10.1007/s00422-002-0309-2
38. Babiloni C, Barry R, Başar E, et al. International Federation of Clinical Neurophysiology (IFCN) – EEG research workgroup: Recommendations on frequency and topographic analysis of resting-state EEG rhythms. Part 1: Applications in clinical research studies. *Clinical Neurophysiology*. 2020;131(1):285–307. doi:10.1016/j.clinph.2019.06.234.
39. Islam MK, Rastegarnia A, Yang Z, et al. Methods for artifact detection and removal from scalp EEG: A review. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 2016;46(4–5):287–305. doi:10.1016/j.neucli.2016.07.002
40. Gorjan D, Gramann K, De Pauw K, et al. Removal of movement-induced EEG artifacts: Current state of the art and guidelines. *Journal of Neural Engineering*. 2022;19(1):10.1088/1741-2552/ac542c. doi:10.1088/1741-2552/ac542c
41. Shad E, Molinas M, Ytterdal T. Impedance and noise of passive and active dry EEG electrodes: A review. *IEEE Sensors Journal*. 2020;20:14565–14577. doi:10.1109/jsen.2020.3012394
42. Kappenman E, Luck S. The effects of electrode impedance on data quality and statistical significance in ERP recordings. *Psychophysiology*. 2010;47(5):888–904. doi:10.1111/j.1469-8986.2010.01009.x
43. Yousefi T, Dabbaghian A, Kassiri H. Motion-affected electrode–tissue interface characterization for ambulatory EEG recording. In: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 20–24 July 2020, Montréal, Canada. IEEE; 2020. p. 4479–4482. doi:10.1109/EMBC44109.2020.9176671
44. Bublitz C, Ligthart S. The new regulation of non-medical neurotechnologies in the European Union: overview and reflection. *Journal of Law and the Biosciences*. 2024;11(2):lsae021. doi:10.1093/jlb/lvae021
45. Bretthauer M, Gerke S, Hassan C, et al. The New European Medical Device Regulation: Balancing Innovation and Patient Safety. *Annals of Internal Medicine*. 2023;176(6):844–848. doi:10.7326/M23-0454

BÖLÜM 9

NÖROMODÜLASYON VE İLERİ ELEKTRİKSEL STİMÜLASYON TEKNİKLERİ

Aişe Rumeysa MAZI¹

GİRİŞ

Nöromodülasyon; sinir sisteminin elektrik, elektromanyetik veya kimyasal uyaranlarla, bölgesel olarak, geçici ya da kalıcı olarak düzenlenmesi, modüle edilmesi anlamına gelir (1). Nöromodülasyon uygulamaları sinir hücrelerinin çalışma biçimini, iletim yollarını ve ağ organizasyonunu etkileyerek fonksiyonel iyileşmeyi destekler.

Modern nöromodülasyon yöntemleri, klasik elektroterapi uygulamalarından (TENS, NMES gibi) farklı olarak yalnızca periferik kas ve sinirleri değil, beyin ve omurilik düzeyindeki devreleri de hedef alır (2). Böylece motor kontrol, denge, postür, yürüme, ağrı ve otonomik fonksiyonlar üzerinde hem periferik hem santral düzeyde etkiler oluşturur. Özellikle inme, spinal kord yaralanmaları, periferik sinir lezyonları ve kronik ağrı gibi kompleks klinik tabloların rehabilitasyonunda, nöromodülasyon uygulamaları klasik egzersiz temelli yaklaşımları güçlendiren tamamlayıcı bir araç olarak klinik karar verme sürecine girmiştir (3,4). Bu nedenle fizyoterapistlerin yalnızca bu tekniklerin nasıl uygulandığını değil; aynı zamanda altında yatan mekanizmaları, fizyolojik etkileri ve nöral devre düzeyindeki sonuçlarını anlamaları önemlidir.

Tarihsel olarak bakıldığında nöromodülasyonun kökleri antik dönemlerde elektrikli balıklarla yapılan ağrı tedavilerine kadar uzansa da modern çağ 1960’larda Derin Beyin Stimülasyonu (DBS) ve Spinal Kord Stimülasyonu (SCS) gibi tekniklerin geliştirilmesiyle başlamıştır (5). 1990’ların sonunda transkraniyal manyetik stimülasyonun (TMS) klinik kullanıma girmesi ve 2000’ler itibarıyla transkraniyal doğru akım stimülasyonu (tDCS), alternatif akım stimülasyonu (tACS) ve rastgele gürültü stimülasyonu (tRNS) gibi girişimsel olmayan yöntemlerin yaygınlaşmasıyla nöromodülasyon fizyoterapi ve rehabilitasyon alanında da merkezi bir yer edinmiştir.

¹ Dr., Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Tıp Fakültesi, Biyofizik AD., aiserumeysa.mazi@sbu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-3295-0591

DOI: 10.37609/akya.3998. c3417

temellendirilmiş ve klinik olarak güçlü bir araçtır. Bualanın bilimsel temellerinin anlaşılması ve klinik pratikle entegrasyonu, rehabilitasyonun etkinliğini ve bireyselleştirilmiş tedavi anlayışını derinlemesine güçlendirecektir.

KAYNAKLAR

1. Krishna V, Fasano A. Neuromodulation: Update on current practice and future developments. *Neurotherapeutics*. 2024;21(3): e00371. <https://doi.org/10.1016/j.neurot.2024.e00371>.
2. Bologna M, Merola A, Ricciardi L, [eds]. *Innovative Technologies and Clinical Applications for Invasive and Non-Invasive Neuromodulation: From the Workbench to the Bedside*. Frontiers Media SA; 2020. <https://doi.org/10.3389/978-2-88963-469-9>. [Accessed 16th November 2025].
3. Sarica C, Conner CR, Yamamoto K, Yang A, Germann J, Lannon MM, et al. Trends and disparities in deep brain stimulation utilization in the United States: a Nationwide Inpatient Sample analysis from 1993 to 2017. *The Lancet Regional Health - Americas*. 2023;26: 100599. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2023.100599>.
4. Larrivee D, Mansoor Rayegani S, [eds]. *Neurostimulation and Neuromodulation in Contemporary Therapeutic Practice*. IntechOpen; 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77890>. [Accessed 16th November 2025].
5. Krames ES. *Neuromodulation*. Burlington: Elsevier Science & Technology; 2009.
6. Dudel J, Thurm U, Markl H, Zwicker E, Manley G, Neuweiler G, et al. Neurobiophysics. In: Hoppe W, Lohmann W, Markl H, Ziegler H (eds) *Biophysics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1983. p. 641–787. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68877-5_15. [Accessed 9th December 2025].
7. Fisher KA, Stoeckenius W, Sackmann E, Neumcke B, Weisenseel MH, Fromter E, et al. Membranes. In: Hoppe W, Lohmann W, Markl H, Ziegler H (eds) *Biophysics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1983. p. 413–514. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68877-5_12. [Accessed 9th December 2025].
8. Enderle JD. Bioelectric Phenomena. In: *Introduction to Biomedical Engineering*. Elsevier; 2012. p. 747–815. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374979-6.00012-5>. [Accessed 9th December 2025].
9. Akhtari M, Bryant HC, Mamelak AN, Flynn ER, Heller L, Shih JJ, et al. Conductivities of Three-Layer Live Human Skull. *Brain Topography*. 2002;14(3): 151–167. <https://doi.org/10.1023/A:1014590923185>.
10. Miranda PC, Lomarev M, Hallett M. Modeling the current distribution during transcranial direct current stimulation. *Clinical Neurophysiology*. 2006;117(7): 1623–1629. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.04.009>.
11. Tuch DS, Wedeen VJ, Dale AM, George JS, Belliveau JW. Conductivity tensor mapping of the human brain using diffusion tensor MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2001;98(20): 11697–11701. <https://doi.org/10.1073/pnas.171473898>.
12. Ruffini G, Wendling F, Merlet I, Molaee-Ardekani B, Mekonnen A, Salvador R, et al. Transcranial Current Brain Stimulation (tCS): Models and Technologies. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2013;21(3): 333–345. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2012.2200046>.
13. McIntyre CC, Grill WM, Sherman DL, Thakor NV. Cellular Effects of Deep Brain Stimulation: Model-Based Analysis of Activation and Inhibition. *Journal of Neurophysiology*. 2004;91(4): 1457–1469. <https://doi.org/10.1152/jn.00989.2003>.
14. McIntyre CC, Richardson AG, Grill WM. Modeling the Excitability of Mammalian Nerve Fibers: Influence of Afterpotentials on the Recovery Cycle. *Journal of Neurophysiology*.

