



Sinir Sistemi Üzerine Radyofrekans Elektromanyetik Radyasyonun Rolü

The Role of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Nervous System

Yasin Karamazı¹

¹Çukurova üniversitesi, Tıp Fakültesi, Biyofizik Anabilim Dalı, Adana, Türkiye

ABSTRACT

Humans are intensively exposed to electromagnetic radiation (EMR) of various frequencies and types, starting from the intrauterine period and continuing in increasing amounts throughout life. Although there is a large body of research on the effects of environmental and low-frequency EMR sources, little is known about the potential effects of long-term and high-frequency EMR sources.

The nervous system, which can respond rapidly to various environmental stimuli, is among the primary targets of EMR. Until the present day, various in vivo, in vitro and epidemiological studies have been conducted using different questionnaires, human-animal models and research techniques to determine the possible effects of radiofrequency-electromagnetic field (RF-EMF) induced stimuli on the nervous system. In particular, it has been reported that exposure to low-frequency and pulsed EMFs can cause significant changes in central and peripheral nervous system nervous cells, including nervous regeneration, conduction disturbance, neuronal membrane voltage and cell apoptosis, myelin and ion channel function. Moreover, it is almost universally recognized that these sources can be a serious source of stress for all living things.

Given the nature of EMR sources and their widespread application, it is of specific importance for the public to fully characterize their effects in relation to exposure situations and the potential for harm. In order to protect the general public, various international and national organizations classify and monitor the optimal limits of radiation.

In this study, we compile and present information on the role of RF-EMRs on the nervous system using human and experimental animal models.

Key words: Radiofrequency, electromagnetic radiation, nervous system, conduction.

ÖZET

İnsanlar intrauterin dönemden itibaren başlayıp ömür boyunca giderek artan miktarda devam eden çeşitli frekans ve tiplerde elektromanyetik radyasyonlara (EMR) yoğun olarak maruz kalmaktadırlar. Her ne kadar çevresel kaynaklı ve düşük frekanslı EMR kaynaklarının etkilerine dair araştırmalar çoğunlukta olsa da uzun süreli ve yüksek frekanslı EMR kaynaklarının yaratabileceği potansiyel etkiler hakkında çok az bilgi bilinmektedir.

Çevresel kaynaklı çeşitli uyarılara hızlı bir şekilde yanıt verebilen sinir sistemi EMR'nin öncelikli hedefleri arasında yerini almaktadır. Günümüze kadar Radyofrekans-Elektromanyetik alan (RF-EMA) kaynaklı uyarıların sinir sistemine olası etkilerini belirleyebilmek amacıyla farklı anketler, insan-hayvan modelleri ve araştırma teknikleri kullanılarak çeşitli in vivo, in vitro ve epidemiyolojik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Özellikle düşük frekanslı ve pulslu tipteki EMA'lara maruz kalmak sinir rejenerasyonu, iletim bozukluğu, nöronal membran voltajı ve hücre apoptozu, miyelin ve iyon kanallarının işlevleri dâhil olmak üzere merkezi ve periferik sinir sistemi sinir hücrelerinde önemli değişikliklere neden olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, bu kaynakların tüm canlılarda ciddi bir stres kaynağı olabileceğinin kanaatine neredeyse varılmış durumdadır.

EMR kaynaklarının doğası gereği ve yaygın uygulama alanları göz önüne alındığında, maruziyet durumlarına ve zarar verme potansiyeline ilişkin etkilerinin tam olarak belirlenmesi kamuoyu için spesifik öneme sahiptir. Genel kitleyi korumak amacıyla bu doğrultuda çeşitli uluslararası ve ulusal kurumlar tarafından radyasyonun en uygun sınırları sınıflandırılmakta ve gözetilmektedir.

Bu çalışmada, insan ve deney hayvan modelleri kullanılarak sinir sistemi üzerine RF-EMR'lerin nasıl rol oynadığına dair bilgiler derlenip sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Radyofrekans, elektromanyetik radyasyon, sinir sistemi, iletim.



Giriş

Sinir sistemi, vücudun çeşitli çevresel faktörlere (ısı, gürültü, radyasyon vs.) karşı yanıt vermek amacıyla iletişim ve koordinasyonu sağlayan kapsamlı bir sistemdir¹. Bu sistem, vücuttaki farklı bölgelerde bulunan hücrelerden bilgi alır, değerlendirir ve uygun yanıt vermek için diğer hücrelere, kaslara ya da organlara çeşitli sinyaller gönderir². Herhangi bir sinirde fonksiyon kaybının sorunsuz olarak giderilebilmesi, rejenerasyonun süreci ve hasarların tamamen iyileşmesi amacı ile günümüze kadar farklı teknikler araştırılmış ve geliştirilmiştir³⁻⁵.

Sinir dokusu çevresel uyaranlara karşı hassas olmakla birlikte stres kaynaklı aksonel ve hücrel deformasyonlara da oldukça duyarlıdır⁶. Herhangi bir sebeple sinirde yaralanma sonucunda, sıklıkla travma, serebrovasküler veya dejeneratif hastalıklar gibi yaygın klinik durumlar ortaya çıkabilmektedir^{7,8}. Eğer sinirdeki yaralanmalar şiddetli bir durumda olursa vücuttaki motor, duyu ve otonom sinir fonksiyonlarında çeşitli bozulmalarla birlikte depresyon gibi psikolojik durumlara neden olan bazı hastalıklarda önemli ölçüde tetiklenerek yaşam kalitesi olumsuz yönde etkilenebilmektedir⁹. Bu durum ani ve etkili bir şekilde tedavi edilmezse, sinirsel işlevsel bozukluk sonucu sakatlık ya da ölüm meydana gelebilmektedir¹⁰.

EMA terimi, hem elektrik ve manyetik alanları hem de >0 Hz ile 300 GHz arasındaki alanları kapsamaktadır¹¹. Genel olarak günlük yaşamın hemen her alanında en yaygın olarak kullanılan RF-EMA (100 kHz–300 GHz) bölgesinde yer alan elektromanyetik radyasyon kaynaklarına; baz istasyonları, endüksiyon ısıtıcıları, radyo ve televizyon yayınları, cep telefonları, mikrodalga fırınlar, 5G telekomünikasyon ağları örnek olarak gösterilebilir¹². Bu kaynaklardan özellikle cep telefonu tipi radyofrekans radyasyonunun (RFR) genellikle baş bölgesine yakın tutulmasından, beyin yayılan EMA'lara daha fazla maruz kalmaktadır. Bu durum EMR'nin merkezi sinir sistemi üzerinde potansiyel olarak olumsuz etkilere neden olabileceği konusunda toplumsal endişelere yol açmaktadır¹³.

Karmaşık yapı ve işlevleri nedeniyle sinir sistemi EMR'lere karşı oldukça hassas bir sistemdir. Farklı tipte ve frekanslarda RF-EMA'ların, insan ve deney hayvan modelleri kullanılarak sinir sistemi üzerine etkisinin değerlendirildiği çok sayıda araştırma mevcuttur. Bu araştırmalarda, EMR'lerin sinir dokularıyla etkileşime girebileceği, sinirsel aktiviteyi, nörotransmitter salınımını ve diğer biyolojik süreçleri potansiyel olarak etkileyebileceği bildirilmektedir¹⁴⁻¹⁶. Bu doğrultudaki çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, başka bir çalışmanın sonucuyla çoğu zaman uyuşmadığı, hatta aynı çalışmada bile bulguların farklı olabileceği görülebilmektedir. Bu durumun ortaya çıkış nedeni, bireysel farklılıklar veya farklı deney koşulları olabilir¹⁷. Bununla birlikte, insan vücudunda var olan doğal EMA dengesinin bozulması sonucunda da hücrelerde yapısal ve işlevsel farklılıklar meydana gelebilmektedir¹⁸. Bu derlemede, sinir sistemi ve radyasyon kaynakları tanımlanarak, sinir dokusu ile herhangi bir tipteki EMR kaynağının etkileşimi sonucunda sinir sisteminin fonksiyon ve işlevlerinde meydana gelebilecek olası değişimlerin özetlenmesi amaçlanmaktadır.

