

RF (Radyo Frekans) Alanlar Ve Biyolojik Dokular Arasındaki Etkileşim Mekanizmaları

ÖZLEM COŞKUN¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı, Isparta

Özet: Elektromanyetik (EM) alanlar birçok doğal ya da insan yapımı kaynak tarafından yayılmaktadır. Radyo frekans (RF; 3 kHz-300 GHz) bölgesinde yer alan elektromanyetik dalgalar iletişim, cep telefonlarında, baz istasyonlarında, radyo ve televizyon yayınlarında v.s. kullanılmaktadır. Teknolojideki gelişmelerin sonucu olarak elektromanyetik dalgaların kullanımı her geçen gün artmakta ve günlük yaşamda doğada bulunanın çok üstündeki seviyelerde elektromanyetik dalgalara maruz kalmaktadır. Son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan cep telefonları, baz istasyonları ve kablosuz iletişim kaynaklı elektromanyetik alanların insan sağlığına etkileri konusunda kamuoyunun duyarlılığı artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik kirlilik, RF alanın biyolojik etkileri, mekanizmalar

Mechanisms Of Interaction Between RF (Radio Frequency) Fields And Biological Tissue

Abstract: Electromagnetic (EM) fields are generated by several natural and man-made sources. Part of the electromagnetic spectrum called radio frequency (RF; 3 kHz-300 GHz) is used in communications, mobile phones, radio and television broadcasts, etc. The use of electromagnetic waves increases due to the technological improvements, therefore, people are exposed to high levels of electromagnetic fields in their daily lives. The health priority of public concerns occurred about the mobile phones, base stations and wireless technologies. Furthermore, the sensitivity of the public is increasing on their adverse effects on the human health.

Keywords: Electromagnetic pollution, biological effects of RF fields, mechanisms

1. Giriş

Elektromanyetik spektrumda 3 kHz ve 300 GHz frekans aralığını kapsayan radyo frekans (RF) alanlara günlük hayatta maruz kalınmaktadır. Evde kullanılan cihazların (mikrodalga fırınlar, telsiz telefonlar, uzaktan kumanda cihazları, güvenlik sistemleri) ve iletişim cihazlarının (TV ve radyo vericileri, cep telefonları, radarlar, bluetoothlar, telsizler, çağrı cihazları, baz istasyonları) yanı sıra medikal alanda (MRI cihazları, diyatermi üniteleri) ve işyerlerinde (bilgisayarlar, telsiz telefonlar) de RF alanlar oldukça geniş bir şekilde yerini almıştır. Bu alanların biyolojik etkileri ise 50 yılı aşkın bir süredir araştırılan önemli konular arasında yer almaktadır (IEEE, 1999).

RF alan kaynaklarının biyolojik yapılarda oluşturdukları etkiler termal ve termal olmayan (non-termal) olarak sınıflandırılmaktadır:

-Termal etkiler; biyolojik dokularda ısı etkisi oluşturacak güçte RF alanların uygulanması sonucunda, ısı artışı nedeniyle oluşan etkilerdir. Yüksek seviyedeki RF radyasyonunun sebep olduğu termal etkiler dolaylı etkileşimlerdir.

-Termal olmayan etkiler; dokulara uygulanan RF alanlar ısı etkisi yaratmayacak seviyede olduğu halde, dokuda fizyolojik değişimlere neden oluyorsa, bu etkiler termal olmayan (non-termal) etkiler olarak tanımlanır.

Çoğunlukla, düşük seviyedeki RF radyasyonunun sebep olduğu bu etkiler elektromanyetik (EM) alanların biyolojik sistemlerle doğrudan etkileşimleridir (Elder, 1987).

2. RF Alan Kaynakları

RF alan kaynaklarını doğal alan kaynakları ve yapay alan kaynakları olarak iki sınıfa ayırabiliriz. Yapay RF alan kaynaklarının şiddetleri doğal çevreden kaynaklı radyasyondan oldukça yüksektir. Dolayısıyla teknolojik gelişmelerle birlikte yeryüzünün elektromanyetik alanı da hızla artmaktadır. RF alan kaynaklarının biyolojik etkileri; maruziyet süresi, maruz bırakılan alanın güç yoğunluğu, frekansı, polarizasyonu, maruz bırakılan bölgenin yakın alan ya da uzak alan olup olmaması, maruz kalan canlının vücut boyutları vs. gibi faktörlere bağlıdır. Hem teorik hem de deneysel çalışmalar vücudun uzun boyutu ile E alan vektörünün paralel olması durumunda maksimum RF soğurma düzeyine ulaştığını göstermiştir (Matthes, 1996).

2.1. Doğal RF Kaynakları

Dünyanın özelliklerinden, güneşten, atmosferden ve uzayın derinliklerinden kaynaklı elektromanyetik alanlar vardır (Matthes, 1996). Genellikle frekansın artmasıyla birlikte atmosferik alan düzeyi artmaktadır.

300 GHz frekansa kadar dünyanın yaydığı radyasyonun güç yoğunluğunun (S) 0.003 W/m² olduğu ifade edilmektedir (Michaelson ve Lin, 1987). Dünyanın etrafındaki atmosfer, iyonosfer ve magnetosfer, derin uzaydan kaynaklı radyasyona karşı dünyayı doğal olarak korur. Bu korumayı geçen elektromanyetik alan frekans aralığı 10 MHz - 37.5 GHz'dir (Lin, 1994).

