

MRG Uyumluluk ve Güvenilirlik Risklerinin Biyomalzemeler için Değerlendirilmesi

Evaluation of MRI Compatibility and Safety Risks for Biomaterials

Ö. Burak İSTANBULLU¹, Gülşen AKDOĞAN²

Biyomedikal Mühendisliği
Erciyes Üniversitesi
{burakistanbullu¹, akdogan²}@erciyes.edu.tr

Özetçe

Tıbbi biyomalzemeler; insan vücudundaki hasar görmüş veya tamamen kaybolmuş doku ve organların yerini tutması veya desteklenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Biyomalzeme teknolojisindeki gelişmeler sayesinde günümüzde bu ürünlerin tıpta kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Ancak bir tıbbi biyomalzemenin Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) cihazının oluşturduğu son derece güçlü enerjiyi içeren bir ortama maruz kalması durumunda; insan sağlığı açısından istenmeyen sonuçlar meydana gelebilmektedir. Özellikle vücutta bulundurulmuş metalik içerikli biyomalzemeler; MRG sırasında kullanılan güçlü statik manyetik alan, gradient manyetik alan ve radyofrekans (RF) elektromanyetik darbeleri ile etkileşime girmektedir. MR tarayıcılarda kullanılan bu manyetik alanlar; manyetik etkili kuvvet, tork ve elektriği ileten tıbbi biyomalzemeler ile RF birleşimi nedeniyle doku ısınması gibi elektromanyetik uyumluluk ve girişim sorunlarına yol açabilmektedir. Sonuçta bu etkileşimler, biyomalzemeyi taşıyan kişilerin ciddi şekilde yaralanmalarına da neden olabilmektedir. Çalışmamızda; MRG cihazının vücut destek ekipmanları olarak kullanılan biyomalzemeler üzerinde meydana getirebileceği muhtemel fiziksel etkiler araştırılarak, MRG uyumluluk ve güvenilirlik riskleri biyomalzemeler açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler — *MR Uyumlu Biyomalzemeler, Medikal İmplant, Manyetik Rezonans Görüntüleme, RF Etkili Isınma, MR Uyumluluğu, MR Güvenilirliği*

Abstract

Medical biomaterials are being used to replace or support severely damaged or completely missing tissue and organs at human body. Current usage of these products in medicine has become quite prevalent thanks to developments of biomaterial technology. However, in case a medical biomaterial is exposed to an environment including extremely strong energy that Magnetic Resonance Imaging (MRI) device generates, undesirable results in terms of human health may occur. Especially metalliferous biomaterials in the body interact with strong static magnetic field, gradient magnetic field and radiofrequency (RF) electromagnetic pulses which are used during MRI. Such magnetic fields used in MR scanners can

result in electromagnetic compatibility and interference issues such as magnetically induced force, torque and tissue heating due to RF coupling with medical biomaterials which conduct the electricity. Consequently, these interactions may lead the persons carrying the biomaterial get injured seriously. In this paper, by researching possible physical effects of MRI device on biomaterials used as body support equipments, MRI compatibility and safety in terms of biomaterials is evaluated.

Keywords — *MR Compatible Biomaterials, Medical Implant, Magnetic Resonance Imaging, RF Induced Heating, MR Compatibility, MR Safety*

1. Giriş

Tıbbi görüntüleme sistemlerinden Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) cihazı, insan sağlığına zararsız olması ve yüksek çözünürlük özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. [1] Ancak MRG sırasında; oldukça yüksek güçlü bir statik manyetik alan, manyetik radyo frekans darbeleri ve zamana bağlı olarak değişen gradient alanlar kullanılmaktadır. Manyetik alanlar; tıbbi amaçlarla kullanılan implant, stent, protez veya elektrotlar gibi biyomalzemelerin yapısını ve fonksiyonunu etkileyerek çevrelerindeki biyolojik dokularda elektromanyetik etkileşim oluşturma potansiyeline sahiptir. Elektromanyetik etkileşimin; sıcaklık artışı, manyetik kuvvet ve tork oluşumu gibi fiziksel değişimler ile sonuçlanması, kişinin ciddi şekilde yaralanmasına sebep olabilmektedir [2]. Şu ana kadar MRG ile ilişkili olarak kayıt altına alınmış olan 15 adet ölümle sonuçlanan vaka meydana gelmiştir. Bunlardan 10 tanesi implant edilen kalp pillerinden kaynaklanmış, 2 tanesi insülin pompası taşıyan, 1 tanesi nörostimülatör bulunduran ve 1 tanesi de damarında genişlemeye karşı kullanılan kısıkaç kullanılan hastada meydana gelmiştir [3-4]. 1 çocuk ise oksijen tankının MR ortamında bulundurulması sonucu ölmüştür [5]. Bunlara ek olarak, MR ortamında bulundurulmuş ferromanyetik objelerden kaynaklanan yüzlerce ciddi şekilde doku yanması ve sakatlanma olayları rapor edilmiştir [6]. Meydana gelen tüm bu risklerin sebebi, MR cihazında kullanılan elektromanyetik alanlar ve bu alanlar ile etkileşime giren MR uyumsuz vücut içi tıbbi biyomalzemelerdir. İlgili problemlerin engellenmesi için vücutta kullanılacak biyomalzemelerin, implantların MR