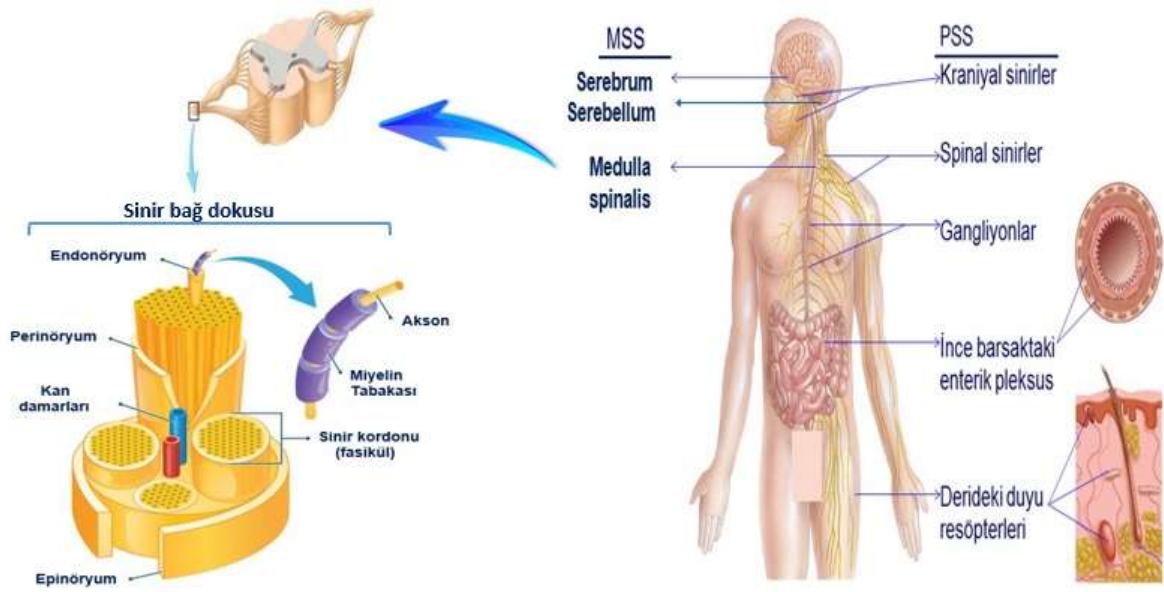
Sinir Sistemi

Sinir sistemi, canlılarda duyu aracılığıyla serebrum (beyin) ve medulla spinaliste (omurilik) toplanan sinyallerin vücudun farklı hedef bölgelerine iletimini sağlayan oldukça karmaşık bir hücre ağı ve organ sistemidir. Hücrel iletimi sayesinde duyu algılama, mental aktivite, entegrasyon ve homeostazis gibi vücudun hayati işlevlerinin koordinasyonunu sağladığı gibi organ, kas ve bezlerin de aktivitelerini düzenler¹.

Sinir sistemi yapısal olarak merkezi sinir sistemi (MSS) ve periferik sinir sistemi (PSS) olmak üzere başlıca iki ana bölüme ayrılır. MSS'nin büyük bir bölümünü serebrum, geriye kalan kısmını ise medulla spinalis oluşturur. MSS'yi oluşturan kısımların dışında kalan diğer tüm sinir bileşenleri ise PSS'yi oluşturur. PSS, temelde sinirler (kraniyal ve spinal) ve gangliyonlar olmak üzere iki farklı yapıdan oluşur¹⁹.

Sinirler, sinir hücresi (nöron) uzantılarını taşıyan (akson) vücudun etrafını sarmış uzun fibrillerden oluşur. Gangliyonlar ise sinir hücresi çekirdeklerinin bulunduğu kısımdır ve sinir lifleri boyunca ilerleyen aksonlarla birlikte PSS'den MSS'ye bilgi aktarmak ya da taşımakla işlev gösterirler²⁰.

İnsana ait sinir sisteminin başlıca yapıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Sinir sisteminin başlıca yapısı.

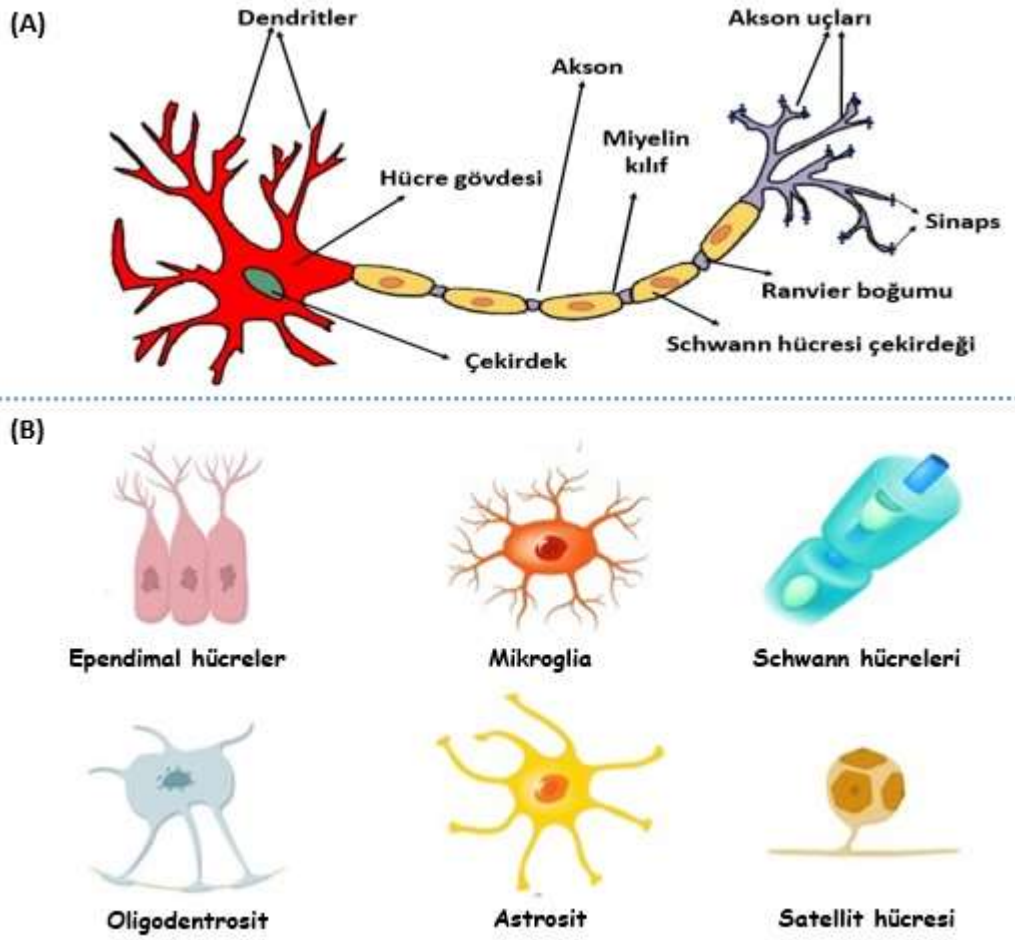
PSS kontrolündeki lifler otonom ve somatik olmak üzere temelde iki bölüme ayrılır. Otonom sinir sistemi vücutta istem dışı gerçekleşen sindirim, solunum, kardiyak output, iç organ fonksiyonlarının kontrolü gibi otomatik visseral fonksiyonları düzenler. Parasempatik ve sempatik sinir sistemleri otonom kategorisinde yer alır²¹.