2.2. Yapay RF Kaynakları

Evde, işyerimizde ve yaşadığımız çevrede yüksek frekanslı elektromanyetik radyasyona maruz kalırız. Bu radyasyon kaynaklarına evlerimizde kullandığımız mikrodalga fırınlarını, cep ve telsiz telefonlarını ve çevremizde iletişim için ya da farklı amaçlar için kullanılan askeri radarları, trafik radarlarını, baz istasyonlarını, TV ve radyo vericilerini, uzaktan kumanda cihazlarını, güvenlik sistemlerini, bluetoothları, Radyo Frekanslı Kimlik Belirleme (RFID-Radyo Frequency Identification) sistemlerini örnek verebiliriz.

3. RF Alanların Biyolojik Dokularla Etkileşim Mekanizması

RF alanlar ile dokuların termal ve termal olmayan mekanizmalar ile elektrik alan ve manyetik alan mekanizmaları yoluyla etkileştiği öne sürülmektedir. Termal mekanizmalar RF alan maruziyeti sonucu dokuda oluşan sıcaklık değişimlerinden kaynaklanır ve ısıya duyarlı biyokimyasal reaksiyonları etkileyebilir. RF alanlar ile biyolojik dokular arasındaki bu tip etkileşimler dokuya enerji transferi ve buna bağlı sıcaklık artışından kaynaklanır. Fakat termal olmayan mekanizmalar doğrudan sıcaklık artışı ile ilgili olmayıp RF elektrik ve manyetik alanın dokuda oluşturduğu değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Challis, 2005).

3.1. Termal Mekanizmalar

Termal mekanizmalar temel olarak farklı elektriksel iletkenliğe sahip biyolojik dokuların RF enerjisi absorbe etmesi ile ilgilidir. Elektriksel iletkenlik yüklü parçacık ve iyonların kısmi ötelenme hareketidir. RF elektrik alan titreşen akımlar oluşturmakta ve bu akım enerjisinin moleküler hareket ile hızlı transferi sırasında biyolojik dokularda sıcaklık artışı gözlenmektedir.

Bir diğer termal katkı moleküllerin dönüş hareketlerinin engellenmesinden kaynaklanmaktadır. Su molekülü rastgele yönelimli, büyük ve kalıcı bir dipol momente sahiptir. Elektrik alan uygulandığında bu dipol momentler, kısmen alan yönünde yönelirler.

Suyun akışkan olması nedeniyle, elektrik alan dipolleri çevirmeye çalışırken sıvıya enerji, dolayısı ile de ısı transfer etmiş olur. Bu mekanizma özellikle mobil iletişim frekans aralığında çok etkindir (Challis, 2005).

Birim hacimdeki güç dağılımı $\sigma \cdot E^2$ ilişkili olup, dokunun iletkenliği (σ) ve elektrik alanın karesi (E^2) ile değişir. Buna bağlı olarak iletkenliği birbirlerinden farklı biyolojik dokularda absorplanan güçler de farklı olacaktır. Tüm termal etkiler, alana maruz kalan dokunun elektriksel parametrelerine, özellikle de elektriksel iletkenliğe bağlıdır. Çocuklarda dokuların dielektriksel özelliklerinin yetişkinlerden farklı olması nedeni ile RF alan maruziyetinden kaynaklı risk, yetişkinlere oranla çocuklarda daha fazladır (Challis, 2005).

3.2. Termal Olmayan Mekanizmalar

Termal olmayan etkileşim mekanizmaları ile ilgili birkaç yaklaşım mevcuttur.

a. RF Foton Enerjisinin Büyüklüğü

Elektromanyetik bir dalga olan fotonun enerjisi; h Planck sabiti, ν frekans olmak üzere, $h \cdot \nu$ ile bulunur. Frekansı 1 GHz olan, EM dalganın foton enerjisi 4.10^{-6} eV 'tur. Bu foton enerjisi tipik bir molekülü iyonize etmek için gerekli 1 eV'tan yaklaşık olarak 2.10^5 kat daha küçüktür. Bu nedenle RF alan maruziyetinden kaynaklı DNA hasarı meydana gelse bile bunun iyonizasyon mekanizmasından kaynaklanmadığı ve nedenini başka bir süreçte aramak gerektiği öne sürülmektedir (Challis, 2005).

b. RF Alanlar ile Moleküler Titreşimin Uyarılması

Ses dalgalarında olduğu gibi, RF alanlar ile moleküler titreşimin uyarılmasını dikkate alan birkaç etkileşim mekanizması mevcuttur. Bu uyarımın olabilmesi için enerjinin ve momentumun korunması gerekmektedir. Enerjinin korunumu için RF alanın foton enerjisi ile titreşimin foton enerjisi birbirine eşit ve $h \cdot \nu$ olmalıdır. Bu şartın sağlanabilmesi için frekansların eşit olması yeterlidir (Challis, 2005).