Biyogüvenlik ve Biyomalzeme

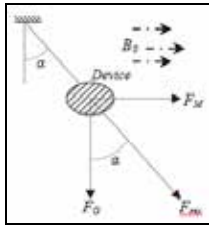
3. Gün / 17 Ekim 2015, Cumartesi

cihazı ile uyumlu ve güvenilir olması gerekmektedir. Biyomalzemeler; MR cihazı için uyumlu ve güvenilir ise herhangi bir sorun yaşanmadan yüksek güçte manyetik alan içeren ortamda bulundurulabilir.

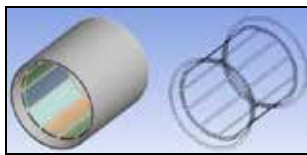
Vücutta bulundurulan biyomalzemenin MR cihazı uyumluluk/güvenilirlik kontrollerinin yetersiz olması veya hiç yapılmaması nedeniyle, MR cihazı için uyumlu biyomalzemeleri kullanan kişilerde dahi MR görüntülemenin yapılmasından kaçınılmaktadır. Söz konusu endişelerin oluşmaması için MR uyumlu/güvenilir malzemeler ile uyumsuz/tehlikeli malzemelerin hastalarda kullanılmadan önce ayırt edilmesi gerekmektedir. Bu sayede; vücudunda biyomalzeme bulunduran bir kişiye MR çekimi yapılması gerekiyor ve biyomalzemenin MR için uyumlu/güvenilir olduğu belirlenmiş ise bu kişi için MRG yapılmasında herhangi bir sakınca olmayacaktır. Biyomalzemelerin MR ortamı ile uyumlu olduğu sürece kullanılması; hem MRG sınırlamalarını kaldırarak, hem de görüntüleme işleminin daha sağlıklı yapılmasını sağlayacaktır.

Biyomalzemelerin MR uyumluluk ve güvenilirliklerinin analizi için; vücut içi biyomalzemenin MR cihazı ile etkileşiminden kaynaklanan tüm riskler değerlendirilmelidir. Bu riskler 2. bölümde özetlenmiştir. Vücudunda biyomalzeme taşıyan bir kişinin MRG sırasında herhangi bir sağlık problemi yaşamaması için biyomalzeme olarak kullanılan ürünler piyasaya çıkarılmadan önce manyetik kuvvet / tork oluşumu ve RF etkili ısınma analiz testlerine tabi tutulmalıdır (Şekil 1.1). Testlerden elde edilen sonuçlara göre biyomalzemenin MR güvenirliliği rapor edildikten sonra piyasaya sunulmalıdır.

Sonlu Elemanlar Analizi tabanlı yazılım programında tasarladığımız MR bobini (Şekil 1.2) ve medikal implantlar üzerinde yapılan analizler sayesinde; MR uyumluluğu bilgisayar ortamında da analiz edilebilmektedir. Bu sayede piyasada bulunan biyomalzemelerin olduğu gibi yeni üretilen medikal implantlarda da MR uyumluluk ve güvenirlilik analizleri yapılabilecektir.



Şekil 1.1 Statik Manyetik Alanın etkisi sonucu oluşan manyetik kuvvetin ölçülmesine ait deneyin şeması. B_0 ; Statik Manyetik Alanı, F_M ; biyomalzeme üzerinde oluşan Manyetik Kuvveti, F_G ; yerçekimini, F_{res} ; Net Manyetik Kuvveti temsil etmektedir. α sapma açısı, test edilen biyomalzemenin Statik Manyetik Alan Uyumluluğu hakkında bilgi vermektedir [7].