Sempatik sinir sistemini, torakal ve lumbal vertebraların seviyesinde medulla spinalisi terk eden sinir lifleri oluştururken, parasempatik sistemi ise kranial (3, 7, 9 ve 10.) ve sakral seviyesinde terk eden sinir lifleri oluşturur²¹. Somatik sinir sistemi ise deri, eklem, tendon, duyu organları ve düz kaslar gibi istemli olarak kontrol edilebilen işlevleri düzenler²².

Sinir Dokusunun Hücreleri

Sinir dokusunun hücreleri nöronlar ve nöroglial (glial) olarak iki kategoriye ayrılır. Nöron, sinir sisteminin en temel fonksiyonel bileşendir. Bir nöronun yapısı başlıca soma (hücre gövdesi), akson, dentrit ve terminal uçlardan oluşur (Şekil 2 A). Dentritler çevreden gelen uyarı almak, akson ise bu uyarıları dışarıya iletmekle sorumludur¹⁹. Nöronlar yapılarına göre unipolar, psödounipolar, bipolar ve multipolar olmak üzere dört çeşide ayrılırlar. Nöronların boyutları ve sahip oldukları akson ve dentritlerin sayısı bireyden bireye farklılık gösterir. Bir sinir içerisindeki tipik olarak miyelinli ve miyelinsiz aksonların çapları sırasıyla 2-20 µm ve 0,2-3 µm aralıklarında değişmektedir²³. Bilenen en küçük nöronlar (yaklaşık 2-3 µm çapında) serebellumda stratum granulosum tabakasında bulunan granül hücreleridir. En büyük nöronlar ise (yaklaşık 125 µm çapında) medulla spinalisdeki cornu anteriorda bulunan motor nöronlarıdır²⁴.

Nöroglial hücreler ise elektriksel uyarı üretmeyen, MSS ve PSS'yi destekleyici ancak nöronal olmayan hücrelerdir. Nöroglialler sayıca beyindeki sinir hücrelerinden yaklaşık 3 kat kadar daha fazladırlar²⁵. Bu hücreler yapısında hücre gövdelerine sahip olsa bile, nöronlardan boyutsal olarak daha küçük olup akson ve dendritleri bulunmamaktadır (Şekil 2 B). Bu hücreler esas olarak nöronların çeşitli metabolik işlevleri yerine getirmesinin yanı sıra, sinir sisteminin bakım, onarım, beslenme ve gelişimine destek sağlamak gibi bir dizi işlevlerde rol üstlenirler²⁶. MSS ve PSS'deki nöroglial hücreler birbirinden farklıdır. Farklı tipte nöroglial hücreleri tanımlamak için histolojik ve elektron mikroskopik teknikler ya da immünolojik tekniklerden faydalanılır. Günümüze kadar MSS'de astrositler, oligodentrositler, mikroglia ve ependimal hücreler olmak üzere dört farklı grup nöroglial hücre ayırt edilmiştir²⁷. PSS'de ise schwann hücreleri ve satellit hücreler olmak üzere iki grup nöroglial hücre tanımlanmıştır²⁷.



Şekil 2. Sinir dokusu hücrelerinin yapıları. A) Nöron yapısı, B) Nöroglial hücre yapısı.

Gerek iç gerekse dış ortam kaynaklı farklı tipteki uyarıları alıp elektriksel sinyallere (impuls) dönüştürerek hücre içine taşıyan duyu organlarına reseptör adı verilir. Reseptörler aracılığıyla dönüştürülen sinyaller serebral kortekste algılandıktan sonra sinir sistemi boyunca taşınırlar. Reseptörler bulundukları konuma göre enetroseptör, ekteroseptör ve proprioseptör olarak üç tipe ayrılırken duyarlı oldukları enerjinin formuna bağlı olarak da mekanoreseptörler, kemoreseptör, fotoreseptörler, termoreseptörler ve nosiseptörler olarak farklı tiplere ayrılırlar²⁴.

Sinir Hücrelerinin Temel Özellikleri

Sinir sistemi hücrelerinin uyarılabilme ve uyarıyı iletebilme yetenekleri temel olarak dört ana özellik altında incelenir²⁴.

Uyarılabilme (irritabilite); dentrit ve sinir hücresi gövdesinin uyarana yanıt verebilmesi ve bu yanıtın sinir uyarısına dönüştürülebilmesidir. Somatik ve otonom sinir sistemlerinin nöral iletiminde kolinerjik reseptörler önemli rol üstlenirler. Ligand asetilkolin tarafından aktive edilen bu reseptörlerin çalışmalarına ikincil aktive edici ligandlar olarak adlandırılan nikotinik ve muskarinik reseptörler katkıda bulunur. Reseptörler aracılığıyla uyarılan hücredeki sinyaller afferent nöronlar aracılığıyla MSS'ye iletilir.

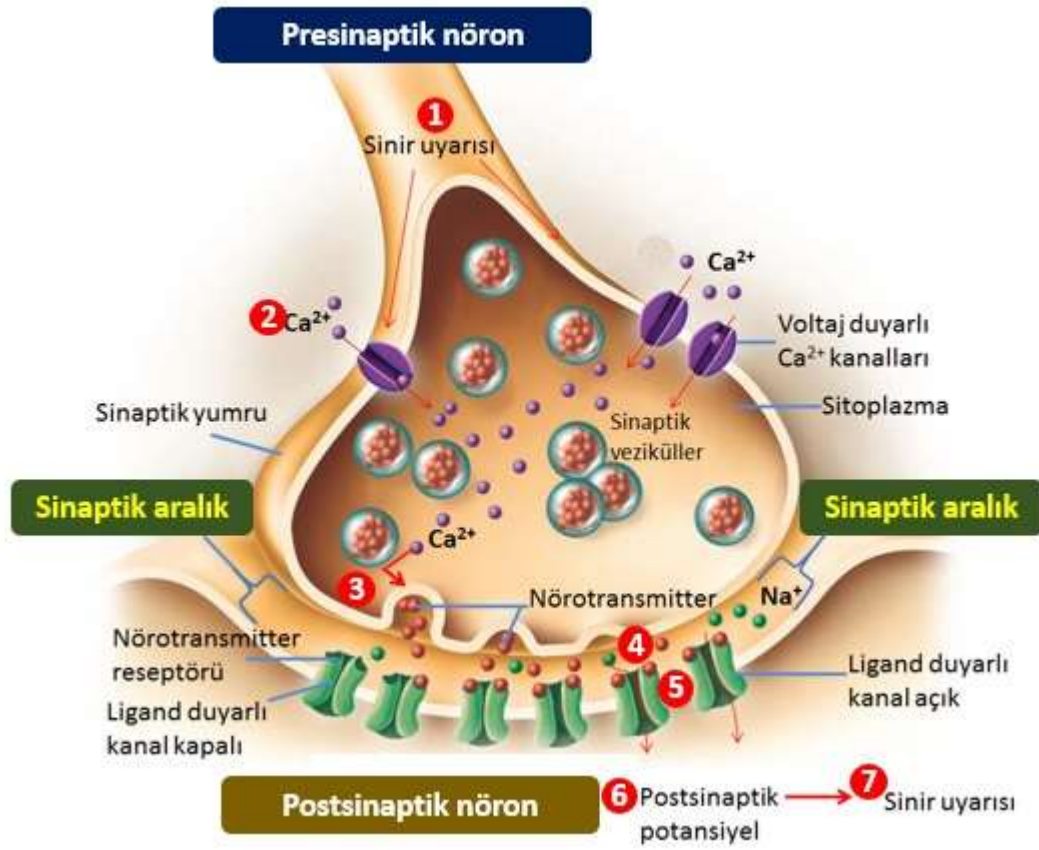
Uyarının iletilmesi (kondüktivite); sinirde oluşan uyarıların aksonlar boyunca iletilmesidir. Uyarılma sonucu reseptörde oluşan sinyaller efferent nöronlar aracılığıyla özel merkezlere iletilirler.

