

Potansiyel Bir Risk Olarak Manyetik Alan-Kardiyovasküler Sistem Etkileşimi

Interaction of Magnetic Field-Cardiovascular System as a Potential Risk: Review

Cemil SERT^a

^aBiyofizik AD,
Harran Üniversitesi Tıp Fakültesi,
Şanlıurfa

Geliş Tarihi/Received: 24.08.2015
Kabul Tarihi/Accepted: 11.12.2015

Bu makale, "Controversies on Electromagnetic Field in Medicine and Biology Symposium" (17 Haziran 2013, Samsun)'da sözel sunum olarak sunulmuş ve özeti bu kongre tarafından yayınlanan "Journal of Experimental and Clinical Medicine" dergisinde basılmıştır.

Yazışma Adresi/Correspondence:
Cemil SERT
Harran Üniversitesi Tıp Fakültesi,
Biyofizik AD, Şanlıurfa,
TÜRKİYE/TURKEY
csert@harran.edu.tr

ÖZET Elektromanyetik kirlilik günümüz dünyasında ve yaşamımızda kaçınılmaz bir gerçektir. Endüstriyel aletler, elektrikli ev aletleri, yüksek gerilim hatları, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tıbbi aletler, elektromanyetik alanların çeşitli kaynaklarıdır. Elektromanyetik alanlara ilk duyarlı yapılar, sinyal işleyen yapılardır. Hücre yüzey reseptörleri, iyon kanalları ve bu kanallar yoluyla iyon giriş çıkışları, sinyal iletim molekülleri ve enzim aktivitesi elektromanyetik alanlardan etkilenir. Manyetik alanın biyolojik etkilerini hangi mekanizmalar yoluyla meydana getirdiği konusunda bilinenler sınırlıdır. Kardiyak dokuya uygulanan bir eksternal alan, kardiyak doku membran potansiyelinde değişimler meydana getirir. Dokunun bazı bölgelerinde hücreler depolarize olurken, bazı bölgelerinde hiperpolarize olur. Kardiyak sistemde, hücreler içerisine iyon giriş-çıkışları yoluyla kalp kası uyarılır, kardiyak kas kasılarak vücuda kan pompalar ve daha sonra gevşeyerek eski hâline geri döner. İyon hareketleri ve bu iyonların giriş-çıkış yolları, voltaj duyarlı iyon kanallarıdır. Bu yapılar üzerine manyetik alanların etkileri yaşam için ciddi ve açık riskler oluşturur. Kalbin elektrisitesinde iki parametre önemlidir: Kalp ritmi (HR) ve kalp ritim değişkenliği (HRV). Sempatik ve parasempatik denge hakkında bilgiler sağlayan HRV, kardiyak tonun bir ölçütüdür. Kalıcı kalp pili ve stentli hastalar, tesla düzeyindeki MR alanlarına kontrol altında alınabilir. HRV'li hastalar bir doktor kontrolünde alınmalıdır. Jeomanyetik alanlar ve manyetik rüzgarların, uzun süreli kardiyak problemleri indüklediği anlaşılmıştır. Beş-altı yıllık bir zaman süresince ELF (çok düşük frekanslı) manyetik alanlara maruz kalmanın kardiyovasküler riskler oluşturduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Bu çalışmada, yüksek ve düşük seviyeli manyetik alanların kardiyak sistem üzerine etkileri ve olası riskler konusunda bilgiler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kalp hızı; magnetik alanlar

ABSTRACT Electromagnetic pollution is an unavoidable reality in today's world and in our lives. There are different sources of electromagnetic radiation like industrial electrical equipment, electrical appliances, medical instruments, such as magnetic resonance imaging (MRI), high electrical power lines. The first structures sensitive to electromagnetic filed are signal process in structures: cell surface receptors, ion channels and ion entrance and exit through these channels, signal transduction molecules and activation of certain enzymes are affected from electromagnetic fields. Magnetic field takes place is known about the mechanisms by which biological effects created by is limited. An external field applied to cardiac tissue, cardiac tissue changes in membrane potential, form a tap depolarized cells, while some parts, some parts will be hyperpolarized. Cardiac system, which is considered as the basic cells of the node input and output of ions into cells with the contact and loose, starts warning, pumps blood to the body. Ion movements and input-output paths of these ions is the voltage sensitive ion channels. The effects of the magnetic field on these structures are created a serious and immediated risks to life. In electricity of the heart, two parameters are important. Heart rate (HR) and heart rate variability (HRV). Providing information about the balance of symphatic and parasymphatic HRV, a measure of cardiac tone. The patients with pacemaker and stent can take under control to MR field in tesla level. The patients with HRV must take in control of a doctor. Jeomagnetic filed and magnetic storms, it is considered to induce long-term cardiac problems. Cardiovascular risk of exposure to ELF magnetic filed for a period of five-six years shown by several studies. In this review is presented in high and low-level effects of magnetic fields on cardiac system and potential risks.

