

Kardiyovasküler cihaz taşıyan hastalarda manyetik rezonans görüntülemenin güvenliği

Safety of magnetic resonance imaging in patients with implanted cardiovascular devices

Dr. Serdar Demir, Dr. Serkan Yüksel, Dr. Mahmut Şahin

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kardiyoloji Anabilim Dalı, Samsun

Manyetik rezonans görüntüleme (MRG) radyolojik açıdan en ileri görüntüleme yöntemlerinden biridir. Kardiyovasküler cihaz taşıyan hastalarda, MRG sırasında istenmeyen etkileşimler sonucunda cihaz fonksiyonlarında ve tanısal bilginin kalitesinde bozulmalar olabilmektedir. Bu derlemede, kardiyovasküler cihaz taşıyan hastalarda MRG güvenliği gözden geçirildi.

Anahtar sözcükler: Elektromanyetik alan/yan etki; manyetik rezonans görüntüleme/yan etki/kontrendikasyon; protez ve implant; güvenlik.

Manyetik rezonans görüntüleme (MRG) radyolojik açıdan önemli görüntüleme yöntemlerinden biridir. Teknolojideki gelişmelerle birlikte son 20 yılda kullanımı gittikçe artan bir görüntüleme yöntemi olmuştur. Bu yöntemle her planda görüntü alınabilmesinin yanı sıra doku kontrastındaki sınırsız değişim ve 100 mikrona kadar inen uzaysal çözünürlük ile çeşitli sistemlerle ilgili çok yararlı tanısal veri sağlanmaktadır. Kas-iskelet sistemi, santral sinir sistemi ve kardiyovasküler sistemle ilgili birçok rahatsızlıkta MRG günümüzde en önemli tanı yöntemi olmuştur.^[1,2] Çeşitli tanılara yönelik olarak MRG yapılan hasta sayısı her geçen yıl artmaktadır. Aynı zamanda, toplumda yaşam süresinin uzaması, kalp pili (pacemaker) uygulaması ve ventriküler aritmi profilaksisi endikasyonlarındaki artış nedeniyle, kardiyovasküler cihaz takılan hasta sayısı da artmaya devam etmektedir.^[3-7]

Bu gelişmelerle birlikte, bütün dünyada olduğu gibi ülkemizde de kardiyolog ve radyologların daha yakın işbirliği içinde çalışma ihtiyacı da artmaktadır.

Manyetik rezonans görüntülemede radyofrekans (RF) dalgaları kullanılır. Güçlü bir manyetik alana uygu-

Magnetic resonance imaging (MRI) is one of the most advanced diagnostic methods of radiologic imaging. In patients with implanted cardiovascular devices, there can be device malfunction and deterioration in the quality of diagnostic data as a result of MRI-related interferences. This article aimed to review MRI safety in patients with implanted cardiovascular devices.

Key words: Electromagnetic fields/adverse effects; magnetic resonance imaging/adverse effects/contraindications; prostheses and implants; safety.

lan radyofrekans dalgaları hidrojen atomları ile iletişime girer ve bir süre sonra görüntüleme dönüştürülecek sinyaller yayarlar. Bu görüntüleme sırasında normalde insan sağlığına zararlı etkiler oluşmaz. Ancak, kardiyovasküler cihazlarla çeşitli etkileşimler oluşabilmekte, bu da sağlığı tehdit edici çeşitli yan etkilere yol açabilmektedir.

Hangi hastalarda güvenli bir şekilde MRG yapılabileceği konusunda kesin bir görüş birliğine henüz ulaşılamamıştır. Kalıcı kalp pili ve kardiyoverter defibrilatör (ICD) takılmış olmasının hali hazırda MRG için kontrendike bir durum oluşturduğu düşünülmektedir.^[8-10]

Manyetik rezonans kullanımına bağlı olgu sunumu şeklinde yayımlanan yaralanmalar ve bunların birkaçının ölümlü sonuçlanması, MRG güvenliği kılavuzlarının takip edilmemesi ve güncel olmayan bilgilerin kullanımı nedeniyle olmaktadır. Kardiyovasküler cihazları olan hastalarda MRG güvenliği konusundaki sorunları aydınlatmak ve özetlemek amacıyla raporlar hazırlanmıştır. Kardiyovasküler cihazlarda MRG güvenliği ile ilgili olarak internet kaynaklarında da konu ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

Geliş tarihi: 06.04.2008 Kabul tarihi: 27.06.2008

Yazışma adresi: Dr. Serdar Demir, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kardiyoloji Anabilim Dalı, 55139 Samsun.
Tel: 0362 - 312 19 19 / 2717 Faks: 0362 - 000 00 00 e-posta: drserdardemir@yahoo.com

Genel güvenlik konuları

MRG ile ilişkili riskler genellikle üç temel mekanizma ile açıklanabilir.