Momentumun korunumu için RF dalga boyunun ultrasonik dalga boyuna eşit olması gerekmektedir. Bu durum optik modlar için ($\lambda < R$); yani dalga boyunun (λ) cismin boyundan (R) küçük olduğu 1 GHz üstü frekanslarda geçerlidir (Sirenko vd., 1996). 1 GHz frekanslı ses dalgaları piezoelektrik yapılar kullanılarak elde edilebilir fakat RF dalgalar kullanılarak doğrudan elde edilemez. Protein gibi kompleks biyolojik yapılardaki lokal merkezlerin RF alanlar ile uyarılması ve gevşeme esnasında foton salınımı mümkündür (Challis, 2005).

c. RF Frekanslarda Hücre Membranı Boyunca Potansiyel

Biyolojik dokularda 1 MHz altı frekanslarda elektrik alan dağılımı çok düzensizdir.

Doku örneği boyunca elektrik alan uygulandığında en büyük voltaj düşüşü, dokunun geri kalan kısmına kıyasla, çok daha yüksek elektriksel dirence sahip olması nedeniyle, hücre membranı boyunca meydana gelir. Hesaplamalar membrandaki elektrik alanın, dokudaki ortalama alan değerinden birkaç bin kat daha fazla olduğunu göstermektedir (Kotnik ve Miklavcic, 2000). Böylece düşük frekanslarda, oldukça küçük ortalama E alanlarda bile, membran boyunca voltajda düşüşler olmaktadır. Fakat daha yüksek frekanslar için bu durum geçerli değildir. Membran bir kapasiteye sahiptir ve bu da AC akım için paralel iletim yolu sağlamaktadır. Düşük frekanslarda bu yolun iletkenliği çok düşük fakat frekansla lineer olarak artmaktadır. Düşük frekanslarda membran boyunca lineer olmayan etkiler meydana gelmektedir (Challis, 2005).

d. Termal Enerji Tarafından RF Radyasyon Maruziyet Etkilerinin Sınırlandırılması

Biyolojik sistemlerin bileşenleri sürekli olarak Brownian hareketi ya da termal gürültü olarak bilinen, yüklerin rastgele hareketine neden olan, dalgalı elektrik ve manyetik alana maruz kalırlar.

Termal enerjinin ortalama değeri (E); $E = k_B T$ 'dir.

k_B Boltzman sabitidir ve $1.38.10^{-23}$ J/K

T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır.

Dolayısı ile vücut sıcaklığında (T=37 °C) termal enerji 26 meV'dir.

3.3. Elektrik Alan Etkileri

a. Protein Yapısındaki Değişim

Proteinin dolayısıyla enzimin etkinliği yapısına bağlıdır. Proteinler, peptid bağları ile birbirlerine bağlı amino asitlerden oluşan bir ana zincir ve buna bağlı yan zincirlerden oluşmaktadır. Yan zincirler genellikle polar özellik gösterirler. Yan zincirlerden kaynaklı yapı farkı nedeni ile farklı potansiyel enerji ve dipol momente sahip olan enzimler, yine bu yan zincirler aracılığı ile farklı yapıları çekmekte ya da itmekteler. RF radyasyonun protein yapısı içinde değişikliğe neden olabileceği ve bu nedenle biyolojik yapıları etkileyebileceği düşünülmektedir (Laurence vd., 2000; Astumian, 2003).

b. Liganda Bağlanmadaki Değişim

Chiabrera ve arkadaşları RF alanın hücre reseptörleri üzerinde etkili olabileceğini ifade etmişlerdir. Ca^{+2} gibi bir ligand reseptöre yani proteine bağlandığında proteinin yapısı ve reseptör fonksiyonlarının kontrolünü değiştirir. Ligand bağlanma olasılığındaki önemli değişiklikler, RF maruziyet standartlarında belirtilen değerlerin altındaki RF elektrik alan modülasyonu ile oluşturulabilmektedir.

Buradaki şaşırtıcı sonuç RF elektrik alan etkilerinin büyük ölçüde metabolik enerji etkileri tarafından yükseltilmesidir. Sistemin avantajı hücrenin temel metabolizması tarafından sağlanan güç kaynağının transistöre çok benzer bir şekilde kendi güç kaynağını küçük sinyalleri yükseltmek için kullanmasıdır (Chiabrera vd., 2000).

c. Biyolojik Yapıların Vibrasyonel Durumlarındaki Absorpsiyonlar

RF enerjinin rezonans absorpsiyonunda mikrotübüller gibi biyolojik yapıların titreşim durumlarının rol alabileceği düşünülmektedir. DNA molekülü için titreşim frekansının 10 GHz olduğu kabul edilmektedir. 100 W/m^2 lik güce sahip olan MW'nin molekülün enerji durumunu 3.10^{-9} kBT arttırdığı tespit edilmiştir. Biyolojik dokularda önemli etkiler oluşturabilmek için bu değer çok küçük olduğu kanısına varılmıştır (Adair, 2002).