- 2002;87(2): 995–1006. <https://doi.org/10.1152/jn.00353.2001>.
15. Hutcheon B, Yarom Y. Resonance, oscillation and the intrinsic frequency preferences of neurons. *Trends in Neurosciences*. 2000;23(5): 216–222. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01547-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01547-2).
16. Doelling KB, Assaneo MF. Neural oscillations are a start toward understanding brain activity rather than the end. *PLOS Biology*. 2021;19(5): e3001234. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001234>.
17. Riddle J, Frohlich F. Targeting neural oscillations with transcranial alternating current stimulation. *Brain Research*. 2021;1765: 147491. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2021.147491>.
18. Chail A, Saini R, Bhat P, Srivastava K, Chauhan V. Transcranial magnetic stimulation: A review of its evolution and current applications. *Industrial Psychiatry Journal*. 2018;27(2): 172. https://doi.org/10.4103/ipj.ipj_88_18.
19. Ali MM, Sellers KK, Frohlich F. Transcranial Alternating Current Stimulation Modulates Large-Scale Cortical Network Activity by Network Resonance. *Journal of Neuroscience*. 2013;33(27): 11262–11275. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5867-12.2013>.
20. Johnson M. Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation: Mechanisms, Clinical Application and Evidence. *Reviews in Pain*. 2007;1(1): 7–11. <https://doi.org/10.1177/204946370700100103>.
21. Lin CW, Cheng MH, Fan CH, Chen HH, Yeh CK. Focused ultrasound stimulation of infralimbic cortex attenuates reinstatement of methamphetamine-induced conditioned place preference in rats. *Neurotherapeutics*. 2024;21(3): e00328. <https://doi.org/10.1016/j.neurot.2024.e00328>.
22. Reato D, Rahman A, Bikson M, Parra LC. Low-Intensity Electrical Stimulation Affects Network Dynamics by Modulating Population Rate and Spike Timing. *The Journal of Neuroscience*. 2010;30(45): 15067–15079. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2059-10.2010>.
23. Deng ZD, Lisanby SH, Peterchev AV. Electric field depth–focality tradeoff in transcranial magnetic stimulation: Simulation comparison of 50 coil designs. *Brain Stimulation*. 2013;6(1): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.02.005>.
24. Kamimura HAS, Conti A, Toschi N, Konofagou EE. Ultrasound Neuromodulation: Mechanisms and the Potential of Multimodal Stimulation for Neuronal Function Assessment. *Frontiers in Physics*. 2020;8: 150. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00150>.
25. Cogan SF. Neural Stimulation and Recording Electrodes. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2008;10(1): 275–309. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160518>.
26. DaSilva AF, Volz MS, Bikson M, Fregni F. Electrode Positioning and Montage in Transcranial Direct Current Stimulation. *Journal of Visualized Experiments*. 2011;(51): 2744. <https://doi.org/10.3791/2744>.
27. Reato D, Rahman A, Bikson M, Parra LC. Effects of weak transcranial alternating current stimulation on brain activity—a review of known mechanisms from animal studies. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013;7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00687>.
28. Stagg CJ, Nitsche MA. Physiological Basis of Transcranial Direct Current Stimulation. *The Neuroscientist*. 2011;17(1): 37–53. <https://doi.org/10.1177/1073858410386614>.
29. Bunai T, Hirose T, Kikuchi M, Fukai M, Yokokura M, Ito S, et al. tDCS-induced modulation of GABA concentration and dopamine release in the human brain: A combination study of magnetic resonance spectroscopy and positron emission tomography. *Brain Stimulation*. 2021;14(1): 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.12.010>.
30. Abbott LF, Nelson SB. Synaptic plasticity: taming the beast. *Nature Neuroscience*. 2000;3(S11): 1178–1183. <https://doi.org/10.1038/81453>.
31. Sluka KA, Walsh D. Transcutaneous electrical nerve stimulation: Basic science mechanisms and clinical effectiveness. *The Journal of Pain*. 2003;4(3): 109–121. <https://doi.org/10.1054/jpai.2003.434>.
32. Kansal A, Copley S, Duarte RV, Warren FC, Taylor RS, Eldabe S. Systematic Review to Identify Patient-Level Predictors of Treatment Response to Spinal Cord Stimulation for Neuropathic Pain for Studies Published From 2012 to 2024. *Neuromodulation: Technology at the Neural*

- Interface*. 2025;28(6): 890–902. <https://doi.org/10.1016/j.neurom.2025.04.004>.
33. Chen SH, Lin YW, Tseng WL, Lin WT, Lin SC, Hsueh YY. Ultrahigh frequency transcutaneous electrical nerve stimulation for neuropathic pain alleviation and neuromodulation. *Neurotherapeutics*. 2024;21(3): e00336. <https://doi.org/10.1016/j.neurot.2024.e00336>.
34. Gouveia FV, Warsi NM, Suresh H, Matin R, Ibrahim GM. Neurostimulation treatments for epilepsy: Deep brain stimulation, responsive neurostimulation and vagus nerve stimulation. *Neurotherapeutics*. 2024;21(3): e00308. <https://doi.org/10.1016/j.neurot.2023.e00308>.
35. Liu FJ, Wu J, Gong LJ, Yang HS, Chen H. Non-invasive vagus nerve stimulation in anti-inflammatory therapy: mechanistic insights and future perspectives. *Frontiers in Neuroscience*. 2024;18: 1490300. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1490300>.
36. Du J, Luo S, Shi P. A Wearable EMG-Driven Closed-Loop TENS Platform for Real-Time, Personalized Pain Modulation. *Sensors*. 2025;25(16): 5113. <https://doi.org/10.3390/s25165113>.
37. Li C, Chen Y, Tu S, Lin J, Lin Y, Xu S, et al. Dual-tDCS combined with sensorimotor training promotes upper limb function in subacute stroke patients: A randomized, double-blinded, sham-controlled study. *CNS Neuroscience & Therapeutics*. 2024;30(4): e14530. <https://doi.org/10.1111/cns.14530>.
38. Khan MA, Fares H, Ghayvat H, Brunner IC, Puthusserypady S, Razavi B, et al. A systematic review on functional electrical stimulation based rehabilitation systems for upper limb post-stroke recovery. *Frontiers in Neurology*. 2023;14: 1272992. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1272992>.
39. Meng J, Yan Z, Gu F, Tao X, Xue T, Liu D, et al. Transcranial direct current stimulation with virtual reality versus virtual reality alone for upper extremity rehabilitation in stroke: A meta-analysis. *Heliyon*. 2023;9(1): e12695. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12695>.
40. Guo B, Zhang M, Hao W, Wang Y, Zhang T, Liu C. Neuroinflammation mechanisms of neuromodulation therapies for anxiety and depression. *Translational Psychiatry*. 2023;13(1): 5. <https://doi.org/10.1038/s41398-022-02297-y>.
41. Sharbafshaaer M, Cirillo G, Esposito F, Tedeschi G, Trojsi F. Harnessing Brain Plasticity: The Therapeutic Power of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) and Theta Burst Stimulation (TBS) in Neurotransmitter Modulation, Receptor Dynamics, and Neuroimaging for Neurological Innovations. *Biomedicines*. 2024;12(11): 2506. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12112506>.
42. Tang AD, Bennett W, Bindoff AD, Bolland S, Collins J, Langley RC, et al. Subthreshold repetitive transcranial magnetic stimulation drives structural synaptic plasticity in the young and aged motor cortex. *Brain Stimulation*. 2021;14(6): 1498–1507. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.10.001>.
43. Mitew S, Gobius I, Fenlon LR, McDougall SJ, Hawkes D, Xing YL, et al. Pharmacogenetic stimulation of neuronal activity increases myelination in an axon-specific manner. *Nature Communications*. 2018;9(1): 306. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02719-2>.
44. Chen Y, Mao L, Zhou Q, Bai D, Kong Y. Role of BDNF-TrkB signaling in the improvement of motor function and neuroplasticity after ischemic stroke in rats by transcranial direct current stimulation. *Brain Research Bulletin*. 2025;220: 111164. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2024.111164>.
45. Zheng K, Guo L, Liang W, Liu P. Comparison of the effects of transcranial direct current stimulation combined with different rehabilitation interventions on motor function in people suffering from stroke-related symptoms: a systematic review and network meta-analysis. *Frontiers in Neurology*. 2025;16: 1586685. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1586685>.
46. Choudhury S, Sarkar S, Mukherjee D, Das K, Chakraborty A, Roy S, et al. Cortical Excitability and Heart Rate Variability in Response to Short Duration Transauricular Vagus Nerve Stimulation in Healthy Adults. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*. 2025;28(8): 1408–1417. <https://doi.org/10.1016/j.neurom.2025.07.011>.