1. Statik ana manyetik alan
2. Radyofrekans enerji
3. Gradyent manyetik alanlar

MRG sırasında spesifik kardiyovasküler cihazlara yönelik olarak yukarıdaki bu durumlarla ilişkili olarak birçok potansiyel risk vardır.^[8,11-21]

Statik manyetik alan

Günümüzde kullanılan MRG cihazlarının birçoğu 1.5 ve 3 Tesla cihazlardır ve bu cihazlar dünyadaki manyetik alandan 30 bin ile 60 bin kat daha güçlü bir manyetik alana sahiptir.^[22] Ana manyetik alandaki en büyük risk, ferromanyetik nesnelere üzerinde yarattığı çekim kuvvetidir. “Ferromanyetik” terimi, manyetik alan varlığında çekim kuvvetine maruz kalan tüm maddeler için kullanılmaktadır. Ferromanyetik elementlerden en iyi bilineni demirdir. Bu yüzden, manyetik materyaller demirin kısaltması olan “ferro” öntakısıyla kullanılarak adlandırılır. Kobalt (Co), disporosyum (Dy), nikel (Ni) ve gadolinyum (Ga) güçlü ferromanyetik elementlerdir. Bazı materyallerin ise ferromanyetik özelliği ya zayıftır ya da hiç yoktur. Kardiyovasküler cihazların birçoğunun (hepsi değil) ferromanyetik özelliği zayıftır ya da yoktur. Ferromanyetik etkileşimler sonucunda cihaz hareket edebilir, kendi etrafında dönebilir, yerinden oynayabilir ya da kırılabilir doğru yönelebilir. Çelik, demirden üretilmesine karşın ferromanyetik özelliği güçlü değildir. Bu yüzden, çeşitli biyolojik implantlarda çelik kullanılır. Ancak, makas ve klemp gibi cerrahi aletler paslanmaz çelikten yapılmış olsalar

dahi manyetik alanda hareket ederler. Manyetik rezonans sistemindeki statik manyetik alan arttıkça, zayıf ya da bariz ferromanyetik maddelerin maruz kaldığı ferromanyetik güçler artmaktadır. Bu yüzden, MR odasında kullanılacak aletler de ferromanyetik olmayan materyalden yapılmış olmalıdır. İşlem odasında kardiyak arrest gelişen hastada MR ile uyumlu resüsitasyon ekipmanı yoksa, işe hastayı MR odasından çıkarmakla başlanmalıdır.

Olası kazaların önlenmesi için MR güvenlik sahası dört bölgeye ayrılmıştır (Şekil 1).^[17]

I. Bölge: Bu alan halka açıktır ve MR çevresinin dışındadır. Hastalar, sağlık personeli ve MR merkezi çalışanlarının girebileceği yerdir.

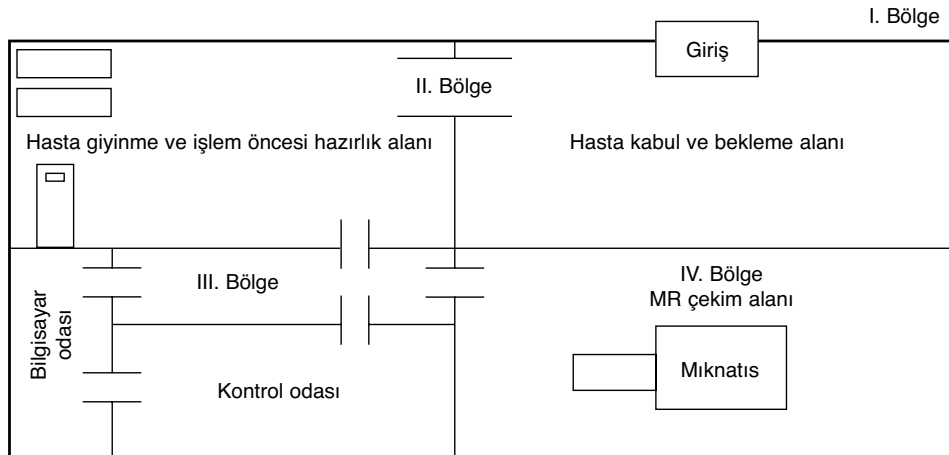
II. Bölge: Bu alan kontrol edilmeyen I. bölge ile sıkıca kontrol edilen III ve IV. bölgeler arasında halka açık olan bir ara geçiş bölgesidir.

III. Bölge: Bu alanda ferromanyetik nesnelere ya da teçhizat ciddi kazalara ve hatta ölümlere yol açabilir. Bu yüzden, halka ve MR personeli dışındaki kontrolsüz personele kısıtlanmalıdır.

IV. Bölge: Bu alan MR cihazının olduğu alandır. Burada acil tıbbi müdahale ve resüsitasyon gereken kalp ve solunumun durması durumunda, uygun şekilde eğitilmiş ve sertifikalı MR personeli, hasta IV. bölgeden güvenli bir alana taşınırken kısa süre içinde temel yaşam desteğini başlatabilmelidir.

Radyofrekans enerji

Görüntüleme sırasında RF enerji, MR görüntüsü elde etmek amacıyla vücuda aralıklı olarak uygulanır. Bu enerjinin bir kısmı vücut tarafından emilir ve bir miktar ısı artışı ortaya çıkar (genellikle 1 °C'den az). Radyofrekans enerjisini karakterize etmek için



Şekil 1. Manyetik rezonans güvenliği bölgelerinin şematik gösterilişi (Kanal ve ark.^[17] tarafından yayımlanan “ACR Guidance Document for Safe MR Practices: 2007” adlı yazıdan modifiye edilmiştir).