İlişki kurma (korelasyon); sinir merkezleri fonksiyonu aracılığıyla uyarana karşı yanıt değerlendirilir.

Yanıt gösterme (reaksiyon); uyarana karşı sempatik sinir aracılığıyla alınan kararlar efektör organlara ulaştırılır.

Sinir İletimi

Sinir hücrelerinin birbirleri ile iletişimi sinaps adı verilen aralıkta gerçekleşir²⁸. Sinaps, bir nöronun akson terminalinden başka bir nöronun dentriti boyunca vektörel iletişimin sağlandığı bölgedir. İki sinir hücresi arasındaki bilgi aktarım olayına sinaptik iletim adı verilir. Sinapsta, sinirler arasındaki sinyalin iletimi, presinaptik nörondan postsinaptik nörona doğrudur (Şekil 3). Mesaj gönderici ve presinaptik hücre olarak isimlendirilen hücre ile mesajı alıcı postsinaptik hücre kavşak olarak bilinen bu alanlarda birbirlerine oldukça yaklaşırlar²⁸. Temel olarak sinaptik iletimde iki farklı tip bulunmaktadır. Hücreler arasında iletişim elektriksel yollarla gerçekleştiriliyorsa bu sinapslara elektriksel, kimyasal maddeler aracılığıyla gerçekleştiriliyorsa bu sinapslara kimyasal sinapslar adı verilmektedir. Her iki tipteki kavşağın morfolojik olarak yapıları birbirinden farklıdır²⁹. Sinaptaki iletim nöronların iletimine göre çok daha yavaş gerçekleşir. Nöronlarda iletim kimyasal araçlarla elektrokimyasal olarak taşınır.



Şekil 3. Sinir uyarısının şematik gösterimi.

Akson ucuna (presinaptik nöron) sinir impulsu geldiğinde buradaki kalsiyum (Ca^{+2}) kanallarını aktive ederek Ca^{+2} iyonlarının geçişi başlatılır. Ca^{+2} iyonlarının etkisi ile burada bulunan sinaptik veziküllerin (kesecikler) uyarılması sağlanır. Sinaptik veziküller içerisinde bulunan nörotransmitter maddeler (asetil kolin, dopamin, serotonin vs.) ekzositoz ile (ATP harcanarak) sinaptik aralığa boşaltılır. Difüzyon ile bu nörotransmitter maddeler sinaptik aralıkta ilerletilerek diğer nöronun dentritlerinde bulunan reseptörlere bağlanır. Nörotransmitter maddelerin reseptör ile etkileşimi sonucunda sodyum (Na^{+2}) kanalları aktive olarak sinaptik aralıkta bulunan Na^{+2} iyonlarının bu kanallardan geçişi başlatılır. Dentrit ucuna (postsinaptik nöron) Na^{+2} iyonlarının geçişi sonunda nöron depolarize olur ve uyarının karşı nörona aktarılması sağlanır²⁴.

Sinir iletimi Metodolojisi ve Ölçümleri

Sinir iletimi değerlendirilmesinin temel mantığı, herhangi bir siniri elektriksel bir stimülatör (uyarıcı) aracılığıyla uygun şiddette indükleyerek o bölgede bir aksiyon potansiyeli oluşturmak ve bu aksiyon potansiyelini sinirin akış yönüne doğru iletilerek bunun uyarıdan uzak bir bölgede kayıtların alınmasıdır³⁰. Sinir iletim değerlendirmeleri yapılırken tipik deri altı uygulanan iğneli elektrotlar kullanılır. Sistem bir kayıt elektrodu, bir ya da daha fazla uyarıcı elektrot ve bir referans ya da topraklama elektrodu içerir. Genel olarak sinirin bir kısmı uyarıcı bir elektrot ile uyarılarak kayıt elektrodu yardımıyla belirli bir mesafedeki bir alanda aksiyon potansiyeli kaydedilir²⁴.

Bir sinirin temel işlevi kısaca, nöronal hücre gövdelerinden çıkan aksonlar boyunca elektrokimyasal uyarıların iletimini sağlamaktır. Fiziksel ya da kimyasal bir etkene maruziyet sonrasında sinir sisteminin yapı veya fonksiyonlarında meydana gelebilecek yan etkilere nörotoksisite adı verilir. Sinir sistemindeki en küçük minör değişimlerde bile bazı nörolojik veya davranışsal değişiklikler ortaya çıkmaktadır³¹. Özellikle fiziksel yaralanma, travma, enfeksiyon, zehirlenme, genetik bozukluk vs. durumlarına bağlı olarak sinir iletiminde ciddi bozulmalar görülebilmektedir. Bu duruma bağlı olarak sinir sistemi ile ilgili menenjit, kortikal görme bozukluğu, multipl skleroz, şizofreni, epilepsi, alzheimer ve parkinson gibi hastalıklar ortaya çıkmaktadır^{30,32}. Bunlara ek olarak diyabetik nöropati nedeniyle sinir hücreleri kaybına yol açan amiotrofik lateral skleroz da örnek olarak gösterilebilir³³.

PSS'ye zarar veren toksik kimyasallara maruziyet ya da çeşitli ilaçlar kullanım sonucunda nöropati gelişebilir. Sinirdeki hasarı tespit etmek ya da bir nöropatiyi teşhis etmek amacıyla geleneksel sinir biyopsisi kullanılır. Ancak sinirde olası toksisitenin işlevsel ölçülerini veya sinir iletim değerlendirilmelerinde belirleyebilmek amacıyla sinir biyopsisi ile birlikte elektrofizyolojik ölçümler ve histopatolojik yöntemlerden faydalanılmaktadır²³.

Sinir İletim Hızı

Sinir iletim hızı (sinir velositesi), herhangi bir sinirden birim zamanda sinir impulsunun (uyarısının) sinir boyunca iletilmesidir. Normal bir sinirde sinir iletim hızı 50-60 metre (m) / saniye (s) civarlarındadır. Ancak sinir velositesi sinirden sinire, siniri oluşturan komponentlere, bireyler arasında cinsiyete, yaşa ve çeşitli tıbbi durumlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Sinir velositesi aksonunun çapı büyüdükçe artarken, yaşa bağlı olarak azalmaktadır^{34,35}.