47. Davidson B, Bhattacharya A, Sarica C, Darmani G, Raies N, Chen R, et al. Neuromodulation techniques – From non-invasive brain stimulation to deep brain stimulation. *Neurotherapeutics*. 2024;21(3): e00330. <https://doi.org/10.1016/j.neurot.2024.e00330>.
48. Van Hoornweder S, Vanderzande L, Bloemers E, Verstraelen S, Depestele S, Cuypers K, et al. The effects of transcranial direct current stimulation on upper-limb function post-stroke: A meta-analysis of multiple-session studies. *Clinical Neurophysiology*. 2021;132(8): 1897–1918. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2021.05.015>.
49. Cai H, Hu J, Zhao C, Lin J. Wearable devices in neurological disorders: a narrative review of status quo and perspectives. *Annals of Translational Medicine*. 2025;13(4): 46–46. <https://doi.org/10.21037/atm-25-46>.
50. Dannhauer M, Gomez LJ, Robins PL, Wang D, Hasan NI, Thielscher A, et al. Electric Field Modeling in Personalizing Transcranial Magnetic Stimulation Interventions. *Biological Psychiatry*. 2024;95(6): 494–501. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2023.11.022>.
51. Acharyya P, Daley KW, Choi JW, Wilkins KB, Karjagi S, Cui C, et al. Closing the loop in DBS: A data-driven approach. *Parkinsonism & Related Disorders*. 2025;134: 107348. <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2025.107348>.

LAZER VE IŞIK TERAPİLERİN BİYOFİZİKSEL MEKANİZMALARI

Simge ÜNAY¹

1. GİRİŞ

Işık temelli tedaviler, modern fizik tedavi ve rehabilitasyon uygulamalarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Elektromanyetik spektrumun farklı bölgeleri—ultraviyole (UV), görünür ışık, yakın kızılötesi (NIR) ve uzak kızılötesi (FIR)—biyolojik dokular üzerinde özgün etkiler oluşturur. Enerji düzeyi, dalga boyu, penetrasyon derinliği ve hedef kromoforların farklılığı, her ışık modalitesinin terapötik profilini belirleyen temel unsurlardır. UV, görünür ve IR bölgeleri iyonlaştırıcı olmayan radyasyon sınıfındadır ve bu nedenle kontrollü kullanıldıklarında güvenli bir biyolojik etkileşim sunarlar. UV ışık epidemis düzeyinde sınırlı penetrasyon gösterir ve özellikle immün modülasyon, inflamasyonun düzenlenmesi ve belirli dermatolojik hastalıkların tedavisi için kullanılır. Fotokimyasının temelinde DNA, protein ve membran bileşenlerinin ışık tarafından uyarılması yer alır. Görünür ışık, dokuya orta dereceli penetrasyon sağlayarak fotobiyomodülasyon amacıyla kullanılabilir. Dalga boyuna bağlı olarak sitokrom c oksidaz gibi mitokondriyal kromoforları uyarır, oksidatif dengeyi düzenler ve hücrel iyileşmeyi destekler. Kırmızı ve yeşil spektrum özellikle doku onarımı, ağrı kontrolü ve mikrosirkülasyon modülasyonu için araştırılmaktadır. Yakın kızılötesi (NIR), daha derin dokulara ulaşabilme kapasitesiyle fizik tedavi uygulamalarında en yoğun kullanılan bölümdür. NIR fotonları, dokulardaki su ve proteinlerin absorpsiyon özelliklerine bağlı olarak hem termal hem de non-termal biyolojik etkiler oluşturabilir. Düşük seviyeli lazer tedavisi ve LED temelli fotobiyomodülasyon, NIR spektrumunun klinik kullanımına örnek teşkil eder. Uzak kızılötesi (FIR) ise enerji transferini daha çok termal yollarla gerçekleştirir ve doku sıcaklığını kontrollü şekilde artırarak vazodilatasyon, kas gevşemesi ve metabolik aktivitede artış gibi etkiler yaratır. Saunalardan FIR emiterlerine kadar birçok

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Uşak Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik AD., simge.unay@usak.edu.tr

ORCID: 0000-0002-5582-5574,

DOI: 10.37609/akya.3998. c3418

termal rezonans özellikleri ve ultraviyole ışığının fotokimyasal immünomodülatuvar etkileri bu biyofiziksel temelin farklı klinik yansımalarını oluşturmaktadır.

Farklı ışık türlerinin dokuya ulaşma kapasitesi; saçılma, absorbsiyon, yansıma ve iletim gibi temel optik süreçlere bağlı olarak değişmekte ve tedavinin hedeflendiği biyolojik yapıyı belirlemektedir. Bu nedenle dalga boyu seçimi, doz ayarlaması, uygulama süresi ve tedavi sıklığı gibi parametrelerin bilimsel temellere dayandırılması, klinik etkinliğin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Güncel literatürde, ışık temelli tedavilerin kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarından kronik yaralara, nöropatik ağrıdan dermatolojik hastalıklara kadar geniş bir alanda güvenli, non-invaziv ve tamamlayıcı bir yaklaşım sunduğu ortaya konmaktadır. Bu tedaviler, hücresel iyileşmenin hızlanması, inflamasyonun düzenlenmesi, mikrosirkülasyonun artırılması ve immün yanıtın modülasyonu gibi çok katmanlı biyolojik süreçlere etki ederek rehabilitasyon pratiğinde giderek daha önemli bir yer edinmektedir.

Sonuç olarak, ışık temelli terapiler modern fizik tedavi ve rehabilitasyonun bilimsel açıdan güçlü bir bileşeni haline gelmiştir. Biyofiziksel mekanizmaların daha derin anlaşılması, dalga boyu-temelli hedefe yönelik tedavi stratejilerinin geliştirilmesi ve ileri teknolojilerle desteklenen fotonik uygulamaların yaygınlaşması, gelecekte bu modalitelerin klinik değerini daha da artıracaktır.