kullanılan dosimetrik terim SAR (specific absorption rate) watt/kg olarak ölçülür.^[23] SAR alan kuvvetinin karesi ile artar. Bazı metalik cihazlar (örneğin leadler), bir anten gibi davranarak bu enerjiyi daha fazla çekerler; bu durum özellikle uç kısımda aşırı lokal ısınmaya neden olur. Swan-Ganz (pulmoner arter) termodilüsyon kateterinin ısınması bu etkileşime örnek olarak verilebilir.^[24] Ayrıca, tel ve leadler (özellikle halka şekline getirilmiş halde bırakılanlar) gibi elektriksel olarak iletken implantlarda bu sorun belirgindir. Kıvrılmış leadler termal hasar açısından yüksek risklidir. Radyofrekans enerjisi ayrıca lead ve tellerde elektrik akımına neden olarak aritmileri indükleyebilir.^[22]

Gradyent manyetik alanlar

Zamanla değişen manyetik alanlar gradyent olarak adlandırılır (dB/dt, tesla/sn olarak ölçülür). Gradyentler ana statik manyetik alanla karşılaştırıldığında çok daha zayıf olmasına rağmen, tekrarlayıcı ve hızlı ve sürekli bir on-off özelliği gösterirler. Gradyentlerin neden olduğu hızla değişen manyetik alanlar iletken cihazlarda elektrik akımına ve bazen de periferik sinirlerin uyarılmasına neden olabilir. Günümüzdeki MRG cihazları kardiyomiyositleri doğrudan uyaracak düzeyde çalışmamalarına rağmen, gradyentler elektriksel olarak iletken tellerde ve kablolarda akımı indükleyerek çeşitli aritmiler oluşturabilir.^[22]

Manyetik rezonans görüntülemenin risk belirlenmesinde cihazın yerleşiminin çekim yapılacak bölgeye olan uzaklığı önemlidir. Görüntüleme sırasında oluşabilecek risklerin daha iyi anlaşılabilmesi için MRG fiziği konusunda bilgili bir uzmana ihtiyaç vardır. Örneğin, bazı beyin görüntülemeleri teorik olarak, torakstaki kalp pili ve leadler üzerinde oldukça yüksek gradyent oluşturabilir. Bu yüzden, özellikle cihaz ve yerleşimi nedeniyle göreceli olarak kontrendikasyon oluşturan ve cihaz yerleşiminin çekim bölgesinden farklı olduğu durumlarda MR fiziği ve MR güvenliği konularında tecrübeli bir uzmana danışılması önerilmektedir.

Ayrıca, MR cihazının güçlü manyetik alanı, elektriksel olarak iletken kan akımını artırarak düşük voltaj değişiklikleri oluşturur ve bu da ST-segment ve T dalga değişikliği gibi EKG anormallikleri ve hatta aritmilere neden olabilir.

İşlem öncesi hastaların taranması

İşlem öncesi tüm hastalar, daha önceden takılmış tüm cihazlar açısından MR güvenliği konusunda bilgili bir sağlık çalışanı tarafından sorgulanmalıdır.

Yatan hastalarda ise geçici cihazlar ve kateterlere dikkat edilmelidir. İstenmeyen bir duruma neden olmamak için, MR incelemesi öncesinde sistematik bir tarama yapılmalıdır. Bu tarama ideal olarak üç adımda tamamlanmalıdır.

Birinci adımda, hastaya randevu verilmesi sırasında ilgili sekreter veya radyolog ya da incelemeyi isteyen hekim başlıca güvenlik noktalarını (kalp pili, elektronik aletler ve gebelik) vurgular.

İkinci adımda, MRG ünitesine geldiğinde hastaya form doldurulur. Bu form, hasta ile iletişim kurulmıyorsa, hasta yakını, o da yoksa hasta hakkında bilgi sahibi hekim tarafından doldurulmalıdır. Bu form MRG'nin potansiyel tehlikeleri konusunda eğitilmiş teknisyen ve doktorlar tarafından incelenir.

Üçüncü adımda, incelemeyi yapacak olan teknisyen MRG odasına girmeden önce hastayı inceler, kısaca sorgular ve tarama işlemi tamamlanır.

Güvenilirlik terminolojisi

FDA (Food and Drug Administration) bünyesindeki Radyolojik Sağlık ve Cihazlar Merkezi (Center for Devices and Radiological Health) 1997 yılında, MR ortamının güvenliği için bir terminoloji geliştirmiştir (Tablo 1).^[25] Zaman içinde bu terminolojinin yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Terminolojiye açıklık getirmek ve daha önemlisi yanlış kullanımların hastalarda ciddi kazalara yol açmasını önlemek için ASTM International (American Society for Testing and Materials) tarafından yeni bir terminoloji geliştirilmiştir (Şekil 2, Tablo 1).^[26]

Eski terminolojiye göre cihazlar,

- MR güvenli,
- MR uyumlu,

Yeni terminolojiye göre ise,

- MR güvenli,
- MR şartlı (koşullu),
- MR güvenli olmayan, olarak etiketlenmiştir.



Şekil 2. IV. bölgeye alınacak taşınabilir nesnelere ilişkin ASTM International (American Society for Testing and Materials) tarafından geliştirilen FDA (Food and Drug Administration) paketleme kriterleri. Soldaki kare, MR güvenli olan tamamen non-metalik olan nesnelere için, ortadaki üçgen etiketi MR koşullu nesnelere için, sağdaki etiket ise MR güvenli olmayan nesnelere için geliştirilmiştir.