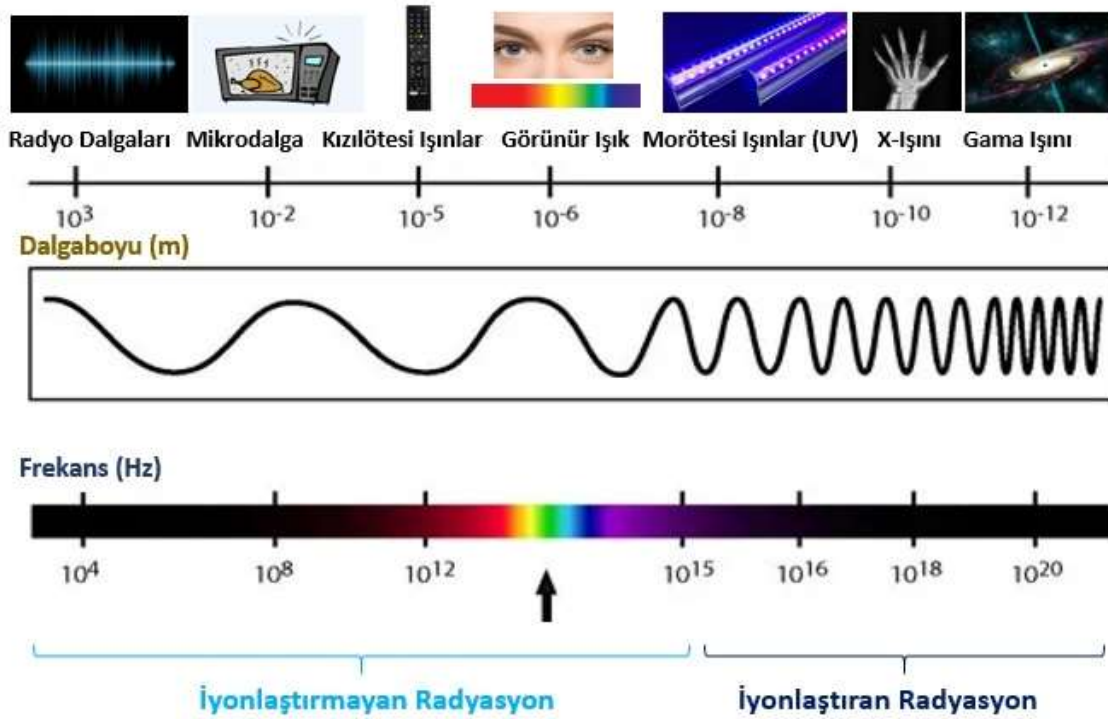
Elektromiyografik laboratuvar çalışmalarında, sinir iletim parametrelerinde çeşitli faktörlere bağlı olarak gelişen normal veya anormal durumlar ortaya çıkmaktadır. Bir sinirde işlevsel bozukluklar meydana geldiği durumlarda sinir iletiminde anormal şekillerde tepkiler oluşabilmektedir. Sinir iletim çalışmalarında geleneksel elektrodiagnostik (EDX) ya da elektromiyografi (EMG) yöntemlerinden faydalanılarak sinir bozukluklarının nedeni, hasarı, yeri ve şiddeti tespit edilebilmektedir³⁶. Bunlarla birlikte, Manyetik Rezonans (MR), Pozitron Emisyon Tomografi (PET), Bilgisayarlı Tomografi (CT), Single Foton Emisyon Bilgisayarlı Tomografisi (SPECT), Ultrasonografi (USG), Elektroensefalografi (EEG), Uyarılmış potansiyel testleri ile Anjiyografi ya da Biyopsi gibi uygulamalardan tanı amaçlı geniş ölçüde faydalanılmaktadır.

Radyasyon

Wilhelm Conrad Röntgen tarafından 1895 yılında x-ışınlarının ve Curie tarafından 1900 yılların başında radyoaktivitenin keşfi ile birlikte radyasyona, radyasyonun etkilerine ve radyasyondan korunma konularına ilgiler artmıştır. Radyasyon faaliyetleri ilk kez 1928 yılında Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) tarafından başlatılarak radyasyon çalışanları ve halk için uygun doz sınırları belirlenmiştir. Daha sonraki yıllarda radyasyondan korunma ilkelerine Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), Uluslararası Radyasyon Birimleri Komisyonu (ICRU), Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu (EURATOM) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi uluslararası çeşitli kuruluşlarda dâhil olmuşlardır³⁷. Ülkemizde bu denetim görevi 1954 yılında Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından başlatılmıştır. Günümüzde ise radyasyon güvenliğine ilişkin hukuki sorumluluk, ilke ve önlem sınırlarının belirlenmesi, tüzük ve yönetmelik olarak hükümete sunarak

yasalaştırılmasının sağlanması ve uygulamaların denetlenmesi Radyasyondan Korunma Daire Başkanlığı tarafından yürütülmektedir.

Radyasyon (ışınım), noktasal bir enerji kaynağının yarıçapları doğrultusunda ortama salınan yüklü, kütleli ve enerjetik (enerji formunda dönüşüm) taneciklerin ya da dalgasal enerjilerin transferi olayıdır. Elektrik yüklü ve hareketli parçacıkların kendi eksenleri etraflarında hareket etmesi sonucunda ya da bir kuvvet etkisi ile hareket halindeki elektrik yüklü parçacıkların oluşturduğu değişikliklere elektromanyetik alan (EMA) adı verilmektedir³⁸. EMA'da bir değişim meydana gelebilmesi için yüklü cisimleri ivmeli hareket ettirmek gereklidir ve ivmeli hareket eden yükler elektromanyetik dalga (EMD) yayar³⁹. Dolayısıyla EMA, belirli koşullar altında, elektromanyetik enerji taşıyan bir dalga hareketi olarak da tanımlanabilmektedir. Elektrik hatları, solenoid bobinleri, yıldırım ve Helmholtz bobinleri dahil olmak üzere çeşitli kaynaklar EMA'yı oluşturur⁴⁰. EMD'ler biçiminde yayılan yüksek enerjiye ise elektromanyetik radyasyon (EMR) adı verilir. EMD'lerin frekanslarına, dalga boylarına ya da enerjilerine göre sınıflandırılması sonucunda elektromanyetik spektrum oluşturulmuştur (Şekil 4).



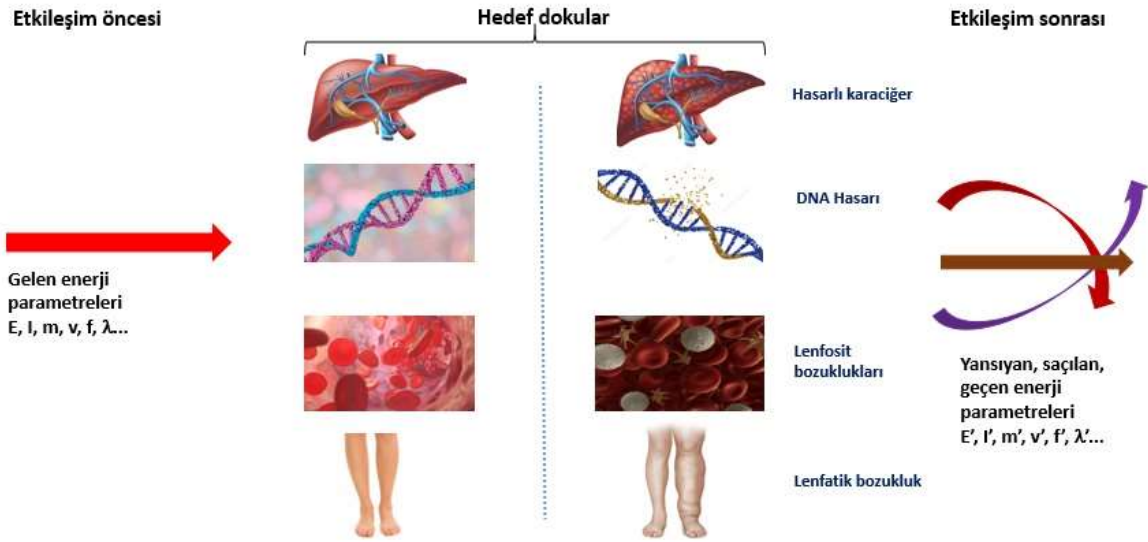
Şekil 4. Elektromanyetik Spektrum.

EMD'ler, elektromanyetik spektrumda en düşük frekanstan başlayarak en yükseğe doğru sıralanmıştır⁴¹. Bunlar; Radyo Dalgaları, Mikrodalga (MW), Kızıl Ötesi Işımlar (IR), Görünür Işık, Mor Ötesi Işın (Ultraviyole, UV), X-Işını, Gamma (γ) Işını ve Kozmik Işımlar şeklindedir. Bunlar hücre ya da dokularda etki derecesine göre, iyonlaştıran ve iyonlaştırmayan radyasyonlar olarak iki kategoride incelenir.