Key Words: Heart rate; magnetic fields

doi: 10.5336/cardiosci.2015-47543

Copyright © 2016 by Türkiye Klinikleri

Türkiye Klinikleri J Cardiovasc Sci 2016;28(1):6-11

Birçok laboratuvar çalışması ve epidemiyolojik çalışma elektromanyetik (EM) alanların ciddi sağlık problemlerine yol açtığını rapor etmektedir. Yüksek gerilim hatlarından, evlerde ve endüstride kullanılan her türlü elektrikli alet, yerin manyetik alanı ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi tıbbi aletlerden manyetik alanlara maruz kalınmaktadır.¹

ELEKTROMANYETİK ALANLARIN BİYOLOJİK ETKİ MEKANİZMALARI

1. Polarizasyon kuvvetleri,
2. Kolombik etkiler,
3. Siklotron rezonans ve iyon parametrik rezonans,
4. Biyolojik elektron transferi,
5. Serbest radikal oluşumu.

Manyetik alan-biyolojik sistem etkileşimi konusunda yukarıdaki temel etkileşim mekanizmaları kabul edilmektedir.¹ Bu mekanizmalara göre, belirli düzeydeki manyetik alanlar, kardiyak dokuda iyon hareketlerini etkileyerek, kardiyak kasılma ve kardiyak ritim bozukluklarına neden olabilmektedir.¹

KALBİN ELEKTRİSİTESİ

Sağ atriyumda bulunan sinoatriyal düğüm hücrelerinde dinlenme zar potansiyeli -55 mV düzeyindedir ve Na⁺ iyonlarına doğal sızdırıcı özelliğindedir. Bu nedenle kalpte sinoatriyal düğüm hücrelerinin Na⁺ iyonlarını doğal sızdırıcı özellikleri nedeni ile, eşik değere ulaşarak aksiyon potansiyeli oluşmakta ve depolarizasyon ile kendiliğinden kasılma başlamaktadır. Na⁺ iyonları dışında voltaj bağımlı Ca⁺⁺ kanalları açılarak içeri Ca⁺⁺ girişi ile plato evresi oluşmaktadır. K⁺ kanallarının açılması ile dışarı K⁺ iyon çıkışı başlamakta ve repolarizasyon evresi ile kasılma sonlanmaktadır. Kalpte uyarılma kasılma çiftleniminde Na⁺, Ca⁺⁺, K⁺ ve Cl⁻ iyonları fonksiyon görmektedir. Bu iyon giriş çıkışları kendine özgü kanallar aracılığı ile olmaktadır ve bu kanallar ve iyon giriş-çıkışları manyetik alanlardan etkilenebilmektedir.

TEMEL LİTERATÜR BİLGİLERİ

İnsan vücudu 1-250 µV arasında çok küçük gerilime sahip elektriksel uyarımlarla çalışan ve uzunluğu 500.000 km'ye varan sinir ağına sahip dev bir devre gibidir.^{2,3} Yeryüzünün DC jeomanyetik akışı 0.5 G, AC değeri ise yaklaşık 5-10 G düzeyindedir.⁴ Vücudumuzda, kalp bölgesinde 7-10 G, karın bölgesinde 6-10 G, akciğerlerimizde ise 5-10 G değerlerinde DC manyetik alan mevcuttur. Elektrikli traş makinesinde bu değer 25 mG, floresan lambalarda 5-10 mG, renkli televizyon ve bilgisayar ekranında 1-5 mG civarındadır.⁵