Tablo 1. Vücuda takılı cihazları etiketlemek için kullanılan eski ve yeni terminoloji

Eski terminoloji	
MR güvenli	Cihaz MR ortamında kullanıldığında hastaya hiçbir ek risk getirmemektedir. Ancak, tanısal bilginin kalitesini etkileyebilir.
MR uyumlu	Bir cihaz eğer MR güvenliyse ve cihaz manyetik bir alanda kullanıldığında ne tanısal bilginin kalitesi ne de kendi işlemleri etkilenmiyorsa MR uyumlu kabul edilir.
Yeni terminoloji	
MR güvenli	MR ortamında herhangi bir tehlikesi yoktur. MR güvenli olarak etiketlenen cihazlar yalıtkan non-metalik, non-manyetik materyallerdir (plastik petri kabı, vb.).
MR koşullu	Çeşitli kullanım koşullarında MR ortamında bilinen hiçbir tehlikesi olmayan cihazlardır. Bu koşullar şunlardır: Statik manyetik alan gücü, spasyal (uzaysal) manyetik gradiyent, dB/dt (zamana göre değişiklik gösteren alanlar), radyofrekans alanlar ve SAR (specific absorption rate).
MR güvenli olmayan	Bütün MR ortamında tehlikeli olan cihazlardır. Örneğin ferromanyetik makas.

Cihaz takıldıktan sonra MR görüntüleme

Genel olarak, eğer cihaz ferromanyetik olmayan materyalden imal edilmiş (titanyum, nitinol, vb.) “pasif” bir implant ise (elektronik ve manyetik aktif komponenti yoksa) ve MR ilişkili ısınma ile ilgili bir endişe yoksa, hasta implantasyon sonrası hemen çekime alınabilir.

Ferromanyetik özelliği zayıf olan cihaz takılan yapılan hastalar konusunda bir görüş birliği yoktur. Bu cihazlarda MR çekimi sırasında hareket ve yer değiştirme teorik olarak mümkündür. İntravasküler koiller ve stentler gibi damar duvarı ve komşu dokuya sıkıca tutunan cihazlar, MR çekimi sırasında oluşana göre daha yüksek hemodinamik güçlere (kalp atımı ve kan akımı gibi) maruz kalırlar. Cihaz takıldıktan sonra birkaç hafta süren doku iyileşmesinin bu cihazların stabilitesini ve tutunmasını artırdığına inanılmaktadır. Bu yüzden, bu tip cihazlarda MR çekimi öncesi yaklaşık altı hafta beklenmesi önerilmektedir.

Ferromanyetik özelliği zayıf olan bazı cihazlarda, takıldıktan sonra herhangi bir zamanda MR çekimi yapılabileceği konusunda yeterince veri vardır. Ancak, yeterince veri olmayan cihazlar konusunda, hekimin hastanın durumuna göre karar vermesi önerilmektedir. Eğer hastaya kesin olarak bir yarar sağlayacaksa (akut bel ağrısı, alt ekstremitede güçsüzlük, travma, vb.), MR çekimi yapılmalıdır. Çekimin hastanın durumunda önemli bir değişiklik yapmayacağı durumlarda yaklaşık altı hafta beklenmelidir.

Koroner arter ve periferik vasküler stentler

Birçok koroner arter ve periferik vasküler stent 316L paslanmaz çelik ya da nitinolden imal edilmiştir. Daha nadir olarak bazı stentler platin, kobalt alaşımı, altın, tantalum, MP35N ve diğer materyalleri içermektedir. Çoğu koroner ve periferik stentin ferro-

manyetik özelliği yoktur ya da zayıftır. Günümüzde karotis arter için kullanılan stentler nitinolden yapılmıştır ve ferromanyetik özelliği yoktur ya da zayıftır. Stent, takıldıktan sonra damara hemen tutunur. Genel olarak 6-8 hafta süren doku gelişimi sonrası damara tutunmasının daha da güçlendiği düşünülmektedir. Bu olaya bağlı olarak, hastalara stent takılmasını takiben 6-8 hafta sonra MR çekimi önerilmesine rağmen, bu süreyi destekleyen yeterli klinik veri yoktur.

Bir *ex vivo* çalışmada, 1.5 teslada, 19 farklı koroner stentten ikisinin ferromanyetik özellik taşımadığı, 17'sinin de düşük derecede ferromanyetik olduğu gösterilmiştir.^[27] Farklı koroner stentlerle yapılan diğer *ex vivo* çalışmalar da MR'nin koroner stentlerde güvenli olabileceğini göstermiştir.^[28-31] Üç tesla'da ferromanyetik özellikler gösteren paslanmaz çelik Zenith/Cook iliyak stent (Cook) dışındaki periferik vasküler stentlerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.^[11,32,33] Çalışmalarda MR incelemesi sonrası subakut ya da geç stent trombozu izlenmemiştir.^[31,34-37]

Sık olarak kullanılan ilaç salınımlı stentlerle (2005 ve 2006'da imal edilen Cypher, Taxus Express, Taxus Liberte, Endeavor) yapılan *ex vivo* çalışmalarda ferromanyetik özellik izlenmediğinden, stent takılması sonrası MR çekimi için beklemeye gerek yoktur.^[11,38-40] Stent ısınmasının değerlendirildiği çalışmalarda ise, sadece hafif ya da orta derecede ısınma (tek stentlerde <1 °C, iki uzun, üst üste gelen stentlerde <2 °C) izlenmiştir.^[22] Manyetik rezonans çekiminin ilaç ya da polimer kaplama üzerine etkisi bilinmemektedir.