Şekil 1.2 Simülasyon için kullanılacak MR bobini

Biyomalzemelerin; MR uyumluluk testlerinden geçmesi ve MR uyumluluk/güvenirlilik etiketi alındıktan sonra hastalarda kullanılmasına izin verilmesi gerekmektedir. Malzemelerde

MR uyumlu/güvenilir onayı almaları ise elektromanyetik alan altındaki malzemede meydana gelecek fiziksel değişimlerin standartlarla belirlenmiş aralıklar dahilinde olmasına bağlıdır. Konuyla ilgili olarak ASTM ve ISO gibi kuruluşların halen geliştirmekte oldukları standartlar mevcuttur.

2. MRG Sırasında Oluşabilecek Riskler

MR cihazında görüntülerin elde edilmesi için üç temel elektromanyetik alan kullanılmaktadır. Klinik uygulamalarda 1.5 - 3 T olarak kullanılan ve 0.05 mT olan dünyanın manyetik alanından 30 000 – 60 000 kat daha güçlü olan statik manyetik alan (B_0); hidrojen atomlarındaki protonların spin hareketlerini tek bir doğrultuya hizalamak amacıyla kullanılmaktadır. Gradient alanlar; vücut üzerinde istenilen bir konumdan MR sinyali elde edebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Radyofrekans (RF) manyetik alan darbeleri ise; vücudun B_0 etkisindeki net manyetizasyonunu uyarıp bozarak MR sinyali üretmesini sağlamaktadır.

MRG sırasında kullanılan bu üç manyetik etki de güvenlik riskleri unsurlarını oluşturmaktadır. MR ortamında bulundurulan herhangi bir MR uyumsuz/tehlikeli medikal implant, cihaz veya alet, bu riskleri önemli bir şekilde artırmaktadır. Tablo 2.1'de MR ortamında kullanılan parametreler ile biyomalzemelerin fiziksel etkileşimi sonucu oluşabilecek riskler özetlenmiştir [8].

Tablo 2.1 MRG Sırasında Kullanılan Farklı Elektromanyetik Alanlar ile Biyomalzemelerin Etkileşiminden Kaynaklanan Potansiyel Riskler

Manyetik Alan Türü	Değer	Potansiyel Risk
Statik Manyetik Alan	1.5 – 3 T	<ul style="list-style-type: none">Ferromanyetik objelerde manyetik kuvvet ve tork sonucu biyolojik dokuda hasar oluşumuAktif implantlarda fonksiyon bozulması
Gradient Manyetik Alan	< 300 mT/m	<ul style="list-style-type: none">120 dB' e kadar gürültüPeriferik sinir uyarımıİletken implantlarda voltaj indüklenmesi ve ısınmaAktif implantlarda fonksiyon bozulması
RF Manyetik Alan Darbeleri	21 – 128 MHz < 25 kW tepe	<ul style="list-style-type: none">Uzun geometriye sahip biyomalzemelerde RF etkili ısınmaAktif implantlarda fonksiyon bozulmasıOrtamdaki elektronik cihazlar ile etkileşim

MR ortamındaki parametreler manyetik oldukları için, muhtemel riskleri de manyetik etkileşim çerçevesinde ele almak gerekmektedir. Biyomalzeme üretiminde kullanılan malzemeleri de manyetik özelliklerine göre gruplandırmak, risk değerlendirmesi açısından yardımcı olmaktadır (Şekil 2.2).

Biyogüvenlik ve Biyomalzeme

3. Gün / 17 Ekim 2015, Cumartesi

2.1. Manyetik Kuvvet ve Tork Etkisi

Manyetik alan içerisine konulan bir malzemede, manyetik dipol moment oluşumu meydana gelmektedir. Oldukça yüksek güçteki bir manyetik alanın etkileri; implant yapımında kullanılan malzemelerin türüne ve implantın geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Biyomalzemelerin yapımında kullanılan her bir materyalin, manyetik alan altındaki dipol momentleri farklı değerlerdedir. Medikal implantın toplam dipol momenti; içerdiği malzemelerden kaynaklanan dipol momentlerinin toplamına eşittir. Bir biyomalzemenin temas ettiği dokuda; yüksek manyetik alan altında oluşan dipol moment değerine bağlı olarak moment yönünde bir kuvvet meydana gelmektedir. Oluşan manyetik kuvvet ise dokuda fiziksel hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle biyomalzeme olarak kullanılacak ürünlerin MR cihazındaki uyumluluğu ve güvenilirliğinin sağlanması için, dipol momentinin idealde sıfır olması gerekmektedir.