KAYNAKLAR

1. Barnett SM, Jeffers J. The quantum theory of light. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*. 2024;382(2287): 20230349. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2023.0349>.
2. Niemz MH. Laser-Tissue Interactions: Fundamentals and Applications, Fourth Edition. *Laser-Tissue Interactions: Fundamentals and Applications, Fourth Edition*. 2019; 1–313. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11917-1/COVER>.
3. Jacques SL. Optical properties of biological tissues: a review. *Physics in medicine and biology*. 2013;58(11). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/11/R37>.
4. Sinha U, Behera SR, Layal M. Photon sources and their applications in quantum science and technologies. *Progress in Optics*. 2023;68: 1–65. <https://doi.org/10.1016/BS.PO.2023.01.002>.
5. Singer S, Berneburg M. Phototherapy. *Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft = Journal of the German Society of Dermatology : JDDG*. 2018;16(9): 1120–1131. <https://doi.org/10.1111/DDG.13646>.
6. Tuchin V V. Tissue Optics and Photonics: Light-Tissue Interaction. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2015;1(2): 98–134. <https://jbpe.ssau.ru/index.php/JBPE/article/view/2469>
7. Garssen J, Van Loveren H. Effects of Ultraviolet Exposure on the Immune System. *Critical Reviews & Trade in Immunology*. 2001;21(4): 359–397. <https://doi.org/10.1615/CRITREVIMMUNOL.V21.I4.40>.
8. Garza ZCF, Born M, Hilbers PAJ, van Riel NAW, Liebmann J. Visible Blue Light Therapy: Molecular Mechanisms and Therapeutic Opportunities. *Current medicinal chemistry*. 2018;25(40): 5564–5577. <https://doi.org/10.2174/0929867324666170727112206>.

9. Austin E, Geisler AN, Nguyen J, Kohli I, Hamzavi I, Lim HW, et al. Visible light. Part I: Properties and cutaneous effects of visible light. *Journal of the American Academy of Dermatology*. 2021;84(5): 1219–1231. <https://doi.org/10.1016/J.JAAD.2021.02.048>.
10. Dompe C, Moncrieff L, Matys J, Grzech-Leśniak K, Kocherova I, Bryja A, et al. Photobiomodulation—Underlying Mechanism and Clinical Applications. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(6): 1724. <https://doi.org/10.3390/JCM9061724>.
11. Hamblin MR. Mechanisms and Mitochondrial Redox Signaling in Photobiomodulation. *Photochemistry and photobiology*. 2018;94(2): 199–212. <https://doi.org/10.1111/PHP.12864>.
12. De Freitas LF, Hamblin MR. Proposed Mechanisms of Photobiomodulation or Low-Level Light Therapy. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2016;22(3): 348–364. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2561201>.
13. Su CT, Wu JH. Photobiomodulation in biological tissues: Light penetration, dosimetry, and potential applications. *Optics and Lasers in Engineering*. 2025;186: 108852. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASENG.2025.108852>.
14. Tsai SR, Hamblin MR. Biological effects and medical applications of infrared radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2017;170: 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.04.014>.
15. Vatansever F, Hamblin MR. Far infrared radiation (FIR): Its biological effects and medical applications. *Photonics and Lasers in Medicine*. 2012;1(4): 255–266. <https://doi.org/10.1515/plm-2012-0034>.
16. Barolet D, Christiaens F, Hamblin MR. Infrared and skin: Friend or foe. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2016;155: 78–85. <https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOBIO.2015.12.014>.
17. Ozaki Y. Infrared Spectroscopy—Mid-infrared, Near-infrared, and Far-infrared/Terahertz Spectroscopy. *Analytical Sciences*. 2021;37(9): 1193–1212. <https://doi.org/10.2116/analsci.20R008>.
18. Cho DH, Lee HJ, Lee JY, Park JH, Jo I. Far-infrared irradiation inhibits breast cancer cell proliferation independently of DNA damage through increased nuclear Ca²⁺/calmodulin binding modulated-activation of checkpoint kinase 2. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;219: 112188. <https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOBIO.2021.112188>.
19. Vatansever F, Hamblin MR. Far infrared radiation (FIR): Its biological effects and medical applications. *Photonics and Lasers in Medicine*. 2012;1(4): 255–266. <https://doi.org/10.1515/PLM-2012-0034/XML>.
20. Totonchy MB, Chiu MW. UV-based therapy. *Dermatologic clinics*. 2014;32(3): 399–413. <https://doi.org/10.1016/J.DET.2014.03.003>.
21. Kurz B, Ivanova I, Bäuml W, Berneburg M. Turn the light on photosensitivity. *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 2021;8: 100071. <https://doi.org/10.1016/J.JPAP.2021.100071>.
22. Schneider LA, Hinrichs R, Scharffetter-Kochanek K. Phototherapy and photochemotherapy. *Clinics in Dermatology*. 2008;26(5): 464–476. <https://doi.org/10.1016/J.CLINDERMATOL.2007.11.004>.
23. Janusz SC, Schwartz RA. Botanical Briefs: Phytophotodermatitis Is an Occupational and Recreational Dermatoses in the Limelight. *Cutis*. 2021;107(4): 187–189. <https://doi.org/10.12788/CUTIS.0225>.
24. Zanolli M. Phototherapy treatment of psoriasis today. *Journal of the American Academy of Dermatology*. 2003;49(2 A): 78–86. [https://doi.org/10.1016/s0190-9622\(03\)01139-3](https://doi.org/10.1016/s0190-9622(03)01139-3).
25. von Thaler AK, Kamenisch Y, Berneburg M. The role of ultraviolet radiation in melanomagenesis. *Experimental dermatology*. 2010;19(2): 81–88. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0625.2009.01025.X>.
26. Bäuml W, Regensburger J, Knak A, Felgenträger A, Maisch T. UVA and endogenous photosensitizers - The detection of singlet oxygen by its luminescence. *Photochemical*