Birçok koroner ve periferik vasküler stent “MR güvenli”, geri kalanlar ise “MR koşullu” olarak etiketlenmiştir.^[41] Ferromanyetik özellikli olmayan stent takılmış hastalarda, herhangi zamanda 3T ve altındaki cihazlarla MR çekimi yapılabilir. Hafif

derecede ferromanyetik stentlerde ise 3T ve altındaki MR cihazlarında yapılacak çekimler için hastanın kliniğine göre karar verilmelidir.

Aortik stent greftler

Endovasküler aortik stentlerin çoğu ferromanyetik ya da zayıf ferromanyetik materyallerden yapılmıştır. Bir *ex vivo* çalışmada, bazı EndoFit stentler dışındaki aortik stentler 3.0 teslada ferromanyetik bulunmamış ya da zayıf ferromanyetik özellik sergilemiştir.^[42] Endovasküler stentlerin MR incelemesindeki pratik yaklaşım, stent greftlerinin metabolik komponentlerinin indüklediği manyetik duyarlılık etkileri (artefaktlar) ile ilgilidir. Çoğu stentin oluşturduğu artefakt düşük derecededir; bu durum stent içi lümeni ve stent içi sızıntı bulgularını görüntülemeye imkan tanır. Üç stent grefti için (Zenith AAA endovasküler grefti, Cook; Endologix AAA stent, Endologix; Lifepath AAA stenti, Edwards Life-Sciences Corp.) stent içi lümeni ve çevre dokularda değerlendirmeyi sorunlu hale getiren şiddetli artefaktlar bildirilmiştir.^[43]

Birçok aortik stent grefti “MR güvenli” olarak etiketlenmiştir. Sadece “Zenith AAA endovasküler greft stenti “MR güvenli değil” olarak etiketlenmiştir.^[11,43] Ferromanyetik olmayan stent taşıyan hastalarda, herhangi bir zamanda 3T ve altındaki cihazlarla MR çekimi yapılabilir. Hafif derecede ferromanyetik stentlerde ise 3T ve altındaki MR cihazlarında yapılacak çekimler için hastanın kliniğine göre karar verilmelidir.

Prostetik kalp kapakları, anüloplasti halkaları ve sternal tel dikişler

Prostetik kalp kapakları ve anüloplasti halkaları değişik materyallerden yapılmaktadır. Biyoprostetik kapaklar ise primer olarak metalik olmayan (domuz dokuları ya da sığır perikardiyumu gibi) materyal içerir; çok az miktarda metal de içerebilir. Mekanik kalp kapakları titanyum alaşımı, MP35N, pirolitik karbon Elgiloy, krom kobalt alaşımı, nitinol, 316 paslanmaz çelik ve 316LVM paslanmaz çelik içerebilir.^[11,42,44-46] Bazı anüloplasti halkaları metal içermez; bazıları ise titanyum, krom, kobalt ve diğer metalik materyal içerebilir.^[11,47]

Isınma ve artmış olan akım bu implantlar için sorun yaratmamaktadır.^[47] Yapılan çalışmalarda prostetik kapaklarda MR çekimi ile kapakta ciddi bir ayrılma ya da ısınma saptanmamıştır.

Protez kapak ve anüloplasti halkaları üzerine etkilenen çekim gücü, atan kalp üzerine uygulanana kıyasla düşüktür. Son zamanlarda, metalik kapaklarda elektromanyetik etkileşim olabileceğini teorik olarak

belirten yayınlar vardır. Temel olarak, ferromanyetik olmayan herhangi bir metal manyetik alanda hareket ederken, orijinal manyetik alana karşı bir manyetik alan geliştirir (Lenz etkisi). Buna göre, 1.5 tesladan büyük MRG sistemlerinde metal kapakçık içeren protez kapaklarda sorun oluşabileceği düşünülebilir. Ancak, bu sorunun görüldüğü herhangi bir olgu bildirilmemiştir. Bütün anüloplasti halkaları ve protez kapakların 1.5 teslada MRG'ye uyumlu olduğu söylenebilir.^[11,42,45,46,48] Yine, 3 teslada da kapak ve anüloplasti halkalarında MR ile ilişkili ısınma ve manyetik alan etkileşimi izlenmemiştir.^[11,42]

Birçok prostetik kapak “MR güvenli” olarak, diğerleri ise “MR koşullu” olarak etiketlenmiştir.^[41] Çalışmalarda elde edilen verilere göre, prostetik kalp kapakları ve anüloplasti halkaları, yerleştirmeden sonra herhangi bir zamanda 3T ve altındaki MR çekimi için bir kontrendikasyon oluşturmamaktadır.