Manyetik alanların oluşturduğu biyolojik etkilerin, hangi mekanizmalarla gerçekleştiği hakkında bilinenler sınırlıdır. Bu alanların hücre zarı yüzeyinde biyokimyasal mekanizmaları değiştirerek, etkileşimin hücre zarı ve Ca⁺⁺ gibi iyon transportuna etkileri, hücre zarında ve hücre içi sinyal iletiminde etkileri olduğu gösterilmiştir. Son çalışmalarda, manyetik alanların sinir sistemi, hormonlar ve bağışıklık sistemi arasındaki çift yönlü etkileşimleri değiştirdiği gözlenmiştir. DNA, RNA ve protein sentezi, hücre bölünmesi, hücre yüzeyine ait özellikler, hücre membranından Ca⁺⁺, Na⁺ gibi iyon giriş-çıkışı, iyon bağlanması, sinyal iletimi, iyon transportu ve bazı enzimlerin aktivasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir.⁶⁻⁸

Kardiyak dokuya uygulanan eksternal bir manyetik alan, kardiyak doku transmembran potansiyelinde değişmeler meydana getirmektedir, dokunun bazı bölgelerinde hücreler depolarize olurken, bazı bölgelerinde hiperpolarize olmaktadır.⁹

Faraday'ın EM indüksiyon yasalarına göre, manyetik alan (MA) içerisinde hareket eden iletkenlerde elektrik akımı oluşmaktadır. Kan, elektrik akımı için bir iletken, bu nedenle statik manyetik alan içerisindeki kan akımı elektriksel bir potansiyel oluşturmaktadır. Bu elektrik akımı 2,5 tesla (T)'dan daha küçük manyetik alanlarda kalbi uyabilecek seviyelerde olmamakla birlikte, elektrokardiyografi (EKG)'de anormal T dalgaları oluşturabilmektedir. Bu değişiklik 0,3 T'dan daha büyük alanlarda, T dalgası genliğinde ani artış şeklinde olmakta, ekspozüre bitimiyle birlikte hızla ortadan kaybolmakta, sonraki günlerde bir daha

gözlenmemekte, EKG'nin diğer bileşenlerinde ise herhangi bir değişim gözlenmemektedir. Oluşan T dalga genliğinin, sabit MA'da özellikle aort kan akımı tarafından üretilen elektrik potansiyelinin EKG kaydı üzerine örtüşmesine bağlı olduğu düşünülmektedir. EKG'de oluşan bu değişiklikler MA'dan çıkınca normale dönmektedir.¹⁰⁻¹²

MRG sisteminde hızlı biçimde açılıp kapanan manyetik alanda değişimlere neden olan gradient sargı sistemi mevcuttur. Faraday yasasına göre manyetik alan şiddetindeki değişim de elektrik akımı oluşturmaktadır. Bu tip akımlar dokularda özellikle kan damarı, kas ve sinirlerde biyoelektriksel etkilere neden olmaktadır. Bu etkiler statik MA'da görülenlerin benzeridir. Gradient alanların canlı hücrelerde yol açtığı etkilerin en önemlisi, sitozolik serbest Ca⁺⁺ konsantrasyonundaki artıştır. Serbest Ca⁺⁺ konsantrasyonundaki artış biyolojik etkilerin çoğundan sorumlu tutulmaktadır.¹³

Kardiyak dokuda, kalp ritmi (HR) ve kalp ritim değişkenliği (HRV) önemlidir. HRV ölçümü genellikle Holter monitörü ile elde edilen kayıtlar kullanılarak yapılmaktadır. Azalmış bir HRV manyetik alanın olumsuz bir etkisini takiben, artmış bir miyokardiyal infarkt insidansının temelini oluşturan olası bir mekanizma olarak kabul edilmektedir. Azalmış bir HRV, gelecek beş-altı yıl içerisinde koroner arter hastalığına zemin hazırlamaktadır.¹⁴

Manyetik alan güvenlik sınırı 10 mA/m² kabul edilmekte, bu da birkaç mT'lık frekans alanına karşılık gelmektedir. Ancak, HR ve HRV üzerinde etkiler oluşturan alan düzeyi konusunda bir sınır tanımlanmamıştır.¹⁴

ENDÜSTRİYEL ELEKTRİKLİ ALETLER VE ELEKTRİKLİ EV ALETLERİNİN ETKİLERİ: μ T VE MT DÜZEYİNDEKİ ETKİLER

Sastre ve ark., laboratuvarında 60 Hz, 28 mT alana bir gece maruz kalan bireylerde, düşük frekans [low frequency (LF)] bandında azalma, yüksek frekans [high frequency (HF)] bandında yükselme gözlemlenmiştir.¹⁵ Tsuji ve ark., çeşitli bantlarda önemli azalmalar gözlediler, fakat LF bandındaki azalma çarpıcı ve kardiyovasküler riskin bir göstergesi idi.