d. Hücreler Arası Çekim Kuvvetinin Artışı

Bir sıvı içerisinde dielektrik parçacıkların toplanması genellikle Pearl-Chain etkisinden kaynaklanır. Bu etki RF elektrik alan tarafından da oluşturulabilir. Bu etkinin kolloidal parçacıklarda ve hücrelerde gözlenebilmesi için gereken esik değer 100 MHz olarak ölçülmüştür. RF elektrik alan hücrelerdeki dipol momentlerin salınımına dolayısı ile çekici kuvvetin artmasına neden olur. Krasil'nikov RF elektrik alan ile hücre membranına bağlı iyon etkileşimini incelemiş ve membran yüzeyine bağlı hidrojen iyonlarının mobilitesinin, bağlı olmayan hidrojen iyonuna kıyasla 20 kat, sodyum iyonuna kıyasla ise 100-1000 kat yüksek olduğunu belirtmiştir (Krasil'nikov, 1999).

e. Düşük Frekanslı Elektrik Alanlarının Bozunumu (Demodülasyonu)

Darbeleri RF alanların mikrodalga işitsel etkiye neden olduğu bilinmektedir. Bu etkinin termal kaynaklı olduğu ve sadece mobil telefon sinyallerinden çok daha yüksek güç değerlerinde gerçekleştiğine inanılmaktadır. Mobil telefon sinyallerinin oldukça yavaş demodülasyonu halinde standartlarda belirtilen değerlerin üstünde düşük frekanslı bir elektrik alan elde etmek mümkün olacaktır. Bozunum, biyolojik yapının elektriksel iletkenliği ya da dielektrik sabiti, elektrik alan ile önemli oranda değiştiği takdirde gerçekleşecek ve böylece elektriksel cevaplar da lineer olmayacaktır (Challis, 2005).

3.4. Manyetik Alan Etkileri

Genel olarak manyetik alanın doku ile etkileşiminin iki farklı şekilde gerçekleştiği öne sürülmektedir:

a. Manyetit

İnsan beyin dokusu da dahil olmak üzere dokularda manyetit (F_3O_4) adı verilen 50 nm boyunda küçük ferromanyetik parçacıklar bulunmaktadır. Özellikle beyin en dış kısmında manyetit konsantrasyonu yüksektir (Challis, 2005).

Darbeleri manyetik alanın, manyetit parçacıklarında tork oluşturduğu ve hücre membranı ile mekanik etkileşimi sonucu iyon kanallarını aktive ettiği belirtilmiştir (Dobson ve Pierre, 1996). Daha sonra manyetit içeren bakterilerle yapılan deneylerde maruziyet artışı ile hücre oluşumunun orantılı olduğu tespit edilmiştir (Cranfield, 2003).

b. Radikal Çiftleri

Serbest radikaller çiftleşmemiş elektron bulunduran, yüksek reaktif yapılı ve kısa ömürlü moleküllerdir. Kanseri de dahil olmak üzere bir çok hastalıkta serbest radikallerin önemli rolü vardır. Düşük şiddetli RF alanda serbest radikal konsantrasyonunda artış gözlenmiştir (Woodward, 2001). Sonuç olarak hastalıklar ve serbest radikal konsantrasyonu arasında açık bir ilişki vardır (Challis, 2005).

4. RF Alanların Biyolojik Dokulara Etkileri

4.1. Kardiyovasküler Sistem Üzerindeki Etkileri

Çok şiddetli RF enerji soğurumuzda, kalpte ısı etkiye dayalı, birtakım deformasyonların meydana geldiği fakat düşük şiddetli RF radyasyon maruziyetinde, elektrokardiyogram (EKG) verileri, kalpte herhangi bir olumsuz etkinin oluşmadığını göstermektedir. Kesin olmamakla beraber, RF enerjinin, kalpte ritim bozukluğuna yol açabileceği de ileri sürülmektedir. Öne sürülen ritim bozukluğu, kardiyovasküler sistemden kaynaklı olabileceği gibi, bütün vücudun soğurduğu enerjiye tepki de olabilir. Çünkü RF enerjiden soğurulan enerji vücut sıcaklığını artırabilir ve bu artışı dağıtmak için dolaşım sistemi daha hızlı çalışabilir. Güç yoğunluğu yüksek bir radyasyondan soğurulan enerji, bireyde yüksek ateş meydana getirebileceği için, buna bağlı olarak kalp atışı hızında bir azalma da meydana gelebilir. Sıçanlar üzerinde yapılan bir deneyde 915 MHz frekanslı bir radyasyondan 16 hafta boyunca, 2,5 W/kg SAR tesirinde kalpte herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Yine, 435 MHz frekanslı ve 10 W/m² güç yoğunluğunda bir radyasyona 6 ay boyunca maruz bırakılan kobayların kan basınçlarında herhangi bir değişim gözlenmemiştir.

Bunun yanı sıra son zamanlarda yapılan araştırmalar, özellikle deri altında yüksek ateşe neden olan GHz civarındaki şiddetli radyasyonlara uzun süre maruz kalmanın, kalpte akut ritim bozukluğuna neden olabileceği ihtimalini ortaya koymaktadır (Black ve Heynick, 2003).