Kardiyak kapatma ve oklüder cihazları

Kardiyak kapatma ve oklüder cihazları genellikle nitinol, titanyum, 316L ve 304V paslanmaz çelik içermektedir. Ayrıca, metalik olmayan materyaller ve diğer materyaller de bu cihazlarda sıklıkla kullanılmaktadır.^[11,41,48-50] 304V çelikten yapılan cihazlar 1.5 teslada hafif ferromanyetik özellikler göstermiştir. Titanyum ve nitinol içeren cihazlar ise ferromanyetik değildir.^[11,48,50] Birçok kapatma cihazı 3 teslada incelenmiş, kabul edilebilir sapma, dönme ve MR ile ilişkili ısınma gözlenmiştir.^[11,50]

Kardiyak kapatma ve oklüder cihazların birçoğu “MR güvenli”, birkaçı ise “MR koşullu” olarak etiketlenmiştir.^[41] Ferromanyetik olmayan cihaz takılan hastalara işlem sonrası herhangi bir zamanda MR çekimi yapılabilir. Zayıf ferromanyetik özelliğe sahip cihazlarda MR çekimi ise hastanın kliniğine göre değerlendirilmelidir. Eğer hastaya kesin olarak bir yarar sağlayacaksa (akut bel ağrısı, alt ekstremitede güçsüzlük, travma, vb.), MR çekimi yapılmalıdır. Çekimin hastanın durumunda önemli bir değişiklik yapmayacağı durumlarda (kronik bel ağrısı) yaklaşık altı hafta beklenmelidir.

Inferior vena kava filtreleri

Birçok inferior vena kava (İVK) filtresi ferromanyetik olmayan maddelerden yapılmıştır; fakat, zayıf ferromanyetik materyaller içeren filtreler de vardır. Bu filtreler damar duvarına özel kancalar vasıtasıyla tutunurlar. Şimdiye kadar MR çekimi ile ilgili bir komplikasyon bildirilmemiştir. Hem insan hem hayvan çalışmalarında MR çekimlerinde komplikasyon

ya da filtrede semptomatik olacak yer değiştirme izlenmemiştir.^[51-56]

Birçok İVK filtresi “MR güvenli” olarak, diğerleri ise “MR koşullu” olarak etiketlenmiştir.^[41] Ferromanyetik olmayan filtrelerin kullanıldığı hastalarda işlem sonrası herhangi bir zamanda MR çekimi yapılabilir. Hafif ferromanyetik özellikleri olan filtrelerin (Gianturco bird nest IVC filter, Cook; stainless steel Greenfield vena cava filter, Boston Scientific) kullanıldığı hastalarda ise en az altı hafta beklenmesi önerilmektedir.

Embolizasyon koilleri

İlk üretilen koiller paslanmaz çelikten imal edilmişti. Günümüzdeki koiller ise platin ya da diğer alaşımları içermektedir. Sık kullanılan koiller genellikle ferromanyetik değildir ya da zayıf ferromanyetik özelliklere sahiptir. Koillerin şeklinden dolayı, teorik olarak MR çekimi sırasında ısınma potansiyeli vardır. Bir *ex vivo* çalışmada, Guglielmi Detachable Coil (Boston Scientific) ile MR çekimi sırasında manyetik alan etkileşimi izlenmemiş ve ısı artışı çok hafif bulunmuştur.^[57] Nitinol, platin ve iridyumdan yapılan embolizasyon koilleriyle yapılan çalışmalarda ise 3T ve altındaki MR cihazları ile herhangi bir komplikasyon bildirilmemiştir.^[11,17,58-61] Paslanmaz çelikten oluşan koillerde MR çekimi lokal artefakta yol açabiliyorken, platinden oluşan koillerin bazıları ile daha az artefakt oluşur, hatta bazıları ile artefakt oluşmaz ve tanınabilirliğin kalitesi bozulmaz.^[11,17,58-61]

Birçok embolizasyon koili “MR güvenli” olarak, diğerleri ise “MR koşullu” olarak etiketlenmiştir.^[41] Ferromanyetik olmayan koillerin kullanıldığı hastalarda işlem sonrası herhangi bir zamanda MR çekimi yapılabilir. Zayıf ferromanyetik özelliğe sahip koillerde ise hastalar kliniğine göre değerlendirilmelidir.

Olay monitörleri (loop recorder)

9526 Reveal Plus Insertable Loop Recorder (ILR, Medtronic) tek kullanımlık, subkütan olarak yerleştirilen, sadece iki yüzeyel elektrodu bulunan sürekli EKG monitörizasyonu yapabilen bir cihazdır. Reveal Plus ILR lead içermez. Fakat, MR çekimi sırasında oluşan manyetik alan cihazda yüklü bilgiye zarar verebilir. *Ex vivo* çalışmalarda cihazın pozisyonunda herhangi bir değişme izlenmemiştir.^[62]

Reveal Plus ILR cihazı “MR koşullu” olarak etiketlenmiştir.^[41] Cihazın yerleştirilmesinden sonra hastalar herhangi bir zamanda MR çekimine girebilir. Çekim öncesi kaydedilen tüm veriler cihazdan aktarılmalı-

dır. Cihaz hafif ferromanyetik özellik gösterdiğinden, çekim sırasında cihazın pozisyonunda hafif değişme hissedilebileceği hastaya çekim öncesi bildirilmelidir.