İnsanlarda yapılan çalışmalar, mesleki düzeyde maruziyette (28 μ T), LF bandında azalma görüldüğünü, fakat daha düşük düzeylerde (1,4 μ T) azalma olmadığını göstermektedir.¹⁴

Mardi ve ark., yaptıkları çalışmada, MA'ya maruz kalma ile HR'nin yavaşladığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında sürekli sinüzoidal manyetik alanın hem HR hem de HRV parametrelerini etkilediğini ve alan büyüdükçe etkinin belirginleştiğini saptamışlardır.¹⁴

LF'deki azalma ve HF'deki artış klinik olarak kardiyovasküler hastalıklarla ilişkilidir. HF yalnızca parasempatik etkilerle, LF ise hem sempatik hem de parasempatik etkilerle ilgilidir. Bu da norepinefrin salınmasının inhibisyonu ve/veya asetilkolin salınmasının artışı şeklinde gözlenen değişimlerle ilişkili olabilir.^{16,17} HR'de gözlenen azalma, artmış vagal ve asetilkolin aktivasyonu ile ilişkili olabilir. Alternatif olarak reseptör sayıları ve duyarlılıkları değişebilir. Manyetik alanlar ile indüklenmiş nörotransmitter değişimleri için bulgular yetersiz ve çelişkilidir.¹⁴

Graham ve ark., çalışmalarında, insanlarda kardiyak stres veya başka subjektif semptom olmadığı sonucuna varmışlardır. Ancak HRV'nin LF bandında akut azalma gözlemlenmiştir.¹⁸ Savitz ve ark., 140.000 elektrik işçisinde mesleki manyetik alan ile ilişkili kardiyovasküler hastalık mortalitesini tayin etmişlerdir. Yüksek manyetik alana daha uzun süre maruz kalan işçilerde, aritmi ve akut miyokardiyal infarktüs nedeni ile daha yüksek mortalite olduğunu saptamışlardır.¹⁹ Sastre ve ark., gönüllü bireylerde bir gece boyunca 200 mG MA'ya maruz kalma ile LF bandında önemli azalma, HF bandında ise önemli artış saptamışlardır. Ancak aralıklı olarak maruz kalma ile LF ve HF'de değişim gözlemlenmemişlerdir.¹⁵ Bazı araştırmacılar ise farklı olarak, HF'de artış, minör değişim ve değişim gibi farklı sonuçlar rapor etmişlerdir.²⁰⁻²⁶

TESLA DÜZEYİNDE MANYETİK ALANIN ETKİLERİ

Tenforde, 1,5 T statik manyetik alanda köpekler ve maymunların kardiyovasküler performansını değerlendirmek için, MA öncesi, esnasında ve sonra-

sında bazı parametreleri ölçmüştür. Bu amaçla özel nonmanyetik transdüserler kullanmıştır.²⁷ Fonokardiyografi ile kalp seslerinin simultane kayıtları, ultrasonik ekokardiyografi ile kalp kapak hareketlerini izlemiş, elektromanyetik akış ölçer ile kan akış hızı ve basınç voltaj transdüserler ile intraarteriyel kan basıncını ölçmüştür. Fakat bu parametrelerin hiçbirinde “pre-ekspozure” ve “post-ekspozure” arasında anlamlı fark gözlememiştir.²⁷

Kangarlu ve ark., 8 T alana bir saat süreyle maruz bırakılan domuzlarda kardiyojenik etkiler gözlememişlerdir. Aynı şekilde, 8 T'lik alana bir saat tutulan gönüllü 10 bireyde HRV'de farklılık izlememişlerdir. Ancak ekspozure süresince, aortik kan akışında, manyetik alan ile indüklenmiş potansiyellerin amplifikasyonu ile oluşan distorsiyonları belirlemiştir.⁹

Otsuko ve ark. yüksek manyetik alana maruz kalan kişilerde HRV'nin hem zaman hem de frekans parametrelerinde azalma gözlemlemiştir. Bu azalmanın koroner arter hastalığı, sol ventrikül hipertrofisi ve miyokardiyal infarktüs için risk olduğunu vurgulamışlardır.²⁸