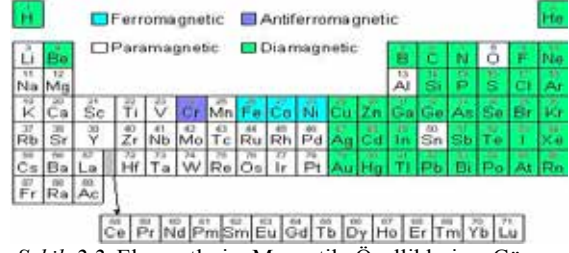
Ferromanyetik objeler; MR cihazına mıknatıs doğrultusunda 1 metreden daha yakına yaklaştırıldığında objenin ağırlığından 100 kat daha büyük bir kuvvetle 2-3 m mesafede 50 km/h hızla rotasyon şeklinde bir hareketlenme (tork) oluşabilir. Dolayısıyla, tarama odasında herhangi bir ferromanyetik objenin kesinlikle bulundurulmaması gerekmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Statik Manyetik Alan (B_0); ferromanyetik ekipmanlar ile etkileşime girerek oldukça tehlikeli durumlara sebep olabilmektedir.

Statik manyetik alan; ferromanyetik objelerde ciddi seviyelerde manyetik kuvvet ve torka sebep olmaktadır. Diamanyetik malzemelerde ise manyetik kuvvet ve tork oluşumu yok denecek kadar düşük seviyelerdedir. Bu nedenlerle medikal implantlar ve biyomalzemeler diamanyetik özellik taşıyacak şekilde tasarlanarak üretilmelidirler. Yüksek güçlü statik manyetik alan altındaki bir malzeme üzerinde oluşacak manyetik moment değeri ise malzemenin dipol momentine ve manyetik alanın şiddetine bağlı olarak hesaplanabilir.

Yapılan araştırmalara göre bahsi geçen bu etkiler içerisinde statik manyetik alanın, manyetik kuvvet ve tork etkisi ferromanyetik nesnelere için tehlike arz etmektedir. Günümüzde kullanılan medikal implant, protez, stent ve elektrot gibi ürünler ferromanyetik özellikte olmadıkları için bu durum ciddi bir tehlike teşkil etmemektedir. Şekil 2.2'deki periyodik tabloda elementler manyetizma özelliklerine göre gruplandırılmıştır.



Şekil 2.2 Elementlerin Manyetik Özelliklerine Göre Gruplandırılması

2.2. RF Etkili Isınma

RF manyetik darbelerinden yayılan enerji; vücut tarafından soğurularak dokunun ısınmasına yol açmaktadır. Özgül soğurma oranı (Specific Absorption Rate / SAR); vücut tarafından soğurulan elektromanyetik enerjinin W/kg biriminde ölçülmesi sonucu bulunan değerdir. Normal şartlar altında, insanlarda ve laboratuvar hayvanlarında 1°C' lik sıcaklık artışının, 4 W/Kg' lık SAR değerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ancak bu ısı artışı insanın ısı düzenleme kapasitesi aralığı içinde dengelenebilir. Aynı SAR değeri; önceden ortamda var olan ısı ve nemin olduğu çevresel şartlar altında 1 °C' lik artışa ve müsaade edilen normal seviyelerin çok üzerinde ısı artışlarına neden olabilir. Böylece vücutta istenmeyen ısı baskısından dolayı tepkiler hızlanabilir. Sıcaklık artışlarından korunmak için kılavuz olarak ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) kılavuzları, Dünya Sağlık Örgütüncü de kabul edilmiştir ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kılavuzda insan için 1°C' den fazla ısı artışı referans alınmış olup, bu eşik değerin ihlal edilmesi zararlı kabul edilmektedir [9].

RF etkili ısınmaların; deneysel çalışmalar ve bilgisayar benzetimleri ile araştırılmaları sürmektedir. MRG sırasında vücutta bulunan implantlar, termal yaralanmalar ile sonuçlanan şiddetli doku ısınmasına yol açabilmektedir. MRG sırasında RF etkili ısınmadan kaynaklanan yaralanma örnekleri oldukça fazladır.