Hemodinamik izlem cihazları ve geçici kalp pilleri

Pulmoner arter hemodinamik izlem/termodilasyon kateterleri (Swan-Ganz kateteri, Edwards Lifesciences, vb.) ve geçici transvenöz kalp pili cihazları genellikle ferromanyetik materyal içermezler; fakat, ferromanyetik olmayan elektriksel iletken materyaller içerebilirler.^[11,63,64] Bu kateterler MR çekimi sırasında ısınarak termal hasara ve yanıklara neden olabilirler.^[65,66] Teorik olarak, vücutta bırakılan epikardiyal geçici kalp pili leadlerinin kardiyak uyarılma ve termal hasara neden olabileceği düşünülse de, kısa olmaları ve geniş halkalar oluşturmamaları nedeniyle MR çekimi sırasında bir sorun olmayacağına inanılmaktadır. Şimdiye kadar, vücutta bırakılan epikardiyal leadli olan hastalarda MR çekimi ile herhangi bir komplikasyon bildirilmemiştir. Hartnell ve ark.^[64] geçici epikardiyal kalp pili takılan 51 hastada MR incelemesi ile aritmi ve diğer kardiyak disfonksiyon izlenmediğini bildirmişlerdir.

Literatürde Swan-Ganz kateteri ile MR çekimi sırasında derinin giriş yerinde yanma izlenen bir olgu bildirilmiştir.^[24] Bu komplikasyonun, MR sisteminde yayılan RF enerjinin kateterdeki bakır tellerde ısınmaya neden olması sonucu oluştuğu düşünülmüştür. Bir *ex vivo* çalışmada, transvenöz geçici leadlerde 63.1 °C artış bildirilmiştir.^[67]

Şimdiye kadar, geçici kalp pili sistemlerinin (lead ve eksternal pacemaker) güvenliğini değerlendiren bir çalışma yoktur. Geçici leadler sabit olmadığından çekim sırasında hareket edebilir; ayrıca, daha uzun leadler akım iletimine daha fazla maruz kalır ve teknolojik açıdan daha geri olan jeneratörler elektromanyetik etkileşimden daha fazla etkilenebilir.

İletken tel içeren kateterler ve geçici kalp pili telleri “MR güvenli değil” olarak etiketlenmiştir.^[41] Pulmoner arter hemodinamik izlem/termodilasyon kateteri ve iletken telleri olan kateter takılı hastalara, potansiyel risklerden dolayı MR incelemesi yapılmamalıdır. Ancak, elektriksel olarak yalıtkan materyallerden oluşan ve ferromanyetik olmayan pulmoner arter kateteri olan hastalarda MR incelemesi yapılabilir.

Kalıcı kalp pilleri ve ICD'ler

Kalıcı kalp pili takılı hastalarda MRG yapılması için genel kurallar açık değildir ve günümüzde halen

Tablo 2. Kalıcı kalp pili, kardiyak resenkronizasyon cihazları ve takılabilir kardiyoverter defibrilatörler üzerine MRG'nin potansiyel etkileri^[68]

1. Statik manyetik alanlar	Ferromanyetik komponentler üzerindeki mekanik güçler Beklenmedik manyetik sensör aktivasyonu, reed-switch fonksiyonunun kapanması (Reed switch fonksiyonu, pilin elektromanyetik alan karşısında nasıl davranacağına önceden programlanmasıdır.) Elektrokardiyogramda değişiklikler
2. Modüle radyofrekans (RF) alanlar	Lead elektroduna yakın kalp dokusunda ısınma Yaşamı tehdit edici aritmilerin indüksiyonu (çok nadir) Cihazla RF etkileşim (over-/undersensing)
3. Gradyent manyetik alanlar	Yaşamı tehdit eden aritmilerin muhtemel indüksiyonu Lead üzerinde indüklenmiş voltajlar over-/undersensing'e yol açar
4. Alanların kombine etkileri	Elektromanyetik etkileşim nedeniyle cihaz fonksiyonlarının bozulması Mekanik kuvvetler (vibrasyon) Cihazın elektronik sıfırlanması Kalp pili/ICD ve/veya lead hasarı

araştırma aşamasındadır. Kalıcı kalp pili olanlarda “Kalp pili MRG açısından güvenli olabilecek şekilde programlanabilir mi? MRG’ye dirençli kalp pili yapı-lana kadar bekleyecek miyiz? Kalp piline bağımlı hastalarda 0.5 teslanın üzerindeki manyetik alanlarda ne yapılabilir? Neden sadece kalp pilleri modifiye edilmeli, MR cihazları da modifiye edilemez mi?” gibi yanıtlanması gereken çok sayıda soru vardır.

Kalıcı kalp pilleri ve ICD’ler, değişken ferromanyetik özellikleri olan metaller, kompleks elektrik sistemleri ve miyokarda yerleştirilmiş olan en az bir adet lead sisteminden oluşur.

Kalıcı kalp pili, kardiyak resenkronizasyon cihazları ve takılabilir kardiyoverter defibrilatörler üzerine MRG’nin çeşitli potansiyel etkileri vardır (Tablo 2).^[68] Bu etkilere bağlı olarak, cihazlarda ve taşıyıcılarda çeşitli sorunlara yol açabilir.