İsveç ve İtalya'da elektrik işçilerinde yapılan çalışmalarda, düşük manyetik alanların herhangi bir kardiyovasküler risk oluşturmadığı belirtilmiştir.²⁹ Fakat Savitz'in bulgularına göre uzun yıllar μ T düzeyinde maruz kalma ile miyokardiyal infarktüs ve aritmi sonucu ölümler mümkün olmaktadır.¹⁹ Bu hipotezi destekleyen klinik ve fizyolojik kanıtlar da vardır.^{30,31}

Yine bazı geniş prospektif kohort çalışmalarda, HRV'nin spesifik komponentlerindeki azalmalarla, sonraki birkaç yıl içerisinde kalp hastalığının geliştiği kabul edilmektedir.¹⁶

Biz bu konuda, HR ve HRV parametrelerini daha ayrıntılı olarak inceleyen bir çalışma yaptık. Çalışmada, Min HR-I, Max HR-I, Mid HR-I SDNN, SDANN, rMSSD, pNN50, VLF, LF, HF parametreleri MA öncesi, esnası ve sonrasında değerlendirilmiştir. Pre-ekspozure ile post-ekspozure değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Ancak, pre-ekspozure-ekspozure ve post-ekspozure-eks-

posure arasında bütün parametrelerde anlamlı artış gözlenmiştir. Çalışmaların çoğunda LF azalmasına rağmen, bizim sonuçlarımızda artış vardı. Bu sonuçta göre hem sempatik hem de parasempatik sistem etkilenmektedir.³²

Bütün çalışmaların sonucunda, değerlendirmeyi sınırlayacak bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Kardiyovasküler bozukluklar uzun sürelerde meydana gelmektedir. Buradaki zorluklardan biri de süredir. Yüksek şiddetli MA'da insanları uzun süre tutmak mümkün değildir ve riskler içermektedir. Bazı araştırmalarda kısa süreli maruziyetin olumsuz etkilerinin akut olduğu gösterilmiştir.³³

Düşük şiddetli MA'nın olumsuz kardiyovasküler etkileri yukarıda bahsedilen bazı çalışmalarda belirtilmiş olmasına rağmen, şiddetli MA ile kıyaslanamaz, çünkü şiddet arttıkça olumsuz etkilerin artma ve ani ölümlerin gelişme riski yüksektir. Bir başka zorluk, yüksek statik MA'da yapılan kayıtlarda sinyal parazit oranının yüksekliğidir.³³

Yüksek statik MA'da (4-8 T) genel bulgular, sistolik kan basıncının azaldığını, diyastolik kan basıncının değişmediğini, nabız ve solunum hızının arttığını göstermektedir.⁹ Bizim çalışmamızda (1,5 T), solunum sayısında önemli değişim, nabız sayısında önemli olmayan artış gözlenirken, sistolik ve diyastolik kan basıncında artış gözlenmemiştir.³²

MA iyon hareketlerini etkileyebilmektedir. Ekstraselüler sinyallere yanıt olarak hücre membranında Ca^{++} akışı, hücrelerin dışından içine sinyal iletiminin yoludur. MA'da iyon hareketleri ile ilgili araştırmalar yapılmıştır, ancak bunların çok azı yüksek statik MA ile ilgilidir. Çalışmaların çoğu düşük frekanslı, düşük şiddetli alanlarda yapılmıştır ve ayrıntılı değildir. İyon çalışmaları, Ca^{++} ve K^+ ile sınırlıdır.^{34,35} ELF alanlarda (Bawin, Blackman, Bellosi) Ca^{++} çalışmalarında artış, azalma ve değişim gibi, birbirinden farklı sonuçlar bulunmuştur.^{34,35}

Shen ve ark., 125 mT statik manyetik alana (SMA) maruz kalmanın voltaj bağımlı K^+ kanallarının inaktivasyon ve hızına etkili olabileceğini göstermişlerdir.³⁶ Kangarlu ve ark., 8 T, üç saat süreyle maruz kalmanın domuzlarda K^+ artışına neden olmadığını saptamışlardır.⁹ Ohata ve ark.,

0,4 T SMA'nın selüloz membranından K⁺ artışını önemli derecede artırdığını gözlemlemiştir.³⁷

İyonlarla ilgili bu çalışmaların hiçbiri kardiyak doku hücrelerinde yapılmamıştır. Fakat çalışmaların çoğunda iyon hareketlerinin değiştiği görülmektedir.