Çok şiddetli mikrodalga radyasyon kaynaklarının yakınlarında, en bilinen etki, yüksek çarpıntı ve tansiyondur (Lin, 2004). Bunun haricinde, elektromanyetik radyasyonun kalp üzerinde ciddi bir etkisi gözlenmemiştir. Özellikle, standartlara uygun elektromanyetik radyasyonun, kardiyovasküler sistem üzerinde olumsuz bir etkisi yoktur. Ancak, kalp pili olarak bilinen “pacemaker” kullanan kişilerin cep telefonu kullanmaları veya başka nedenlerle RF radyasyona maruz kalmaları oldukça sakıncalıdır.

4.2. Beyin Dalgalarının Faaliyetlerine Etkileri

Beyin ve sinir sistemi elektriksel aktivitelerin en yoğun olduğu vücut bölümleridir. Bu nedenle, elektromanyetik radyasyonun beyin ve sinir sistemi üzerindeki ısı etkilerinden daha çok, elektriksel etkileri araştırma konusu olmaktadır. Yapılan araştırmaların çoğu, elektromanyetik radyasyonun, özellikle de mobil telefon kullanımının beyinde elektriksel aktiviteleri değiştirmediğini göstermektedir. Fakat son zamanlarda yapılan bazı araştırmalar, mobil telefon kullanımının, beyin elektriksel aktivitelerini değiştirebileceğini ortaya koymaktadır (Marino vd., 2003). RF enerjinin beyin üzerindeki etkileri elektroensefalografi (EEG) ölçümleri ile tespit edilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda, RF enerjinin, ısı etkilerinden dolayı “kan-beyin bariyerini değiştirdiği” gözlenmiştir. Ancak, bu değişimin küçük seviyeli etkileşimlerde de gözlenmesi RF enerjinin ısı etkisi ile açıklanamamaktadır (D’Andrea vd., 2003). Şiddetli RF enerji, sinir sisteminin yapısını ve fonksiyonunu bozabilmektedir. Birçok araştırma ise, RF enerjinin beyin üzerindeki nörokimyasal etkilerine dikkat çekmektedir. Elektromanyetik radyasyondan kaynaklanan zararlı etkilerin bireysel olarak değişebilmesi de yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen ilginç bir sonuçtur (D’Andrea vd., 2003).

Kan-beyin bariyeri kandaki ağır moleküllerin beyine geçişini engeller. Bu bariyer, beyni yabancı toksik maddelerden korur ve beyin için gerekli metabolizmaların geçişine izin verir. Anoksi, yani yeterli oksijenin alınmaması, ödem, yüksek tansiyon ve iyonize radyasyon gibi birçok sebepten dolayı kan-beyin bariyeri değişir. Genellikle, geçirgenliği yükselir. RF enerji ise, kandaki sıcaklığı yükselttiğinden dolayı, kan-beyin bariyerinin geçirgenliğinde artışa sebep olabilir. Sıçanlar üzerinde yapılan bir deneyde, 15 mW/cm² şiddetindeki, 2800 MHz frekanslı bir radyasyona 60 dakikalık bir maruziyetin beyine kan akısını artırdığı gözlenmiştir.

915 MHz frekanslı radyasyonla yapılan bir deney ise SAR değeri 3,3 W/kg değerine ulaştığı zaman, kan-beyin bariyerinin albümin geçişine açıldığını göstermiştir. Fare ile yapılan bir deneyde ise, 2 yıl boyunca, günde 60 dakika mobil telefon kullanımının beyin damarlarını olumsuz etkilediği gözlenmiştir.

Bu örneklerin yanı sıra, birçok deney sonucunda ve insanlarda kayda değer herhangi bir olumsuz etki gözlenmemiştir (D'Andrea vd., 2003).

4.3. Hormonal ve Sinirsel Faaliyetler Üzerindeki Etkileri

a. Hormonal Faaliyetler Üzerindeki Etkileri

Hormon adı verilen nörokimyasal hücreler, vücutta bilgi ve yetenek taşıyıcıdır. Hormonların, gerektiğinde salgılanmak üzere depolandığı bezler ve hormonlar çok çeşitlidir. Bazı hormonlar vücudun genel fonksiyonlarını düzenlerken, bazı hormonların görevi ise bu hormonların salgılanmasını kontrol etmektir. "Büyüme hormonu" vücutta yağ, protein ve karbonhidrat metabolizmasını kontrol eder ve dolaylı olarak büyümeyi, gelişmeyi sağlar. Yapılan bir deneyde, 7,5 W/kg SAR seviyesinde, 2.45 GHz frekanslı radyasyona 60 dakika maruz bırakılan genç bir sıçanın büyüme hormonu serumunda azalma gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, aynı frekansta ve daha şiddetli bir radyasyona maruz bırakılan bir başka hayvanda herhangi bir değişim gözlenmemiştir (Black ve Heynick, 2003).