- and *Photobiological Sciences*. 2012;11(1): 107–117. <https://doi.org/10.1039/C1PP05142C/METRICS>.
27. Vieyra-Garcia PA, Wolf P. A deep dive into UV-based phototherapy: Mechanisms of action and emerging molecular targets in inflammation and cancer. *Pharmacology & therapeutics*. 2021;222. <https://doi.org/10.1016/J.PHARMTHERA.2020.107784>.
28. Richard EG. The Science and (Lost) Art of Psoralen Plus UVA Phototherapy. *Dermatologic Clinics*. 2020;38(1): 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.det.2019.08.002>.
29. Hooper M, Hatch L, Seminario-Vidal L. Photodynamic therapy of mycosis fungoides: A systematic review of case studies. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*. 2021;37(6): 549–552. <https://doi.org/10.1111/PHPP.12698>.
30. Tran D, Kwok YK, Goh CL. A retrospective review of PUVA therapy at the National Skin Centre of Singapore. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*. 2001;17(4): 164–167. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0781.2001.170404.X>.
31. Parrish JA, Jaenicke KF. Action spectrum for phototherapy of psoriasis. *Journal of Investigative Dermatology*. 1981;76(5): 359–362. <https://doi.org/10.1111/1523-1747.ep12520022>.
32. Racz E, Prens EP. Phototherapy and Photochemotherapy for Psoriasis. *Dermatologic Clinics*. 2015;33(1): 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.det.2014.09.007>.
33. Rácz E, Prens EP, Kurek D, Kant M, De Ridder D, Mourits S, et al. Effective treatment of psoriasis with narrow-band UVB phototherapy is linked to suppression of the IFN and Th17 pathways. *The Journal of investigative dermatology*. 2011;131(7): 1547–1558. <https://doi.org/10.1038/JID.2011.53>.
34. Johnson-Huang LM, Suárez-Farías M, Sullivan-Whalen M, Gilleaudeau P, Krueger JG, Lowes MA. Effective narrow-band UVB radiation therapy suppresses the IL-23/IL-17 axis in normalized psoriasis plaques. *The Journal of investigative dermatology*. 2010;130(11): 2654–2663. <https://doi.org/10.1038/JID.2010.166>.
35. Knak A, Regensburger J, Maisch T, Bäuml W. Exposure of vitamins to UVB and UVA radiation generates singlet oxygen. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*. 2014;13(5): 820–829. <https://doi.org/10.1039/C3PP50413A>.
36. Kreutz M, Karrer S, Hoffmann P, Gottfried E, Szeimies RM, Hahn J, et al. Whole-body UVB irradiation during allogeneic hematopoietic cell transplantation is safe and decreases acute graft-versus-host disease. *The Journal of investigative dermatology*. 2012;132(1): 179–187. <https://doi.org/10.1038/JID.2011.255>.
37. Hofer A, Hassan AS, Legat FJ, Kerl H, Wolf P. Optimal weekly frequency of 308-nm excimer laser treatment in vitiligo patients. *The British journal of dermatology*. 2005;152(5): 981–985. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2133.2004.06321.X>.
38. Kurz B, Berneburg M, Bäuml W, Karrer S. Phototherapy: Theory and practice. *JDDG - Journal of the German Society of Dermatology*. 2023;21(8): 882–897. <https://doi.org/10.1111/DDG.15126>;JOURNAL:JOURNAL:14390353;ISSUE:ISSUE:DOI.
39. Anders JJ, Lanzafame RJ, Arany PR. Low-level light/laser therapy versus photobiomodulation therapy. *Photomedicine and laser surgery*. 2015;33(4): 183–184. <https://doi.org/10.1089/PHO.2015.9848>.
40. Panthier F, Berthe L, Traxer O, Abid N, Almeras C, Doizi S. Laser: Definition and technology. *The French Journal of Urology*. 2025;35(10): 102966. <https://doi.org/10.1016/J.FJUROL.2025.102966>.
41. Schmitt HJ, Pothmann R, Banzer W, Hübscher M, Maier M, Kosub M. Physical procedures. *Myofascial Trigger Points: Comprehensive Diagnosis and Treatment*. 2013; 159–170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-4312-3.00020-9>.
42. Musstaf RA, Jenkins DFL, Jha AN. Assessing the impact of low level laser therapy (LLLT) on biological systems: a review. *International journal of radiation biology*. 2019;95(2): 120–143. <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1524944>.

43. Ezzati K, Fekrazad R, Raoufi Z. The Effects of Photobiomodulation Therapy on Post-Surgical Pain. *Journal of lasers in medical sciences*. 2019;10(2): 79–85. <https://doi.org/10.15171/JLMS.2019.13>.
44. Thabet AAEM, Elsodany AM, Battecha KH, Alshehri MA, Refaat B. High-intensity laser therapy versus pulsed electromagnetic field in the treatment of primary dysmenorrhea. *Journal of physical therapy science*. 2017;29(10): 1742–1748. <https://doi.org/10.1589/JPTS.29.1742>.
45. Chen CPC, Suputtitada A, Chen CPC, Suputtitada A. Regenerative and Drug-Free Strategies for Chronic Musculoskeletal Pain: An Evidence-Based Perspective on Shockwave Therapy, High-Intensity Laser Therapy and Ultrasound-Guided Mechanical Needling with Sterile Water Injection. *Biomedicines* 2025, Vol. 13,. 2025;13(11): 2801. <https://doi.org/10.3390/BIOMEDICINES13112801>.
46. Brandl A, Egner C, Reisser U, Lingenfelder C, Schleip R. Influence of high-energy laser therapy to the patellar tendon on its ligamentous microcirculation: An experimental intervention study. *PLOS ONE*. 2023;18(3): e0275883. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0275883>.
47. Hong SE, Hong MK, Kang SR, Young Park B. Effects of neodymium-yttrium-aluminum garnet (Nd:YAG) pulsed high-intensity laser therapy on full thickness wound healing in an experimental animal model. *Journal of cosmetic and laser therapy: official publication of the European Society for Laser Dermatology*. 2016;18(8): 432–437. <https://doi.org/10.1080/14764172.2016.1202421>.
48. Alayat MSM, Alshehri MA, Shousha TM, Abdelgalil AA, Alhasan H, Khayyat OK, et al. The effectiveness of high intensity laser therapy in the management of spinal disorders: A systematic review and meta-analysis. *Journal of back and musculoskeletal rehabilitation*. 2019;32(6): 869–884. <https://doi.org/10.3233/BMR-181341>.
49. Ozlu O, Atilgan E. The effect of high-intensity laser therapy on pain and lower extremity function in patellofemoral pain syndrome: a single-blind randomized controlled trial. *Lasers in Medical Science* 2024 39:1. 2024;39(1): 103-. <https://doi.org/10.1007/S10103-024-04017-Y>.

ULTRASON VE FONOFOREZ MODALİTELERİNİN BİYOFİZİKSEL TEMELLERİ

Hamit YILMAZ¹

1. GİRİŞ

Son dekatlarda hızı bir ivme yakalayan fizyoterapi disiplini, yüz yılı aşkın süredir, insan vücudunda biyolojik süreçlerin restore edilmesi ve fonksiyonel kapasitenin geliştirilmesi amacıyla çeşitli biyofiziksel yöntemleri kullanarak geliştirilen modalitelerden faydalanan köklü bir alandır.

Bu tedavi yöntemleri arasında etkinliğini yüksek frekanslı ses dalgalarından alan *terapötik ultrasonun (TU)*, biyolojik dokularla etkileşiminde gözlenen termal ve non-termal(mekanik) fiziksel etkilerinden dolayı yaygın olarak kabul görmektedir. Her ne kadar ultrasonun diagnostik amaçla kullanılmaya başlanması, tanısal görüntüleme (ultrasonografi) alanında devrim niteliğinde olsa da, 1940’lardan itibaren tedavi edici potansiyeli giderek daha fazla dikkat çekmeye başlamıştır (1).

Bu modalitenin etkinliği, ses dalgalarının biyolojik dokularla etkileşimi esnasında ortaya çıkan penetrasyon, absorpsiyon, yansıma, kırılma, yayılma gibi özgün biyofiziksel etkileşimlere dayanmaktadır (2). Fizyoterapi uygulamalarında derin ısıtıcı bir modalite olarak tanımlanan TU, yüzeiden birkaç santimetre derinliğe kadar penetre olarak doku metabolizmasını, kan akışını ve hücrel geçirgenliği etkilemektedir (3). Bu etkileşim sonucunda, iyileşme sürecinin hızlanması, ağrının modülasyonu ve kolajen içeren dokuların (tendonlar, ligamentler, eklem kapsülü ve fasya vb.) esnekliğinin artırılarak eklem hareket açıklığının fizyolojik sınırlar düzeyine çekilmesi amaçlanmaktadır.

TU’nun farklı bir varyasyonu olarak geliştirilen ve son dekatlarda klinik etkinliği üzerine yapılan çalışmalarla popüleritesi artan *Fonoforez(phonophoresis)* ise, ultrason

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik AD.,
ylmzhamit90@gmail.com, ORCID iD:0000-0002-8324-1891

DOI: 10.37609/akya.3998. c3419

3. LIPUS Uygulamalarının Genişletilmesi

Düşük yoğunluklu kesikli ultrasonun (LIPUS), kemik iyileşmesi dışında, tendon ve ligament gibi yapısal hasarların rejeneratif tedavilerinde biyolojik aktivatör olarak kullanımının daha fazla kanıtla desteklenmesi.

Sonuç olarak, terapötik ultrason ve fonoforez, modern fizik tedavi modalitelerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Ancak başarılı bir tedavi için klinik uygulayıcıların, empirik uygulamadan uzaklaşarak, bu etkili modalitenin altında yatan biyofiziksel prensipleri ve ilgili bilimsel literatürü derinlemesine anlamaları son derece önemlidir.