MRG incelemelerinde dokulara gönderilen radyofrekans [radiofrequency (RF)] pulsları protonlara enerji aktararak onları uyarmaktadır. Protonlar aldıkları enerjiyi daha sonra komşu moleküllere aktarmaktadır, bu enerji de ısı olarak ortama dağılmaktadır. Özellikle uzun süren çalışmalarda ciddi ısı artışları olabilmektedir ve yüzeysel dokular derin dokulardan daha fazla etkilenmektedir.³³

MRG güvenlik yönergesine göre tüm vücut özgül soğurma oranı [specific absorption rate (SAR)] değeri (0,4 W/kg), vücut sıcaklığını 1°den daha fazla artırmamalıdır. SMA'ların vücut ısısına etkileri gösterilememiş olup, RF'nin tüm artıştan sorumlu olduğu anlaşılmıştır. 0,5-1,5 W/kg'a kadar SAR değerlerinde termografik araştırmalar yapılmış, hastaların ısınma paternlerinin normal sınırları aşmadığı gözlenmiştir.³³

MRG'ye, kalp pili olanlar, stent takılmış hastalar kontrol altında alınabilir. Koroner stent takılan hastalar, MRG'ye birkaç hafta sonra alınmalıdır. Stentler ve kalıcı piller, implantasyon bölgesinde artefaktlar meydana getirebilmektedir. Leal Del Ojo ve ark., kalıcı kalp pili implantlı 30 hastada, 2,0 T MR görüntüleme öncesi ve sonrası pil fonksiyonlarını kontrol etmişlerdir. MRG', DDD modunda programlanmış "pacemaker (PM)" implantlı hastalarda gerçekleştirmişlerdir. Kontrollerde, PM inhibisyonu, pil asenkrenizasyonu veya pil hızında olumsuzluk gözlemlenmemişlerdir.³⁸

JEOMANYETİK ALAN VE MANYETİK FIRTINALARIN ETKİLERİ

Yerin manyetik alanı ve manyetik fırtınalarda değişimler, kardiyovasküler düzensizliklerin gelişmesi için bir risk olabilmektedir. Jeomanyetik alanlar için asıl hedefler, santral sinir sistemi, damar basıncı ve HRV'nin nöronal regülasyonudur.⁴

Manyetik rüzgârlardan bir-iki gün sonra, kozmonotlarda subkortikal merkezi sinir aktivitesinin yükseldiği gösterilmiştir. Manyetik fırtınalar özellikle, uzun süreli mental stres ve yüksek seviyeli sorumluluk gerektiren işlerde çalışan insanlar için tehlike oluşturmaktadır. Bir manyetik rüzgâr ve jeomanyetik çevresel alanın kuvvetli değişimi, ani ölümler meydana getiren, miyokardiyal infarktüs insidansını ve hipertansif krizleri artırmaktadır.⁴

Herhangi bir stres faktörü olarak jeomanyetik alan değişimleri, bütün vücut sistemini, fakat özellikle fonksiyonların düzenlenmesinden sorumlu olan sinir sistemini etkilemektedir.⁴

SONUÇ

8 T'ye kadar statik manyetik alanlar ile indüklenmiş kalp hızı ve ritminde rapor edilmiş değişiklikler yoktur. Ancak manyetik alan ile lineer olarak artan akış potansiyelleri, kalbin etrafı ve içinde kan akışını indükleyebilmektedir. Bu akış potansiyelleri, 8 T'ye kadar alanlarda, EKG'de distorsiyon yoluyla saptanmıştır. Daha yüksek alanlarda, alanın kalp hızı ve ritmini etkileyeceği düşünülmektedir.

Ektopik (anormal) vurular yalnızca çok yüksek alan şiddetlerinde (>8T) beklenmekte ve onlar meydana gelirse hayvan deneylerinde EKG'de kolaylıkla saptanabilmektedir. Bunlar, asemptomatik ektopikler sergileyen hastalarda klinik MRG süresince gözlenen ektopik vuruların hızında bir değişim olarak tayin edilebilmektedir.

Tesla düzeyinde, ektopik vuru ve "reentrant" girişler, HR ve HRV parametrelerinde değişim, 4 T'ye kadar MA'larda birçok araştırmada gözlenmiştir. Ancak riskler nedeni ile uzun süreli çalışmalar yapılmamıştır.