Cinsiyet hormonları ve bu hormonları kontrol eden hormonlar üzerinde yapılan araştırmalar, elektromanyetik radyasyonun olumsuz bir etkisini göstermemiştir. Bu hormonlar kan basıncı üzerinde etkili olsalar da, kan basıncındaki RF enerji kaynaklı değişim, bu hormonlar üzerinde herhangi bir etki yapmamaktadır (Black ve Heynick, 2003).

b. Sinir Sistemi Faaliyetleri Üzerindeki Etkileri

Yapılan araştırmalar, SAR değerinin 2 W/kg'dan yüksek olduğu soğurmalarda sinir sisteminde yapısal bozulmaların meydana gelebileceğini göstermektedir. Bu etki, pals dalgalı radyasyonlarda, sürekli dalgalı radyasyonlara kıyasla daha çok görülmektedir. Fareler üzerinde yapılan bir deneyde, 2700 MHz frekanslı ve şiddetli bir pals radyasyonuna maruziyet, hücre zarlarında, ısı bozulmadan farklı bir bozulmaya neden olmuştur (Hossmann ve Hermann, 2002).

Bunun yanı sıra, özellikle standart değerlere yakın şiddetlerdeki radyasyonun, insan sinir sisteminde, ciddi bir morfolojik değişime yol açmadığı düşünülmektedir. Ancak, şiddetli radyasyonun, diğer doku ve organlarda olduğu gibi, sinir sisteminde de yapısal bozukluklara neden olma olasılığı yüksektir. SAR değerinin 6,8 ila 100 W/kg kadar yüksek olduğu durumlarda, nöronların aktivitelerinde azalma ve zar iletkenliklerinde yükselme meydana gelir. Bu da hücrenin ömrünü kısaltır (Hossmann ve Hermann, 2002).

4.4. Görme Faaliyetleri Üzerindeki Etkileri

RF enerjinin gözde bir takım hasarlara yol açabileceği tespit edilmiştir. Bunların başında katarakt gelmektedir. Bunun yanı sıra, RF enerjinin, retina, kornea ve diğer oküler sistemleri de etkilediği görülmektedir. Göz, ısı bakımından vücuttan yalıtılmış bir organ olduğu için dış ısı etkilerine karşı daha duyarlıdır. Çünkü göz, sıcaklık değişimini tolere edecek bir dolaşım sistemine sahip değildir. Bu nedenle, şiddetli bir RF enerji, göz sıcaklığını yükselterek katarakta yol açabilmektedir.

Tavşanlar üzerinde yapılan bir deneyde, 150 W/kg güç yoğunluğunda, 2450 MHz frekanslı bir radyasyon 30 dakikadan uzun bir sürede, gözde, lens içindeki sıcaklığı 41 dereceye çıkarmakta ve katarakta yol açmaktadır. Aynı koşullarda, maymunlar üzerinde yapılan deneyde ise katarakt gözlenmemiştir. Dolayısıyla, bu deney sonuçlarına göre insanlardaki riski tespit etmek doğru değildir. Ancak, SAR değerinin insan gözü lensindeki sıcaklığı 41°'nin üzerine çıkaracak değere ulaşması, aynı mekanizma ile katarakt oluşturabilir (Elder, 2003).

RF enerjinin göz üzerindeki olumsuz etkilerinde, radyasyonun şiddeti ve frekansı, kaynağa olan uzaklık ve maruziyet süresi önemli faktörlerdir. RF enerjinin insan gözü üzerindeki olumsuz etkilerini tespit etmeye yapılan epidemiyolojik çalışmalar neticesinde açık bir kanıt elde edilememiştir. Doğruluğu kanıtlanmamış olmakla beraber, 4 yıldan uzun süre RF enerji maruziyeti altında çalışanlarda katarakt riskinin arttığı, mobil telefon kullanan kişilerde iris melanin hücre urunun oluşma riskinin yükseldiği ve yine uzun süre RF enerjiye maruz kalanların iris saydamlığının bozulabileceği öngörülmektedir (Elder, 2003).

UHF radyasyonuna uzun süre maruz kalan kişilerde göz yorulması, göz yaşarması, renkli ışığa, özellikle mavi ışığa karşı duyarlılığın azalması gözlenmiştir. Gözün ön odacık kısmında bulunan C vitamini miktarının azalması da yine, RF enerjinin göz üzerindeki olumsuz etkileri arasındaki gözlemlerden biridir (Şeker ve Çerezci, 2000). Sonuç olarak, radyasyon kaynağından uzaklarda ve radyasyon şiddetinin standart değerlerin altında olması durumunda RF enerjinin insan gözüne ciddi bir olumsuz etkisi yoktur.

4.5. Kan Hücreleri ve Bağışıklık Sistemi Üzerindeki Etkileri

Son zamanlarda yapılan bazı araştırmalar, RF radyasyonunun, kan hücreleri ve bağışıklık sistemi üzerinde belirli etkilerinin olabileceğini göstermektedir. Bu etkiler, bazı araştırmalara göre 10 mW/cm² üzerinde güç yoğunluğuna sahip radyasyonlarda görülmekte, bazı araştırmalara göre ise 0,5 mW/cm² civarındaki güç yoğunluklarında bile ortaya çıkabilmektedir.

Bu konudaki çalışmaların çoğunda, etkileşme mekanizmalarının biri diğerini tutmamaktadır (Elder, 2003). Kırmızı kan hücresi olarak bilinen eritrositler üzerinde yapılan incelemeler, RF radyasyonunun, hücre zarında değişiklik yaptığını ve bu değişimin hücredeki potasyum ve sodyum iyonlarının hareketini etkilediğini göstermektedir.