2003 yılında; 1 T gücündeki bir cihaz aracılığı ile lomber spinal MR çekimi sırasında, intraserebral nörostimülator taşıyan bir kişinin kalcı olarak sakat kalmasına sebep olan, stimülator elektrodu ucunda 2-3 cm ebatında bir lezyon oluşmuştur [10]. RF etkili yanmalar, RF bobinlerinin yanlış bir şekilde bağlanması ve kullanılması ile ilgili olarak da rapor edilmiştir [11]. Öyle ki, iki bacağın veya iki kolun birbirine temas etmesi durumunda temas noktalarında yanıkların oluşması şeklinde sonuçlanan vakalar oluşmuştur.

SM Park ve ark.; MRG sırasında kullanılan elektrod ve vücuda yerleştirilmiş tıbbi kablolarda oluşan RF etkili ısınmayı, elektrik alan transfer fonksiyonu ile hesaplamışlardır. Isınma miktarının hem elektrik alanın genliği, hem de kablo yüzeyine tanjant olan elektrik alanın faz dağılımına bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Boyları 10 cm ile 25 cm arasında değişen 4 farklı boyuttaki kablolarla 6 dakika boyunca 64 ve 128 MHz frekansta elektrik alan uygulaması ve maksimum sıcaklık değişimini en uzun kabloda 15.3 °C olarak hesaplamışlardır [12].

K El Bannan ve ark.; MRG sırasında kullanılan zaman ile değişen gradient alanların etkisi ile çubuk yapıdaki metalik implantlarda meydana gelen ısınmayı incelemişlerdir. Bunun için aynı boyutlarda ancak farklı türde metalik malzemelerden üretilmiş 12 adet silindirik çubuk kullanmışlardır. Deneyleri ise gradient alanları metalik çubuklara dik olacak şekilde

Biyogüvenlik ve Biyomalzeme

3. Gün / 17 Ekim 2015, Cumartesi

uygulayarak gerçekleştirmişlerdir. 5 dakika boyunca uygulanan gradient darbeler sonucunda en küçük sıcaklık değişimini inkonel (Ni-Cr alaşımı) ve titanyum çubukta 0.12 °C olarak ölçmüşlerdir. En büyük sıcaklık değişimini ise alüminyum çubukta 2.45 °C olarak ölçülmüştür [13].

E Cabot ve ark.; 1.5 T manyetik alan altında bulunan derin beyin stimülatörlerinde oluşan RF etkili ısınmayı değerlendirmiştir. Bunun için paslanmaz çelik kutu ve dielektrik başlığa bağlı hem spiral hem de düz yapıda yalıtılmış kablodan oluşan bir derin beyin stimülatörü oluşturmuşlardır. MR ortamı için ise 64 MHz frekansta sinyal üreten bird cage coil kullanmışlardır [14].

MR Karaoğuz ve ark. ise manyetik rezonans ortamı için geliştirilmiş kalp pillerini incelemiştir. MR ortamında kullanılan statik manyetik alan, gradient manyetik alan ve radyofrekans alanların kalp pilleri üzerindeki etkilerini ayrı ayrı araştırmışlardır. MR cihazının kalp pili ve hastalarda meydana getirebileceği olumsuz durumların oluşmaması için MR cihazı kullanılırken uygulanması gereken hasta pozisyonu, gradient alan sınırı ve tarama bölgesinin kısıtlanması gibi bazı sınırlamaları değerlendirmişlerdir [15].

3. Sonuçlar ve Tartışma

Tıbbi amaçlı olarak kullanılan biyomalzemeler ve implantlar MR ortamında bulundurulduğunda, hastanın sağlığı için tehlike teşkil edecek riskler meydana gelmektedir. MR için tehlikeli olan, yapısı hakkında bilgi veren herhangi bir doküman bulunmayan aktif veya pasif implant özellikli stent, kalp kapakçığı, sternum telleri, kalp pilleri, oküler cihazlar ve tıbbi vidalar gibi biyomalzemelerde, 2. bölümde açıklanan tehlikeler mevcuttur. Bu tehlikelerin gerçekleşmemesi için, hastalarda kullanılacak bütün aktif ve pasif implantların MRG için güvenilir olup olmadığı kontrol edilmelidir. Test edilen malzemeler, ASTM'nin 2005 yılında geliştirdiği sınıflandırma kavramlarına göre etiketlenmelidir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 İmplantların etiketlenmesinde kullanılan terminoloji