MRG'ye, kalp pili olanlar, stent takılmış hastalar kontrol altında alınabilmektedir. Koroner stent takılan hastalar, MRG'ye birkaç hafta sonra alınmalıdır. Aritmisi olan hastalar zorunluluk hâlinde mutlaka kontrol altında alınmalıdır. μ T ve mT düzeyinde manyetik alanlara uzun süreli maruz kalma sonucunda HR, HRV parametrelerinde değişim olduğu, bunun sonucunda miyokardiyal ölüm insidansında artış olduğu kesinleşmiştir.

Jeomanyetik alanlar ve manyetik fırtınalara maruz kalma durumunda yine HR ve HRV parametrelerinde değişim olduğu hem deneysel hem de simulasyon çalışmaları ile kanıtlanmıştır.

Hem düşük hem de yüksek MA şiddetine maruz kalma durumunda, sistolik kan basıncının azaldığı, diyastolik kan basıncının değişme-

diği, nabız ve solunum hızının arttığı gösterilmiştir.

Kalp seslerinin, kalp kapak hareketlerinin, kan akış hızı ve intraarteriyel kan basıncının da değişmediği gözlenmiştir. Ancak bu konudaki çalışmalar çok sınırlıdır, hayvan deneylerinde yapılmıştır ve uzun süreli maruz kalanlarda çalışılmamıştır.