İnsan ve tavşan kanı üzerinde yapılan bir deneyde, 1 mW/cm² gibi düşük bir güç yoğunluğuna sahip, 1–3 GHz frekanslı bir radyasyonun, “hemoliz” adı verilen, eritrositlerin eriyerek yapılarındaki hemoglobinin açığa çıkması olayının gerçekleşmesine neden olduğu ortaya çıkmıştır (Black ve Heynick, 2003). Beyaz kan hücresi olarak bilinen lökositler üzerinde yapılan incelemeler, RF radyasyonunun, bazı tip lökositlerde, bölünerek lenfosit halini alacak hücrelerde mitoz bölünme aksaklığını ortaya çıkardığı görülmektedir. Hatta radyasyon maruziyetinden sonra da, hücre üzerindeki toksik etkinin azalan bir oranla devam ettiği gözlenmiştir. Bununla beraber, standart değerlere yakın radyasyon soğurumuzda kayda değer bir etki gözlenmemiştir (Black ve Heynick, 2003).

Elektromanyetik radyasyonun bağışıklık sistemi üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla birçok deney yapılmıştır. Bu deneylerde, değişik şiddetlerde ve frekanslarda radyasyon ve kobay olarak değişik hayvanlar kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda elde edilen patolojik veriler, standart değerlere yakın radyasyonlarda hiçbir etkinin görülmediği yönündedir. Hayvanlar üzerinde şiddetli radyasyonlar ile yapılan deneylerde bazen olumsuz etkiler ortaya çıkarsa da, bu etkilerin 6 haftalık zaman zarfında ortadan kalktığı gözlenmiştir (Black ve Heynick, 2003).

4.6. Üreme Sistemi Üzerindeki Etkileri

Genital organlar RF alanlarına karşı çok duyarlıdır. Şiddetli radyasyon maruziyetinde başlıca etki, üreme organları üzerinde oluşan ısı etkisidir. Bu organlarda sıcaklık artışı kan damarlarının büzülmesine neden olabilir ya da yumurtalık veya testislere direkt zarar verebilir. Histolojik araştırmalar, çeşitli ilsem fazında sperm oluşmasının durakladığını ortaya koymuştur. Bu morfolojik değişimler üreme çevriminde kısırlaşma ve dişi doğum sayısında artış olarak kendini gösterir. RF radyasyonunun hamile kadınlarda, düşük oranında artmaya neden olduğu bilinmektedir. Hamilelik başlangıcında diyatermi tedavisi gören bir annenin fetusunda bir nevi hastalık görüldüğü de yine gözlenmiş bir vakadır. Hamilelikte RF maruziyetine bağlı olarak, çocuk doğduğunda kemikleşme eksikliği de görülebilmektedir (Şeker ve Çerezci, 2000).

4.7. Kalıtım Faaliyetleri Üzerindeki Etkileri

Mikrodalga radyasyonunun DNA'ya hasar verecek kadar enerjisinin olmadığı konusunda genel bir görüş hâkim olsa da, aksini iddia eden birkaç rapor bulunmaktadır.

Bu raporlar, mikrodalga radyasyonunun DNA için genotoksik olabileceğini ileri sürmektedir. Ancak, bu konuda herhangi bir delil yoktur. Buna karşılık, birçok deneysel araştırma, mikrodalga radyasyonunun, DNA'ya hasar verme, kanser oluşturma veya mevcut kanseri ilerletme gibi etkilerinin olmadığını ortaya koymaktadır (Maes vd., 2001).

5. Sonuçlar

EM enerjinin yaygın olarak kullanılması nedeniyle biyolojik dokularla etkileşim mekanizmaları son zamanlarda sıkça araştırılan konular arasındadır. Dünya popülasyonunun çok büyük kısmı RF radyasyona maruz kalmaktadır. EM enerjinin günümüzde yaygın kullanımı beraberinde "Elektromanyetik Kirlenme" olarak tanımlanabilecek yeni bir çevre sorununu ortaya çıkarmaktadır. Bu kirlenmenin canlılar üzerinde duyu organları ile doğrudan hissedilmemesi ayrı bir özellik göstermekte, uzun süreli radyasyona maruziyetin kümülatif etkiler oluşturabileceği kuvvetle muhtemeldir.

Yaklaşık 20 yıldır giderek yoğun bir biçimde kullanımı artan ve günlük hayatımızda önemli bir yer tutan cep telefonları ve bunların geniş alanlarda kullanımına olanak veren baz istasyonlarının yaymış olduğu RF dalgaların insan biyolojik yapısı üzerindeki etkisi halen bir çok araştırmamanın ortak konusu olmaktadır. Her ne kadar ciddi problemler doğurduğu kanıtlanamamış olsa da uzun süreli telefon görüşmelerinden kaçınmak, mobil telefonları çocuklara kullanılmamak, baz istasyonlarından ilgili kurumlar tarafından belirlenen sınır mesafelerinden uzak durmaya çalışmak, cep telefonunun ilk arama yapıldığı esnada en fazla gücü kullandığını göz önünde bulundurarak bu sırada cep telefonunu baş bölgemize yaklaştırmamak karşı taraf açtıktan yani bağlantı kurulduktan sonra telefonu kulağımıza götürmek, geceleri uyurken cep telefonlarını uzak mesafede bulundurmamak, cep telefonlarını çok fazla kullanmamız gerekiyorsa hands-free veya kulaklık ile kullanmak alınması gereken tedbirlerdendir. Özellikle, bebeklerin ve hamile bayanların RF radyasyonuna karşı daha titizlikle korunması gerekmektedir.