KAYNAKLAR

1. Miller DL, Smith NB, Bailey MR, et al. Overview of therapeutic ultrasound applications and safety considerations. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2012;31(4):623–634.
2. Tuna H. Tedavi edici ultrasonun etkin kullanımında kalibrasyon çalışmalarının önemi. *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2011;57(2):94–100.
3. Baker KG, Robertson VJ, Duck FA. A review of therapeutic ultrasound: Biophysical effects. *Physical Therapy*. 2001;81(7):1351–1358.
4. Polat BE, Hart D, Langer R, et al. Ultrasound-mediated transdermal drug delivery: Mechanisms, scope, and emerging trends. *Journal of Controlled Release*. 2011;152(3):330–348. doi:10.1016/j.jconrel.2011.01.006
5. Joshi MV, Phansopkar P. Effect of *Zingiber cassumunar Roxb.* phonophoresis versus aqua sonic gel on pain, range of motion, and functional disability in patients with osteoarthritis of knee: A randomized controlled trial. *Cureus*. 2022;14(12):e32510.
6. Yang S, Wang Y, Liang X. Piezoelectric nanomaterials activated by ultrasound in disease treatment. *Pharmaceutics*. 2023;15(5):1352.
7. Ravikumar C, Markevicius V. Development of ultrasound piezoelectric transducer-based measurement of the piezoelectric coefficient and comparison with existing methods. *Processes*. 2023;11(8):2351.
8. İnceoğlu A, Şahin F, Akkaya N, et al. Effects of low-density pulsed ultrasound treatment on transforming growth factor-beta, collagen level, histology, biomechanics, and function in repaired rat tendons. *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2021;67(2):167–174.
9. Mason TJ. Therapeutic ultrasound: An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011;18(4):847–852. doi:10.1016/j.ultsonch.2011.01.004
10. Shi Y, Wu W. Multimodal non-invasive non-pharmacological therapies for chronic pain: Mechanisms and progress. *BMC Medicine*. 2023;21(1):376. doi:10.1186/s12916-023-03076-2
11. Johns LD. Nonthermal effects of therapeutic ultrasound: The frequency resonance hypothesis. *Journal of Athletic Training*. 2002;37(3):293–299.
12. O'Brien WD. Ultrasound-biophysics mechanisms. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2007;93(1–3):212–255.
13. Ortanca B, Armağan O, Bakılan F, et al. A randomized controlled clinical trial comparing the effects of steroid phonophoresis and therapeutic ultrasound in carpal tunnel syndrome. *Archives of Rheumatology*. 2022;37(4):517–526.
14. Saber AA, Saber A. Therapeutic ultrasound: Physiological role, clinical applications and precautions. *Journal of Surgery: Special Issue on Minimally Invasive and Minimal Access Surgery*. 2017;5(1):61–69.

15. Ebrahimi S, Abbasnia K, Motealleh A, et al. Effect of lidocaine phonophoresis on sensory blockade: Pulsed or continuous mode of therapeutic ultrasound? *Physiotherapy*. 2012;98(1):57–63. doi:10.1016/j.physio.2011.01.009
16. Cárdenas-Sandoval RP, Pastrana-Rendón HF, Avila A, et al. Effect of therapeutic ultrasound on the mechanical and biological properties of fibroblasts. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*. 2023;9(2):263–278. doi:10.1007/s40883-022-00281-y
17. Man VH, Truong PM, Li MS, et al. Molecular mechanism of the cell membrane pore formation induced by bubble stable cavitation. *Journal of Physical Chemistry B*. 2019;123(1):71–78.
18. Park D, Won J, Lee G, et al. Sonophoresis with ultrasound-responsive liquid-core nuclei for transdermal drug delivery. *Skin Research and Technology*. 2022;28(2):291–298.
19. Guan H, Wu Y, Wang X, et al. Ultrasound therapy for pain reduction in musculoskeletal disorders: A systematic review and meta-analysis. *Therapeutic Advances in Chronic Disease*. 2024;15:1–10.
20. Marathe D, Bhuvanashree VS, Mehta CH, et al. Low-frequency sonophoresis: A promising strategy for enhanced transdermal delivery. *Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Sciences*. 2024;2024:1247450. doi:10.1155/2024/1247450

YÜKSEK FREKANSLI AKIMLAR

Mehmet ASLAN¹

Yalçın KARABULUT²

GİRİŞ

Yüksek frekanslı akımlar (high frequency currents), osilasyon (titreşim) hızı saniyede 1 milyon veya daha fazla olan alternatif akımlardır (1). Yüksek frekanslı elektromanyetik akımların terapötik amaçla kullanılabileceği fikri ilk kez 1800’lü yıllarda Fransız doktor D’Arsonval tarafından ortaya atılmıştır (2). Nagelschmidt’in kullandığı, “ısıtma” anlamına gelen yunanca kökenli bir kelime olan diatermi terimi ise hedef vücut dokularında ısı oluşturmak için yüksek frekanslı elektromanyetik enerji akımlarının uygulanmasıdır (Tablo 1). Düşük ve orta frekanslı akımların aksine, yüksek frekanslı akımlar sinir ve kas membranında depolarizasyona neden olmadığı için onların uyarıcı değil ısıtıcı amaçla kullanılmasına imkân sağlamaktadır (1, 3). Doku biyofiziğini yoğun biçimde etkileyen hücresel ve moleküler seviyede regülasyon sağlayabilen bu akımların oluşturduğu enerji, joule ısı prensibi perspektifinde dokuda rezistans ile enerjiye dönüşür ve frekansın yüksekliğine bağlı olarak iyonlar hızlı yön değiştiremediğinden ısıl değişikliklere yol açtığı için elektro kimyasal yanık oluşturmazlar (1,2). Bu durum vasküler genişleme, doku metabolizmasında artış oksijenlenme ve bağ dokusu elastisitesinde iyileşme gibi terapötik sonuçlar sağlar (1, 2, 3).

Tablo 1. Yüksek Frekanslı Akımlar

		Dalga boyu	Frekans
1.	Uzun dalga diatermi (U.D.D.)	300 m	1 Mhz
2.	Kısa dalga diatermi (K.D.D.)	30-3 m	10-100 Mhz
3.	Mikrodalga diatermi (Radar)	1 m – 10 cm	300 Mhz

¹ Uzm. Fzt., Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD., mehmetaslan2796@gmail.com, ORCID iD: 0009-0006-3140-099X

² Uzm. Fzt., Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD., y.karabulut_@hotmail.com, ORCID iD: 0009-0000-3656-0489

fasya ve yüzeysel kas gruplarında etkilidir. Kesikli kısa dalga diatermi ise enerji iletiminin döngüsel biçimde yapılması nedeniyle belirgin termal etki oluşturmada akut ve subakut inflamasyon, ödem kontrolü ve biyostimülasyon gerektiren durumlarda avantaj sağlar (17).

Tüm modalitelerde fizyolojik etkiler; metabolik aktivitenin hızlanması, kan akımının artması, ağrı iletim yollarının modülasyonu, kas tonusunun düzenlenmesi ve bağ dokusu elastikiyetinin iyileşmesi gibi mekanizmalar üzerinden ortaya çıkar. Bununla birlikte, uygulama sırasında kontrendikasyonlar dikkatle değerlendirilmez. Enfeksiyon, malignite, gebelik, aktif kanama, duyu bozukluğu, kardiyovasküler instabilite ve metal implant varlığı gibi durumlar uygun olmayan uygulama alanlarını oluşturur.