İyonlaştıran radyasyon, madde içinden geçerken onları oluşturan atomlardan elektronları koparabilen ya da atomu iyonlarına ayıracak enerjiye sahip yüksek frekanslı EMD'lerdir⁴¹. İyonlaştıran radyasyonlar başlıca parçacık tipi ve dalga tipi radyasyon olmak üzere ikiye gruba ayrılır. Parçacık tipi radyasyon, çok hızlı hareket edebilen, gözle görülemeyecek kadar küçük, belirli bir kütle ve yeterli düzeyde enerjiye sahip küçük parçacıklar olarak tanımlanırlar. Alfa (α) parçacıkları, beta (β) parçacıkları, nötronlar, protonlar ve elektronlar başlıca bilinen parçacık tipi radyasyon tipleridir. Dalga tipi radyasyon, belirli bir enerjiye sahip fakat kütsüz olan parçacıklar olarak tanımlanırlar. Bu grupta başlıca x-ışını ve gama (γ) ışınları yer alırlar. Bu iki ışınların

birbirinden farklı, x-ışını atomu çevreleyen elektron bulutunda oluşurken gama ışınları ise atomun çekirdeğinde oluşmasıdır⁴². İyonlaştırmayan radyasyon ise maddeler ile etkileşime girerek atomik bağları kırmak veya iyon oluşturabilmek için yeterli enerjiye sahip olmayan EMD'lerdir. Elektromanyetik spektrumundaki kızılötesi ışınlar, görünür ışık, radyo dalgaları, mikrodalgalar ve morötesi ışınlar iyonlaştırmayan radyasyon türleri içerisinde yer alırlar.

Biyolojik sistemlere (doku, hücre, organizma vs.) herhangi bir tipte enerji uygulandığında, hem bu sistemlerin fonksiyonlarında ve işlevlerinde hem de enerji parametrelerinde bir takım değişimler meydana gelmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Hedef biyolojik sistemlere dalgasal ya da tanecik biçiminde enerji uygulandığında, etkileşimi takiben enerji parametrelerindeki (foton veya tanecik enerjisi (E), şiddet (I), kütle (m), hız (v), frekans (f), dalga boyu (λ) vs.) değişimler²⁸.

EMR etkileşim sonucunda biyolojik sistemde meydana gelen değişimler olumlu yönde ise, sistemde varlığı bilinen bozukluklar enerji uygulaması ile giderilmeye çalışılır ki bu yöntemler tedaviye yönelik uygulamalar grubuna girer. Ayrıca söz konusu bu etkileşim sonrası değişen enerji parametreleri, tanısal amaçlı enerji uygulamalarında olduğu gibi sistemin yapısı ve işlevi hakkında da bilgi vermektedir²⁸.

Radyasyon Kaynakları

Günümüzde radyasyon kaynaklarını, doğal ve yapay olarak iki grupta sınıflandırılır. Doğal radyasyon kaynakları, insan yapımı olmayan doğanın bir parçasıdır. Bu radyasyonlar dış ve iç kaynaklı olabilirler. Dış kaynaklı olarak güneş, en çok bilinen doğal radyasyon kaynağıdır. Ayrıca, yer kabuğundaki radyoaktif elementlerden yayılan ışıınımlar (terrestrial), uzay boşluklarından gelen kozmik ışıınımlar, toprakların yapısında bulunan radyoaktif elementler, solunum ve yiyecekler yoluyla alınan radyasyonlar bu gruba örnek verilebilir⁴¹. İç kaynaklı olanlar ise canlı vücudunda doğal halde bulunan Potasyum-40, Radyum-226, Karbon-14 vs. radyoaktif izotopların yaydığı radyasyonlardır. Tüm canlıları etkisi altına alan ve çevre radyasyonu (background radiation) olarak da adlandırılan bu doğal kaynaklar, yaşadığımız bölgelerdeki binaların yapı malzemelerine, yüksekliklerine, iklim şartlarına, toprak bileşimlerine ve hava koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir⁴². Maruz kaldığımız radyasyonun %88'ni doğal radyasyon kaynakları oluşturur. Yapay radyasyon kaynakları ise bilimsel destekli teknolojilerin katkısıyla ve insan yapımı olarak üretilen radyasyonlardır. Gelişmiş ülkelerde yapay radyasyon kaynaklarından olan radyasyon maruziyetinin yaklaşık %50'sini medikal görüntüleme oluşturmaktadır. Aynı zamanda, tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddeler, endüstriyel uygulamalarda kullanım, nükleer bomba denemeleri ve nükleer

enerji alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sınıfta yer alan radyasyon, total radyasyon maruziyetinin %12'sini oluşturmaktadır⁴².

Radyofrekans Elektromanyetik Radyasyonun Sinir Sistemi Üzerindeki Etkinliği

EMR kaynaklarının günlük kullanımı nedeniyle MSS ve PSS elektromanyetik aktiviteye doğrudan ve sıklıkla maruz kalmaktadırlar. Özellikle RF-EMR kaynaklarını kullanan veya bu kaynaklara yakın alanlarda yaşayan bireylerde nöropsikiyatrik komplikasyonların gelişimi ve nörodavranışsal işlevlerin performanslarında bazı iniş/çıkış yaşama riskleri oluşmaktadır⁴³. Ayrıca, EMR kaynaklarının oluşturduğu termal etkilerin de nöronal aktiviteyi etkileme olasılığı ileri sürülmektedir^{44,45}.

Günümüze kadar EMR'lerin sinir sistemi üzerindeki etkinliklerini göstermek amacıyla yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu doğrultudaki çalışmalarda, değişik tip, frekans ve şiddetli EMA ve denekler kullanılmıştır. Bu çalışmaların sonuçlarına göre çoğunlukla, mevcut standartlarda maruz kalan değerlere yakın radyasyonlarda olumsuz etkilerin görülmediği (hatta pozitif katkı sağladığı) yönünde olsa da genel kanı, uzun vadede EMR maruziyetinin sinir materyali üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu yönündedir^{46,47}.

Bu doğrultuda gerçekleştirilen birkaç çalışmada, düşük frekanslı (900, 1800 MHz) RF-EMA'ya sürekli maruz kalmanın siyatik sinir de oksidatif stresi indükleyerek nöropatik değişikliklere ve siyatik sinirin epineuriumunda oksidatif hasara ve kalınlaşmaya neden olabileceği ifade edilmektedir^{48,49}. Ayrıca, sinir dokusuna EMR maruziyeti, nöronal hücre apoptozunda, sinir miyelin ve iyon kanallarının fizyolojisini değiştirerek, merkezi sinir sisteminde ve sinir iletim hızında önemli değişiklikler meydana getirdiği bildirilmektedir^{50,51}.

Bu konuda yapılmış bir çalışmada, aşırı düşük frekanslı EMA'lara maruziyetin mesleki çalışma alanlarındaki (yüksek voltajlı hatlarda çalışan işçiler ve elektrikli tren sürücüler) çalışanların periferik sinir sisteminde önemli değişikliklere ve sinir iletim hızlarında önemli azalmalara yol açtığı bildirilmiştir⁵². Ancak, bu etkiler uygulanan EMR'lerin frekansına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir⁵³. Başka bir çalışmada da, prenatal dönemde (gebeliğin 1-21. günleri) sıçanlara günlük 1 saat boyunca uygulanan 900 MHz EMA'nın, sinir iletim hızında anlamlı bir azalma neden olduğu ve periferik sinir gelişimini şiddetli olmasa da morfolojik olarak olumsuz etkilediği ifade edilmiştir⁵⁴. Cep telefonları frekanslarında (900 MHz, 2 W/kg SAR) yayılan EMR'ye maruziyetin uyku üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, EMR'nin merkezi sinir sistemine zarar vererek nöropsikolojik değişkenleri etkileyebileceği ve uyku ritimlerinin bozulmasına neden olabileceği vurgulanmıştır⁵⁵. Ek olarak, 4 hafta boyunca 835 MHz (4,0 W/kg SAR) RF-EMA maruziyetinin merkezi sinir sistemi üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, 835 MHz RF-EMA farelerin merkezi sinir sistemini ve hipokampal nöronlarını etkileyerek daha düşük kalsiyum seviyelerine neden olduğu gösterilmiştir⁵⁶.