Sonuç olarak tüm alanlarda RF maruz kalma şartları incelenmeli ve bunlara göre gerekli düzeltmeler yapılarak, ulusal standartlar belirlenmelidir. Bu konuda yapılacak araştırmaların devam etmesi, bilimsel ve toplum sağlığı açısından önemlidir.

6. Kaynaklar

- [1] Adair, R. K., 2002. Vibrational Resonances In Biological Systems at Microwave Frequencies. *Biophysical Journal*; 82: 1147–1152.
- [2] Astumian, R. D., 2003. Adiabatic Pumping Mechanism for Ion Motive ATPases. *Physics Review Letters*; 91: 118102 1–4.

- [3] Black, D., Heynick, L., 2003. RF Effects on Blood Cells, Cardiac, Endocrine, and Immunological Functions, *Bioelectromagnetics Supplement*, v.6, p.187–195.
- [4] Challis, L. J., 2005. Mechanism for Interaction Between RF Fields and Biological Tissue. *Bioelectromagnetics Supplement*; 7: 98-106
- [5] Chiabrera, A., Bianco, B., Moggia, E., Kaufman, J. J., 2000. Zeeman-Stark Modelling of the RF EMF Interaction with Ligand Binding. *Bioelectromagnetics*; 21: 312–324.
- [6] Cranfield, C. G., Wieser, H. G., Al Maddam, J., Dobson, J., 2003. Preliminary Evaluation of Nanoscale Biogenic Magnetitebased Ferromagnetic Transduction Mechanisms for Mobile Phone Bio-Effects. *IEEE Trans NanoBioscience*; 2: 40–43.
- [7] D'Andrea, J., Chou, C., Johnston, S., 2003. Microwave Effects on the Nervous System, *Bioelectromagnetics Supplement*, v.6, p.107–147.
- [8] Dobson, J., Pierre, T. G., 1996. Application of the ferromagnetic transduction model to D.C. and pulsed magnetic fields: Effect on epileptogenic tissue and implications for cellular phone safety. *Biochem. Biophys Res. Commun.* 227: 718-723.
- [9] Elder, J., 1987. Radiofrequency Radiation Activities and Issues: A 1986 Perspective. *Health Physics*; 53: 607-611.
- [10] Elder, J., 2003. Ocular Effects of Radiofrequency Energy, *Bioelectromagnetics Supplement*, v.6, p.148–161.
- [11] Hossmann, K., Hermann, D., 2002. Effects of Electromagnetic Radiation of Mobile Phones on the Central Nervous System, *Bioelectromagnetics*, v.24, p.49–62.
- [12] IEEE Standarts, 1999. IEEE Standarts for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Std. C95.1.
- [13] Krasil'nikov, P. M., 1999. Resonance Interaction of Surface-Charged Lipid Vesicles with the Microwave Electromagnetic Field. *Biofizika* 44:1078–1082.
- [14] Kotnik, T., Miklavcic, D., 2000. Second-order Model of Membrane Electric Field Induced by Alternating External Electric Fields. *IEEE trans biomed engineering* 2000; 47: 1074-1081.
- [15] Laurence, J. A., French, P. W., Lindner, R. A., McKenzie, D. R., 2000. Biological Effects of Electromagnetic Fields-Mechanisms for the Effects of Pulsed Microwave Radiation on Protein Conformation. *J Theor Bio*; 206: 291–298.
- [16] Lin, J. C., 1994. *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems*, New York, Volume 1, Plenum Press.
- [17] Lin, J., 2004. Studies on Microwaves in Medicine and Biology, *Bioelectromagnetics*, v.25, p.146–159.
- [18] Maes, A., Collier, M., Verschaeve, L., 2001. Cytogenetic Effects of 900 MHz (GSM) Microwaves on Human Lymphocytes, *Bioelectromagnetics*, v.22, p.91–96.
- [19] Matthes, R., 1996. Non-Ionizing Radiation, Austria, ICNIRP–1/96.
- [20] Marino, A., Nilsen, E., Frilot, C., 2003. Nonlinear Changes in Brain Electrical Activity Due to Cell Phone Radiation, *Bioelectromagnetics*, v.24, p.339–346.
- [21] Michaelson, S. M., Lin, J. C., 1987. *Biological Effects and Health Implications of Radiofrequency Radiation*, New York, Plenum Press.
- [22] Şeker, S., Çerezci, O., 2000. Radyasyon Kuşatması, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [23] Sirenko, Y. M., Stroschio, M. A., Kim, K. W., 1996. Elastic Vibrations of Microtubules in a Fluid. *Physical Review*, E53: 1003-1010
- [24] Woodward, J. R., Timmel, C. R., McLaughlan, K. A., Hore, P. J., 2001. Radio frequency Magnetic Field Effects on Electron-Hole Recombination. *Physical Review Letters*; 87: 077602 1–4.