Genel olarak değerlendirildiğinde diatermi modaliteleri, doğru frekans, doz, süre ve elektrot yerleşimi ile kullanıldığında güvenli, etkili ve rehabilitasyon sürecini destekleyici bir tedavi aracıdır. Klinik hedefler, dokunun derinliği ve patolojinin evresi göz önünde bulundurularak uygun modalite seçildiğinde hem termal hem de nontermal etkilerden optimum düzeyde yararlanmak mümkün olur. Böylece hastaların ağrı düzeyleri azalmakta hareket açıklığı gelişmekte ve fonksiyonel iyileşme süreçleri hızlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Robertson, V. J., Ward, A., Low, J., & Reed, A. (2006). *Electrotherapy Explained: Principles and Practice* 4 edition Butterworth.
2. Scott, S. (1996). Shortwave diathermy. *Clayton's electrotherapy*, 154-178.
3. Watson, T. (2008). Electrical properties of tissues. *Electrotherapy: Evidence Based Practice*. Edinburgh: Churchill Livingstone/Elsevier, 37-52.
4. Al-Mandeel, M. M., & Watson, T. (2008). Pulsed and continuous shortwave therapy. *Electrotherapy: evidence-based practice, 12th ed*. New York: Elsevier, 137-178.
5. Alon, G. (1999). Principles of electrical stimulation. *Clinical electrotherapy*, 109-115.
6. Draper, D. O., Knight, K., Fujiwara, T., & Chris Castel, J. (1999). Temperature change in human muscle during and after pulsed short-wave diathermy. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 29(1), 13-22.
7. Hayne, C. R. (1984). Pulsed high frequency energy—its place in physiotherapy. *Physiotherapy*, 70(12), 459-466.
8. Wilson, D. H. (1974). Comparison of short wave diathermy and pulsed electromagnetic energy in treatment of soft tissue injuries. *Physiotherapy*, 60(10), 309-310.
9. Fox, J., & Sharp, T. (2007). *Practical electrotherapy: a guide to safe application*. Elsevier Health Sciences.
10. Şimşek, N. (2003). Elektroterapi ders notları. Ankara: Başkent Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Bölümü Yayınları. Ankara.
11. Shah, S. G. S., & Farrow, A. (2013). Assessment of physiotherapists' occupational exposure to radiofrequency electromagnetic fields from shortwave and microwave diathermy devices: a literature review. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 10(6), 312-327.
12. Hawkes, A. R., Draper, D. O., Johnson, A. W., Dieder, M. T., & Rigby, J. H. (2013). Heating capacity of rebound shortwave diathermy and moist hot packs at superficial depths. *Journal of athletic training*, 48(4), 471-476.

13. Chou, R., & Huffman, L. H. (2007). Nonpharmacologic therapies for acute and chronic low back pain: a review of the evidence for an American Pain Society/American College of Physicians clinical practice guideline. *Annals of internal medicine*, 147(7), 492-504.
14. Türk, A. Ç., & Okan, S. (2025). Comparison of the Effectiveness of Short-wave Diathermy and Extracorporeal Shock Wave Therapy in Knee Osteoarthritis: A Quasi-experimental Clinical Study. *Turkish Journal of Osteoporosis*.
15. Pollet, J., Ranica, G., Pedersini, P., Lazzarini, S. G., Pancera, S., & Buraschi, R. (2023). The efficacy of electromagnetic diathermy for the treatment of musculoskeletal disorders: a systematic review with meta-analysis. *Journal of clinical medicine*, 12(12), 3956.
16. Jan, M. H., Chai, H. M., Wang, C. L., Lin, Y. F., & Tsai, L. Y. (2006). Effects of repetitive shortwave diathermy for reducing synovitis in patients with knee osteoarthritis: an ultrasonographic study. *Physical therapy*, 86(2), 236-244.
17. Fukuda, T. Y., Alves da Cunha, R., Fukuda, V. O., Rienzo, F. A., Cazarini Jr, C., Carvalho, N. D. A. A., & Centini, A. A. (2011). Pulsed shortwave treatment in women with knee osteoarthritis: a multicenter, randomized, placebo-controlled clinical trial. *Physical therapy*, 91(7), 1009-1017.
18. Uzun Dalga Diatermi Cihazı ve aksesuarları (08/12/2025 tarihinde <https://www.physiotherapymachines.com/product/delta-longwave-diathermy/> adresinden ulaşılmıştır).
19. Mikrodalga Diatermi Cihazı (08/12/2025 tarihinde http://www.irmedrehabilitasyon.com.tr/fizik_tedavi_cihazlari/mikrodalga.php adresinden ulaşılmıştır).
20. Kısa Dalga Diatermi Cihazı (08/12/2025 tarihinde http://www.irmedrehabilitasyon.com.tr/fizik_tedavi_cihazlari/kisadalga.php adresinden ulaşılmıştır).
21. KDD Kablo Sarım Uygulama (08/12/2025 tarihinde https://www.brainkart.com/article/Diathermy-Units_11885/ adresinden ulaşılmıştır). Yalçın KARABULUT

TRAKSİYONUN BİYOMEKANİK PRENSİPLERİ

Barış TÜRKER ¹

Abdullah SARI ²

GİRİŞ

Traksiyon, Latince tractico (“çekme”) kökünden türetilmiş bir terimdir ve çekme ya da germe uygulamasını ifade eder (1). Klinikte traksiyon, yumuşak dokuları germek, eklem aralıklarını genişletmek veya kırık kemik fragmanlarını birbirinden ayırmak amacıyla vücudun belirli bir bölümüne uygulanan çekme tekniğidir. Omurga kaynaklı rahatsızlıkların yönetiminde traksiyonun kullanımı, yaklaşık 4000 yıl öncesine dayanmaktadır (2). Özellikle 19. yüzyıl itibarıyla sırt ve omurga problemlerinin tedavisinde traksiyon yatakları, korseleri ve sandalyeleri gibi çeşitli cihazların geliştirilmesiyle birlikte bu yöntemin klinik uygulamaları belirgin biçimde artmıştır (3). 20. yüzyılın başlarında kronik bel ağrısı olan bireylerde yaygın olarak kullanılan bir tedavi yaklaşımı haline gelen traksiyon, teknolojik ilerlemeler ve cihaz tasarımlarındaki gelişmelerle birlikte ön plana çıkmıştır (3,4). Özellikle son 50 yılda klinikte daha da yaygın biçimde uygulanmaktadır (5,6).

Literatürde traksiyon, omurgaya aksiyel distraktif bir kuvvetin uygulanması olarak tanımlanmakta ve ağrıya bağlı hareket kısıtlılıklarının yönetiminde harekete dayalı terapötik bir yöntem olarak kullanılmaktadır (7,8).

Traksiyon, birçok ülkede bel ağrısı olan hastalarda yaygın biçimde kabul gören bir tedavi yöntemidir. Günümüzde fizyoterapistler tarafından ek bir tedavi modalitesi olarak sıklıkla uygulanmaktadır (9,10). Traksiyon tedavisi; masaj, egzersiz, elektroterapi ve sıcak uygulamalar gibi diğer yöntemlerle kombine edilerek hastaya özgü bir biçimde planlanabilmektedir (11). Temel hedefi; ağırlıklar, makaralar veya vücut ağırlığı yardımıyla omurgaya çekme kuvveti uygulayarak intervertebral basıncı azaltmak ve ağrıyı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Trabzon Üniversitesi, Tonya Meslek Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü, baristurker@trabzon.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-7045-7573.

² Öğr. Gör., Trabzon Üniversitesi, Tonya Meslek Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü, ADullahsari@trabzon.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-0416-7321.