Diğer taraftan literatürde, farklı tipteki EMR'lerin sinir iletim hızı, sinir rejenerasyonu ve fonksiyonel iyileşme kapasitesi üzerinde destekleyici etkisini belirleyen önemli bir faktör olabileceği de rapor edilmektedir^{57,58}. Bu doğrultuda yapılan bir çalışmada, diyabetik periferik nöropatili hastalarda pulslu elektromanyetik alanın (PEMA) sinir iletim hızı üzerine etkisi araştırılmıştır. 50 Hz frekans ve 20 Gauss yoğunluğu olan PEMA uyarısının peroneal sinir iletim hızında (m/s) anlamlı bir iyileşme sağladığı saptanmıştır⁵⁹. Gerçekleştirilen bir başka çalışmada, EMA uyarımının siyatik sinir üzerine etkileşimi araştırılmıştır. Düşük yoğunluklu (4 mW/cm²) ve milimetrik dalga formunda yüksek frekanslı (54 GHz) EMR'nin sinir liflerinin rejenerasyon mesafesini ve sinir iletim hızını artırdığı (%26'lık oranda) gösterilmiştir⁶⁰. Yine aynı araştırmacılar tarafından aynı EMR'nin hasarlı sıçan siyatik sinir fonksiyonun iyileşmesi ve aksiyon potansiyeli üzerindeki etkileri araştırılmıştır. EMR'nin sinirdeki rejeneratif süreçler (lezyondan beş ay sonra) üzerinde ve toplam aksiyon potansiyeli genliğindeki artışlarla birlikte sinir lifleri boyunca aksiyon potansiyeli iletiminde artışlar (%25-30 oranında) açısından uyarıcı etkilere sahip olduğu bildirilmiştir⁶¹. Yüksek frekanslı (0.138 THz) EMR'nin nöronların dinamik büyümesi ve sinaptik iletim verimliliği üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, 0.138 THz radyasyonunun, dendritik dallanma yoğunluğunu artırdığını, dinamik nöronal büyümeyi ve sinaptik iletimi de modüle edebileceği gösterilmiştir⁶². Matematiksel modeller kullanılarak elektromanyetik radyasyon dağılımının nörona dayalı bir sinir ağı üzerindeki simüle etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada, EMR'lerin sinir sisteminin dinamik davranışlarını ve sinir ağındaki nöron sayılarını değiştirerek modüle edebileceği bildirilmiştir⁶³.

Sonuç

EMR kaynaklarına maruziyetin sinir sistemine etkisi bariz olmakla birlikte bu etki mekanizmalarının her frekans için aynı olmadığı, farklı etkileşimlerinin de bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla yapılan çalışmalarda farklı prosedür ve yöntemler kullanılarak uygulanan EMR'ler ile sinir sistemi arasındaki etkilerin belirlenmesinde henüz daha kesin sonuçlar elde edilememiştir. Genel bir bakışla söylenecek olunursa, EMR'lerin sinir sistemi üzerine etkisinin zor anlaşılan yanları ve organizmanın duyarlılığı üzerine daha ileri deneysel ek çalışmalara gereksinim duyulmaktadır.

Kaynaklar

1. Brodal P. The Central Nervous System: Structure and Function. 4 th ed. New York, Oxford University Press. 2010.
2. Vijayavenkataraman S. Nerve guide conduits for peripheral nerve injury repair: A review on design, materials and fabrication methods, *Acta Biomaterialia*. 2020;106:54-69.
3. Sharifi M, Salehi M, Ebrahimi-Barough S, Alizadeh M, Jahromi HK, Kamalabadi-Farahani M. Synergic effects of core-shell nanospheres and magnetic field for sciatic nerve regeneration in decellularized artery conduits with Schwann cells. *J Nanobiotechnology*. 2024;22:776.
4. Jia Y, Liu X, Wei J, Li D, Wang C, Wang X, Liu H. Modulation of the corticomotor excitability by repetitive peripheral magnetic stimulation on the median nerve in healthy subjects. *Front Neural Circuits*. 2021;15:616084.
5. Hussain G, Wang J, Rasul A, Anwar H, Qasim M, Zafar S et al. Current status of therapeutic approaches against peripheral nerve injuries: A detailed story from injury to recovery. *Int J Biol Sci*. 2020;16:116-134.
6. Reiter N, Paulsen F, Budday S. Mechanisms of mechanical load transfer through brain tissue. *Sci. Rep*. 2023;13:8703.
7. Robinson LR. Traumatic injury to peripheral nerves. *Muscle Nerve*. 2000;23:863-873.
8. Lapresle J, Lasjaunias P. Cranial nerve ischemic arterial syndromes. A review. *Brain*. 1986;109:207-216.
9. Taylor CA, Braza D, Rice JB, Dillingham T. The incidence of peripheral nerve injury in extremity trauma. *Am J Phys Med Rehabil*. 2008;87:381-85.
10. Yutong C, Yan X, Seeram R. Electromagnetic-responsive targeted delivery scaffold technology has better potential to repair injured peripheral nerves: A narrative review. *Advanced Technology in Neuroscience*. 2024;1:51-71.
11. Juutilainen J, Lang S. Genotoxic, carcinogenic and teratogenic effects of electromagnetic fields. Introduction and overview. *Mutat. Res*. 1997;387:165-71.
12. Bortkiewicz, A. Health effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields (RF EMF). *Ind. Health*. 2019;57:403-5.
13. Van Rongen E, Croft R, Juutilainen J, Lagrove I, Miyakoshi J, Saunders R et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on the human nervous system. *Journal of Toxicology and Environmental Health*. 2009;12:572-97.
14. Say F, Zuhail-Altunkaynak B, Coşkun S, Deniz ÖG, Yıldız Ç, Altun G et al. Controversies related to electromagnetic field exposure on peripheral nerves, *Journal of Chemical Neuroanatomy*. 2016;75:70-6.
15. Omid MS, Deshmukh RK, Frotan MD. Investigating the Effective Factors of Radio Waves in the Disorder of the Human Nervous System. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2024;13:696-700.
16. Hei WH, Byun SH, Kim JS, Kim S, Seo YK, Park JC et al. Effects of Electromagnetic field (PEMF) exposure at different frequency and duration on the peripheral nerve regeneration: in vitro and in vivo study. *International journal of Neuroscience*. 2015;126:739-48.
17. Emre M. The effects of radiofrequency and low frequency electromagnetic fields on the immune system. *J Immunol Clin Microbiol*. 2018;3:68-80.
18. Miyakoshi J. Cellular and molecular responses to radio-frequency electromagnetic fields. *proceedings of the IEEE*. 2013;101:1492-1502.
19. Kaplan AA, Yurt KK, Deniz ÖG, Altun G. Peripheral nerve and diclofenac sodium: Molecular and clinical approaches. *J Chem Neuroanat*. 2018;87:2-11.
20. Wehrwein EA, Ozer HS, Barman SM. Overview of the Anatomy, Physiology, and Pharmacology of the Autonomic Nervous System. *Compr Physiol*. 2016;6:1239-78.
21. Waxenbaum JA, Reddy V, Varacallo MA. Anatomy, Autonomic Nervous System. In: StatPearls. Treasure Island, StatPearls Publishing. 2025.
22. Saraçoğlu KT, Baygın Ö. Otonom Sinir Sistemi ve Anestezi. *Journal of Anesthesia JARSS*. 2015;23:194-200.
23. DaSilva JK, Arezzo JC. Use of nerve conduction assessments to evaluate drug-induced peripheral neuropathy in nonclinical species-A Brief Review. *Toxicologic Pathology*. 2020;48:71-7.
24. Apaydın N, Tatar İ. Merkezi ve çevresel (periferik) sinir sistemleri anatomisine genel bakış. In *Fizyolojik Psikoloji*, 1nd ed (Torun Yazihan N): Ankara, Nobel Yayın Dağıtım. 2021;91-152.
25. Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, Katz LC, LaMantia AS, McNamara JO et al. *Neuroscience*. 2nd ed. Sunderland, Sinauer Associates. 2001.
26. Peters A. A fourth type of neuroglial cell in the adult central nervous system. *J Neurocytol*. 2004;33:345-57.
27. Soares EN, Costa ACdS, Ferrolho GdJ, Ureshino RP, Getachew B, Costa SL et al. Nicotinic acetylcholine receptors in glial cells as molecular target for parkinson's disease. *Cells*. 2024;13:474.
28. Pehlivan F. *Biyofizik* 9 th ed. Ankara, Pelikan Kitabevi, 2017.
29. Hon K, Akter F, Emptage N. Synaptic transmission. *Neuroscience for Neurosurgeons*. 1nd ed. Cambridge, Cambridge University Press. 2024.