MR Güvenilir	MR ortamında iken herhangi bir zararı bulunmayan plastik petri kabı gibi yalıtkan ve manyetik olmayan ürünlerdir.	
MR Koşullu	Özel olarak ayarlanan MRG parametreleri kullanılarak yalnızca izin verilen koşullarda görüntüleme yapıldığında herhangi bir zararlı etkisi bulunmayan ürünlerdir. Gradient ve RF alan gücü, SAR oranı ve ürün üzerinde özel fonksiyon ayarlamaları yapılması gerekmektedir.	
MR Tehlikeli	Ferromanyetik objeler gibi MR ortamında bulundurulması kesinlikle tehlikeli olan ürünlerdir.	

Sürdürmekte olduğumuz çalışmalarımızda, ilgili test ekipmanlarını kullanarak biyomalzemelerde RF etkili ısınma, manyetik kuvvet ve tork oluşumu gibi parametrelerin analizini yapmayı planlamaktayız. Sonlu elemanlar metodu ile tasarlanacak bilgisayar benzetimi aracılığı ile, mevcut biyomalzemelerde kullanılan farklı türdeki malzemelerin MR uyumluluğu ve güvenilirliği belirlenebilecektir. Sonuçta, hem

günümüzde kullanılan, hem de yeni tasarlanmakta olan bir biyomalzemenin MR uyumluluğu ve güvenilirliği analiz edilebilecektir.

4. Kaynakça

- [1] Shellock, F. G., "MR Safety update 2002: Implants and Devices", *J. of magnetic resonance imaging*, 16(5), 485-496, 2002.
- [2] Dempsey, M. F., & Condon, B., "Thermal injuries associated with MRI", *Clinical radiology*, 56(6), 457-465, 2001.
- [3] Irnich, W., Irnich, B., Bartsch, C., Stertmann, W. A., Gufler, H., & Weiler, G., "Do we need pacemakers resistant to magnetic resonance imaging?", *Europace*, 7(4), 353-365, 2005.
- [4] Klucznik, R. P., Carrier, D. A., Pyka, R., & Haid, R. W., "Placement of a ferromagnetic intracerebral aneurysm clip in a magnetic field with a fatal outcome", *Radiology*, 187(3), 855-856, 1993.
- [5] David W. Chen, "Boy, 6, Dies of skull injury during M.R.I.", *The New York Times*, B5, 31 July 2001.
- [6] Hardy, P. T., & Weil, K. M., "A review of thermal MR injuries", *Radiologic technology*, 81(6), 606-609, 2010.
- [7] Schaeffers, G., "Testing MR safety and compatibility", *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, 27(3), 23-27, 2008.
- [8] Syed, M. A., & Mohiaddin, R. H. (Eds.). "MRI of congenital heart disease", *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [9] ICNIRP, "ICNIRP statement on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz)". *Health Physics*, 97(3), 257-258, 2009.
- [10] FDA Maude database, "MDR Report Key 474005, event key 449284, report number 6000032-2003-00640, report, MDR Text key 1643682", *Silver Spring*, 2003.
- [11] Patel, M. R., Albert, T. S., Kandzari, D. E., Honeycutt, E. F., Shaw, L. K., Sketch Jr, M. H., & Kim, R. J. "Acute Myocardial Infarction: Safety of Cardiac MR Imaging after Percutaneous Revascularization with Stents" *1. Radiology*, 240(3), 674-680., 2006
- [12] Park, S. M., Kamondetdacha, R., & Nyenhuis, J. A. "Calculation of MRI-induced heating of an implanted medical lead wire with an electric field transfer function" *J. of MR Imaging*, 26(5), 1278-1285., 2007.
- [13] El Bannan, K., Handler, W., Chronik, B., & Salisbury, S. P. Heating of metallic rods induced by time-varying gradient fields in MRI. *J. of MRI*, 38(2), 411-416., 2013.
- [14] Cabot, E., Lloyd, T., Christ, A., Kainz, W., Douglas, M., Stenzel, G., ... & Kuster, N. "Evaluation of the RF heating of a generic deep brain stimulator exposed in 1.5 T MR scanners", *Bioelectromagnetics*, 34(2), 104-113, 2013.
- [15] Karaoğuz, M. R., Oğuz, D., & Altuner, T. K., "MR ortamı için geliştirilmiş kalp pilleri", *Türk Kardiyol Derneği Arş.*, 69-75, 2012.