KAYNAKLAR

1. Saunders, H. D. (1979). Lumbar traction. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 1(1), 36–45.
2. Gay, R. E., & Brault, J. S. (2012). Traction therapy. In *Evidence-based management of low back pain*.
3. Gay, R. E., & Brault, J. S. (2008). Evidence-informed management of chronic low back pain with traction therapy. *The Spine Journal*, 8(1), 234–242.
4. Alrwaily, M., Almutiri, M., & Schneider, M. (2018). Assessment of variability in traction interventions for patients with low back pain: A systematic review. *Chiropractic & Manual Therapies*, 17, 35.
5. Brault, J. S., Kappler, R. E., & Grogg, B. E. (2007). Manipulation, traction and massage. In R. Braddom (Ed.), *Physical medicine and rehabilitation* (pp. 437–457). Philadelphia: Saunders.
6. Sari, H. (2004). Traksiyon. In H. Oğuz (Ed.), *Tibbi rehabilitasyon* (pp. 363–373). İstanbul: Nobel Kitabevleri.
7. Kekosz, V. N., Hilbert, L., & Tepperman, P. S. (1986). Cervical and lumbopelvic traction: To stretch or not to stretch. *Postgraduate Medicine*, 80, 187–194.
8. Grieve, G. P. (1991). *Mobilisation of the spine: A primary handbook of clinical method* (5th ed., pp. 252–283). London: Churchill Livingstone.
9. Harte, A. A., Baxter, G. D., & Gracey, J. H. (2003). The efficacy of traction for back pain: A systematic review of randomized controlled trials. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 84(10), 1542–1553.
10. Madson, T. J., & Hollman, J. H. (2015). Lumbar traction for managing low back pain: A survey of physical therapists in the United States. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 45(8), 586–595.
11. Beurskens, A. J., de Vet, H. C., van der Heijden, G. J., Knipschild, P. G., Köke, A. J., Lindeman, E., & Regtop, W. (1995). Efficacy of traction for non-specific low back pain: A randomised clinical trial. *The Lancet*, 346(8990), 1596–1600.
12. Harte, A. A., Gracey, J. H., & Baxter, G. D. (2005). Current use of lumbar traction in the management of low back pain: Results of a survey of physiotherapists in the United Kingdom. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(6), 1164–1169.
13. van Tulder, M. W., Koes, B., & Malmivaara, A. (2006). Outcome of non-invasive treatment modalities on back pain: An evidence-based review. *European Spine Journal*, 15(Suppl. 1), S64–S81.
14. Hoy, D., Protani, M., de, R., & Buchbinder, R. (2010). The epidemiology of neck pain. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 24(6), 783–792.
15. Choi, J., Lee, S., & Hwangbo, G. (2015). Influences of spinal decompression therapy and general traction therapy on the pain, disability, and straight leg raising of patients with intervertebral disc herniation. *Journal of Physical Therapy Science*, 27(2), 481–483.
16. Saunders, D. H. (1983). Use of spinal traction in the treatment of neck and back conditions. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 179, 31–38.
17. Tesio, L., & Merlo, A. (1993). Autotraction versus passive traction: An open controlled study in lumbar disc herniation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 74(8), 871–876.
18. Kim, J. D., Oh, H. W., Lee, J. H., Cha, J. Y., Ko, I. G., & Jee, Y. S. (2013). The effect of inversion traction on pain sensation, lumbar flexibility and trunk muscles strength in patients with chronic low back pain. *Isokinetics and Exercise Science*, 21(3), 237–246.
19. Che, Y. J., Hou, J. J., Guo, J. B., et al. (2021). Low energy extracorporeal shock wave therapy combined with low tension traction can better reshape the microenvironment in degenerated intervertebral disc regeneration and repair. *The Spine Journal*, 21(1), 160–177.

20. Wieting, J. M., Andary, M. T., Holmes, T. G., Rechten, J. J., & Zimmerman, G. (2005). Manipulation, massage and traction. In *Physical medicine & rehabilitation: Principles and practice* (pp. 285–309). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
21. Cameron, M. (1999). Traction and compression. In M. Cameron (Ed.), *Physical agents in rehabilitation: From research to practice* (pp. 217–271). Philadelphia: W. B. Saunders Company.
22. Hooper, P. D. (1996). Spinal traction. In P. D. Hooper (Ed.), *Physical modalities: A primer for chiropractic* (pp. 209–230). Baltimore: Williams & Wilkins.
23. Akgün, K., Sarı, H., & Tüzün, Ş. (Eds.). (2002). *Hareket sistemi hastalıklarında fiziksel tıp yöntemleri*. İstanbul: Nobel Tıp Kitabevleri.
24. Duyur, B., & Erdem, R. (1999). Traksiyon tedavisi. *Fiziksel Tıp Dergisi*, 2(2), 47–52.
25. Clarke, J., van Tulder, M., Blomberg, S., de Vet, H., van der Heijden, G., & Brønfort, G. (2006). Traction for low back pain with or without sciatica: An updated systematic review within the framework of the Cochrane Collaboration. *Spine*, 31(14), 1591–1599.
26. Clarke, J. A., van Tulder, M. W., Blomberg, S. E., de Vet, H. C., van der Heijden, G. J., Brønfort, G., & Bouter, L. M. (2007). Traction for low-back pain with or without sciatica. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (2).
27. Guzman, J., Esmail, R., Karjalainen, K., Malmivaara, A., Irvin, E., & Bombardier, C. (2002). Multidisciplinary bio-psycho-social rehabilitation for chronic low back pain. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (1), CD000963.
28. Schimmel, J. J., de Kleuver, M., Horsting, P. P., Spruit, M., Jacobs, W. C., & van Limbeek, J. (2009). No effect of traction in patients with low back pain: A single centre, single blind, randomized controlled trial of intervertebral differential dynamics therapy. *European Spine Journal*, 18(12), 1843–1850.
29. Wegner, I., Widyahening, I. S., van Tulder, M. W., Blomberg, S. E., de Vet, H. C., Brønfort, G., Bouter, L. M., & van der Heijden, G. J. (2013). Traction for low-back pain with or without sciatica. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (8), CD003010.
30. Diab, A. A., & Moustafa, I. M. (2013). The efficacy of lumbar extension traction for sagittal alignment in mechanical low back pain: A randomized trial. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 26(2), 213–220.
31. Fritz, J. M., Thackeray, A., Childs, J. D., & Brennan, G. P. (2010). A randomized clinical trial of the effectiveness of mechanical traction for sub-groups of patients with low back pain: Study methods and rationale. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 11, 81.
32. Thackeray, A., Fritz, J. M., Childs, J. D., & Brennan, G. P. (2016). The effectiveness of mechanical traction among subgroups of patients with low back pain and leg pain: A randomized trial. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 46(3), 144–154.
33. Yang, J. D., Tam, K. W., Huang, T. W., Huang, S. W., Liou, T. H., & Chen, H. C. (2017). Intermittent cervical traction for treating neck pain: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Spine*, 42(13), 959–965.
34. Hattori, M., Shirai, Y., & Aoki, T. (2002). Research on the effectiveness of intermittent cervical traction therapy, using short-latency somatosensory evoked potentials. *Journal of Orthopaedic Science*, 7, 208–216.
35. Raney, N. H., Petersen, E. J., Smith, T. A., Cowan, J. E., Rendeiro, D. G., Deyle, G. D., & Childs, J. D. (2009). Development of a clinical prediction rule to identify patients with neck pain likely to benefit from cervical traction and exercise. *European Spine Journal*, 18(3), 382–391.
36. Tanabe, H., Akai, M., Doi, T., Arai, S., Fujino, K., & Hayashi, K. (2021). Immediate effect of mechanical lumbar traction in patients with chronic low back pain: A crossover, repeated measures, randomized controlled trial. *Journal of Orthopaedic Science*, 26(6), 953–961.
37. Tadano, S., Tanabe, H., Arai, S., Fujino, K., Doi, T., & Akai, M. (2019). Lumbar mechanical traction: A biomechanical assessment of change at the lumbar spine. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 20, 1–12.