30. Sontheimer H. Diseases of the Nervous System. 2nd ed. Cambridge, Academic Press. 2021.
31. Korkmaz Ö, Mahiroğlu A. Beyin, bellek ve öğrenme. Kastamonu Eğitim Dergisi. 2007;15:93-104.
32. Swanson PA, McGavern DB. Viral diseases of the central nervous system. Current Opinion in Virology. 2015;11:44-54.
33. Sultanoğlu H. Düzce üniversitesi tıp fakültesi acil tıp anabilim dalı ve pandemi süreci. Konuralp Tıp Dergisi. 2020;12:372-73.
34. LaFratta CW, Canestrari R. A comparison of sensory and motor nerve conduction velocities as related to age. Arch Phys Med Rehabil. 1966;47:286-90.
35. Wagman IH, Lesse H. Maximum conduction velocities of motor fibers of ulnar nerve in human subjects of various ages and sizes. J Neurophysiol. 1952;15:235-44.
36. Shelly S, Ramon-Gonen R, Paul P, Klein CJ, Klang E, Rahman N et al. Nerve conduction differences in a large clinical population: The Role of Age and Sex. J Neuromuscul Dis. 2023;10:925-35.
37. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series 115, IAEA. 1994.
38. Karamazı Y, Emre M. elektromanyetik alanların kemik dokusu üzerine etkisi. Aktd. 2023;32:215-26.
39. Serway RA, Jewett JW. Physics for Scientists and Engineer. 9nd ed (Çolakoglu K): 904-937. İstanbul, Palme Yayıncılık, 2008.
40. Arthur JW. The fundamentals of electromagnetic theory revisited. IEEE Antennas Propag Mag. 2008;50:19-65.
41. Çimen B, Erdoğan M, Oğul R. İyonlaştırıcı radyasyon ve korunma yöntemleri. S.Ü. Fen Fakültesi Fen Dergisi. 2017;43:139-47.
42. Coşkun Ö. İyonize radyasyonun biyolojik etkileri. Teknik Bilimler Dergisi. 2011;1:13-17.
43. Abdel-Rassoul G, El-Fateh OA, Salem MA, Michael A, Farahat F, El-Batanouny M et al. Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. Neurotoxicology. 2007;28:434-40.
44. Wainwright P. Thermal effects of radiation from cellular telephones. Phys Med Biol. 2000;45:2363-72.
45. Wyde ME, Horn TL, Capstick MH, Ladbury JM, Koepke G, Wilson PF et al. Effect of cell phone radiofrequency radiation on body temperature in rodents: Pilot studies of the National Toxicology Program's reverberation chamber exposure system. Bioelectromagnetics. 2018;39:190-99.
46. Rattan Y, Jhamb S, Kumar A. Nerve conduction study: A reliable approach to assess the effect of electromagnetic waves on median nerve. Natl J Physiol Pharm Pharmacol. 2024;14:841-47.
47. Zou DF, Li ZH, Liu YB, Wang CZ. Progress in the study of the effects of Electromagnetic radiation on the mood and rhythm. Electromagnetic Biology and Medicine. 2025;44:212-27.
48. Comelekoglu Ü, Aktas S, Demirbag B, Karagul MI, Yalin S, Yildirim M et al. Effect of low-level 1800 MHz radiofrequency radiation on the rat sciatic nerve and the protective role of paricalcitol. Bioelectromagnetics. 2018;39:631-43.
49. Kerimoğlu G, Güney C, Ersöz Ş, Odacı E. A histopathological and biochemical evaluation of oxidative injury in the sciatic nerves of male rats exposed to a continuous 900-megahertz electromagnetic field throughout all periods of adolescence. Journal of Chemical Neuroanatomy. 2018;91:1-7.
50. Kim JH, Lee JK, Kim HG, Kim KB, Kim HR. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system. Biomol Ther (Seoul). 2019;27:265-75.
51. Dabla K, Singh K. Effect of electromagnetic waves emitted from mobile phone on nerve conduction velocity of median nerve in adult males. International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM). 2016;4:23-27.
52. Danulescu R, Goiceanu C, Danulescu E, Reaboiu K. Possible neurological and cardiovascular effects in workers exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. (2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering):Romania, Iasi. 2012;641-44.
53. Pakhomov AG, Prol HK, Mathur SP, Akyl Y, Campbell CBG. Search for frequency-specific effects of millimeter-wave radiation on isolated nerve function. Bioelectromagnetics. 1997;18:324-34.
54. Hancı H, Yenilmez E, Demir S, Yıldırım M, Gedikli Ö, Kaya H. The effect on rat peripheral nerve morphology and function of a 900-MHz Electromagnetic field applied in the prenatal period. Electromagnetic Biology and Medicine. 2025;1-16.
55. Eggert T, Dorn H, Sauter C, Schmid G, Danker-Hopfe H. RF-EMF exposure effects on sleep - Age doesn't matter in men! Environ Res. 2020;191:110173.
56. Kim JH, Sohn UD, Kim HG, Kim HR. Exposure to 835 MHz RF-EMF decreases the expression of calcium channels, inhibits apoptosis, but induces autophagy in the mouse hippocampus. Korean J Physiol Pharmacol. 2018;22:277-89.
57. Zhu S, Ge J, Liu Z, Liu L, Jing D, Ran M et al. Circadian rhythm influences the promoting role of pulsed electromagnetic fields on sciatic nerve regeneration in rats. Front. Neurol. 2017;8:101.
58. Kamel DM, Hamed NS, Abdel Raoof NA, Tantawy SA. Pulsed magnetic field versus ultrasound in the treatment of postnatal carpal tunnel syndrome: A randomized controlled trial in the women of an Egyptian population. J Adv Res. 2017;8:45-53.
59. Battecha K. Efficacy of pulsed electromagnetic field on pain and nerve conduction velocity in patients with diabetic neuropathy. Bull Fac Phys Ther. 2017;22:9-14.
60. Kolosova LI, Akoev GN, Avelev VD, Riabchikova OV, Babu KS. Effect of low-intensity millimeter wave electromagnetic radiation on regeneration of the sciatic nerve in rats. Bioelectromagnetic. 1996;17:44-7.
61. Kolosova LI, Akoev GN, Ryabchikova OV, Avelev VD. Effect of low-intensity millimeter-range electromagnetic irradiation on the recovery of function in lesioned sciatic nerves in rats. Neurosci Behav Physiol. 1998;28:26-30.
62. Ma S, Li Z, Gong S, Lu C, Li X, Li Y. High Frequency Electromagnetic Radiation Stimulates Neuronal Growth and Hippocampal Synaptic Transmission. Brain Sciences. 2023;13:686.
63. Lin H, Wang C. Influences of electromagnetic radiation distribution on chaotic dynamics of a neural network. Applied Mathematics and Computation. 2020;369:124840.

Correspondence Address / Yazışma Adresi

Yasin Karamazı
Çukurova üniversitesi, Tıp Fakültesi
Biyofizik Anabilim Dalı
Adana, Türkiye
e-mail: yasin_karamazi@hotmail.com

Geliş tarihi/ Received: 21.03.2025

Kabul tarihi/Accepted: 19.06.2025