KAYNAKLAR

- Magda Havas. Biological effects of low frequency electromagnetic fields. In: Clement-Croome D, ed. *Electromagnetic Environments and Health in Buildings*. 1st ed. London: Spon Press; 2004. p.207-32.
- Jauchem JR, Merritt JH. Epidemiology of exposure to electromagnetic fields: an overview of recent literature. *J Clin Epidemiol* 1991;44(9): 895-906.
- Silny J. [Risk of electromagnetic field for humans]. *Versicherungsmedizin* 1991;43(5):142-8.
- Baevsky RM, Petrov VM, Chernikova AG. Regulation of autonomic nervous system in space and magnetic storms. *Adv Space Res* 1998;22(2):227-34.
- Environmental Health Criteria 232. *Static Fields*. Geneva: World Health Organization; 2006. p.349.
- Cleary SF. A review of in vitro studies: low-frequency electromagnetic fields. *Am Ind Hyg Assoc J* 1993;54(4):178-85.
- Berg H. Problems of weak electromagnetic field effect in cell biology. *Bioelectrochem Bioenerg* 1999;48(2):355-60.
- Cridland NA, Sabour NR, Saunders RD. Effect of 50 Hz magnetic field exposure on the rate of RNA synthesis by normal fibroblast. *Int J Radiat Biol* 1999;75(5):647-54.
- Kangaru A, Burgess RE, Zhu H, Nakayama T, Hamlin RL, Abduljalil AM, et al. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field. *Mag Reson Imaging* 1999;17(10):1407-16.
- Gaffey CT, Tenforde TS. Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1981;2(4):357-70.
- Weikl A, Moshage W, Hentschel D, Schittenhelm R, Bachmann K. [ECG changes caused by the effect of static magnetic fields of nuclear magnetic resonance tomography using magnets with a field power of 0.5 to 4.0 Tesla]. *Z Kardiol* 1989;78(9):578-86.
- Hong CZ, Shellock FG. Short-term exposure to a 1.5 tesla magnetic field does not affect somatosensory-evoked potentials in man. *Magn Reson Imaging* 1990;8(1):65-9.
- Carson JJ, Prato FS, Drost DJ, Diesborough LD, Dixon SJ. Time varying magnetic fields increase cytosolic free Ca²⁺ in HL-60 cells. *Am J Physiol* 1990;259(4 Pt 1):687-92.
- Tsuji H, Larson MG, Venditti Jr FJ. Impact of reduced heart rate variability on risk for cardiac events. The Framingham heart study. *Circulation* 1996;94(11):2850-5.
- Sastre A, Graham C, Cook MR. Brain frequency magnetic field alter cardiac autonomic control mechanisms. *Clin Neurophysiol* 2000;111(11): 1942-8.
- Liao D, Cai JC, Rosamond WD, Barnes RW, Hutchinson RG, Whitless EA, et al. Cardiac autonomic function and incident coronary heart disease: a population-based case-cohort study. The ARIC Study. *Atherosclerosis Risk in Communities Study*. *Am J Epidemiol* 1997;145(8):696-706.
- Winchell RJ, Hoyt DB. Spectral analysis of heart rate variability in the ICU: a measure of autonomic function. *J Surg Res* 1996;63(1):11-6.
- Graham C, Sastre A, Cook MR, Gerkovich MM. Nocturnal magnetic field exposure: gender specific effects on heart rate variability and sleep. *Clin Neurophysiol* 2000;111(11):1936-41.
- Savitz DA, Liao D, Sastre A, Kleckner RC, Kavet R. Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol* 1999;149(2):135-42.
- Kleiger RE, Miller JP, Bigger JT Jr, Moss AJ. Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 1987;59(4):256-62.
- Hayano J, Sakakibara Y, Yamada M, Ohte N, Fujinami T, Yokoyama K, et al. Decreased magnitude of heart rate spectral components in coronary artery disease. Its relation to angiographic severity. *Circulation* 1990;81(4):1217-24.
- Bernardi L, Ricordi L, Lazzari P, Soldà P, Calciati A, Ferrari MR, et al. Impaired circadian modulation of sympathovagal activity in diabetes: possible explanation for altered temporal onset of cardiovascular disease. *Circulation* 1992;86(5):1443-52.
- Bigger JT Jr, Fleiss JL, Rolnitzky LM, Steinman RC. Frequency domain measures of heart period variability to assess risk late after myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol* 1993;21(3):729-36.
- Winchell RJ, Hoyt DB. Spectral analysis of heart rate variability in the ICU: a measure of autonomic function. *J Surg Res* 1996;63(1):11-6.
- Barron HV, Lesh MD. Autonomic nervous system and sudden cardiac death. *J Am Coll Cardiol* 1996;27(5):1053-60.
- Huikuri HV, Ylitalo A, Pikkujämsä SM, Ikkäheimo MJ, Airaksinen KE, Rantala AO, et al. Heart rate variability in systemic hypertension. *Am J Cardiol* 1996;77:1073-7.
- Tenforde TS. Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. *Prog Biophys Mol Biol* 2005;87(2-3):279-88.
- Otsuko K, Yamanaka T, Cornelissen G, Breus T, Chibisov SM, Baevsky R, et al. Altered cronoma of heart rate variability during span of high magnetic activity. *Scripta Medica (BRNO)* 2000;73(2):111-6.
- Knave B, Gamberale F, Bergström E, Birke E, Iregren A, Kolmodin-Hedman B, et al. Long-term exposure to electric fields. A cross-sectional epidemiologic investigation of occupationally exposed workers in high-voltage substations. *Scand J Work Environ Health* 1979;5(2):115-25.
- Levy MN. Autonomic interactions in cardiac control. *Ann NY Acad Sci* 1990;601:209-21.
- Dekker JM, Schouten EG, Klootwijk P, Pool J, Swenne CA, Kromhout D. Heart rate variability from short electrocardiographic recordings predicts mortality from all causes in middle-aged and elderly men. The Zutphen Study. *Am J Epidemiol* 1997;145(10): 899-908.
- Sert C, Aktı Z, Sirmatel Ö, Yılmaz R. An investigation of the heart rate, heart rate variability, cardiac ions, troponin-I and CK-MB in men exposed to 1.5 T constant magnetic fields. *Gen Physiol Biophys* 2010;29(3):281-6.
- Martin ET, Coman JA, Shellock FG, Pulling CC, Fair R, Jenkins K. Magnetic resonance imaging and pacemaker safety at 1.5-Tesla. *Journal of the American College of Cardiology*. *J Am Coll Cardiol* 2004;43(7):1315-24.
- Bawin SM, Adey WR, Sabbot IM. Ionic factors in release of 45Ca²⁺ from chicken cerebral tissue by electromagnetic fields. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1978;75(12):6314-8.
- Blackman CF, Beane SG, House DR, Joenes WT. Effects of ELF (1-120 Hz) and modulated (50 Hz) RF fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 1985;6(1):1-11.
- Shen JF, Chao YL, Du L. Effects of static magnetic field on the voltage gated potassium channel currents in trigeminal root ganglion neurons. *Neurosci Lett* 2007;415(2):164-8.
- Ohata R, Tomita N, Ikada Y. Effect of a static magnetic field on ion transport in a cellulose membrane. *J Colloid Interface Sci* 2004;270(2):413-6.
- Del Ojo JL, Moya F, Villalba J, Sanz O, Pavón R, García D, et al. Is magnetic resonance imaging safe in cardiac pacemaker recipients? *Pacing Clin Electrophysiol* 2005;25(2):274-8.