Bu hastalarda, yukarıdaki potansiyel nedenlerden dolayı MRG sırasında cihazın yerinden oynaması, programında değişiklikler, asenkron pacing, taşiaritmi terapilerin aktivasyonu, pacing inhibisyonu ve leadlerde akımın indüksiyonu ile kardiyak ısınma ve uyarılma gibi sorunlar ortaya çıkabilir.^[8-10,69-73] Bu sorunlar, pacing ve defibrilasyon eşiklerinde değişikliklere, pil ve ICD fonksiyon bozukluklarına ve hasarına (bataryanın tükenmesi gibi), aritmi ve ölüme yol açabilir.^[73-77] Pil ve ICD taşıyan hastalarda MR çekimi sırasında ölümler bildirilmiş; bu ölümlerin çekim sırasında hastayı izleyen bir hekim olmadığı durumlarda görüldüğü belirtilmiştir.^[22]

Manyetik rezonansın pil/ICD üzerine etkilerinin değerlendirildiği çeşitli *in vitro*, *in vivo* ve deneysel hayvan çalışması vardır. Achenbach ve ark.nın^[67] çalışmasında 11 kalp pili ve 25 lead değerlendirilmiş, asenkronöz pacing modunda (VOO/DOO) kalp pillerinde işlev bozukluğu saptanmamış, VVI ve DDD modlarında ise inhibisyon ve hızlı pacing izlenmiştir. Hızlı pacingin nedeni tam olarak anlaşılmasına rağmen, yazarlar, pil çıkış devresine giren RF enerjinin defibrilatör koruma devresi yoluyla ya da çıkış devresinin normal karakteristiğinin engellenmesiyle miyokarda geri dönmesine bağlamışlardır. Nitekim pilli hastalarda ölümle sonuçlanan MR uygulamalarına ilişkin raporlarda, ölüm nedeninin yüksek hızlardaki (run-away) uyarı (300/dk üstünde) olduğu bildirilmiştir. Pil elektrodunun bir anten gibi davranıp RF sinyallerini çekmesi aşırı hızlanmalara neden olabilmektedir.^[68]

Klinik insan çalışmaları ise nispeten azdır. Son yıllarda yapılan küçük prospektif insan çalışmalarında 0.5-2.0 tesla gücündeki MR ile yapılan incelemelerin kalp pili olanlarda nispeten güvenli olduğu bildirilmiştir.^[22]

Martin ve ark.^[75] kalp pili olan 54 hastada 1.5 T gücündeki MR ile toplam 62 inceleme yapmışlar, işlem öncesi ve sonrası pil fonksiyonlarını incelemişler, inceleme sırasında kalp ritmi monitörizasyonu yapmışlardır. Pile bağımlı olan hastaların alınmadığı bu çalışmada, 107 leadin 40’ında pacing eşik değişiklikleri izlenmiş, 10 önemli eşik değişikliğinden ikisi programlanmış outputta değişiklik gerektirmiştir.

Tablo 3. ICD ve kalp pili olan hastalarda MRG incelemesi ile ilgili öneriler^[22]**Genel öneriler**

- MRG gerekliliği açısından radyolog ve kardiyolog tarafından görüş birliği sağlanmalıdır.
- Pile bağımlı olmayan (düşük riskli) hastalarda, güçlü klinik endikasyon varsa ve yarar zarardan fazlaysa MRG incelemesi yapılabilir.
- Pile bağımlı olan (çok yüksek riskli) hastalarda, çok zorunlu şartlar olmadığı sürece ve yarar zarardan fazla değilse MRG incelemesi yapılmamalıdır. Altta yatan ritim çok yavaş ise endikasyon gözden geçirilmelidir.
- Pile bağımlı olmayan ICD'li (düşük risk) hastalarda, çok zorunlu şartlar olmadığı sürece ve yarar zararı aşmadıkça MRG incelemesi yapılmamalıdır.
- İnceleme, MRG ve elektrofizyoloji konusunda ileri derece uzmanlaşmış ekibin olduğu merkezlerde yapılmalıdır.
- Hasta için yarar-zarar hesabı yapılmalıdır.
- Hastanın bilgilendirilmesinden sonra yazılı veya sözlü onayı alınmalıdır. Bu belgede, (i) kalp pili ya da ICD fonksiyon bozukluğu, (ii) Pil/ICD hasarı, (iii) aritmi, (iv) ölüm gibi riskler özel olarak listelenmelidir.
- İleri kardiyak yaşam desteği konusunda uzman bir hekim ve kalp pili/ICD uzmanı olan bir hekim MRG incelemesinden önce kalp pili ve ICD'nin yeniden programlanmasına gerek olup olmadığına karar vermelidir.
- MR fiziği ve güvenliğinde uzman olan bir kişi, tarama sırasında riskleri en düşük düzeye çekmek için hazır bulunmalıdır. Bu uzman kişi gereğinde çalışmanın riskini azaltacağını düşündüren tarama parametrelerini gözden geçirmelidir (örneğin düşük RF güç seviyeleri, gereken en zayıf ve en yavaş manyetik alan gradientleri).

MR ortamı dışındaki tarama öncesi adımlar

Pile bağımlı olmayan hastalarda test öncesi pil fonksiyonları kontrol edilmelidir.

Pile bağımlı olan hastalarda test öncesi pil fonksiyonları kontrol edilmeli ve asenkronöz moda ayarlanmalıdır.

Lead polaritesi mümkünse bipolar olarak ayarlanmalıdır.

ICD'li hastalarda test öncesi cihaz fonksiyonları kontrol edilmeli ve taşikardi/bradikardi modlarının tespiti ve tedavi seçeneği kapatılmalıdır.

MRG işlemi boyunca hastanın kalp ritmi ve yaşamsal bulguları izlenmelidir.

İşlem boyunca gelişebilecek herhangi bir komplikasyona karşı, uygun bir personel ve defibrilatör de bulunan acil müdahale seti hazır olmalıdır.

İşlem boyunca hastayla görsel ve işitsel temasa devam edilmelidir.

İşlem sonrası için öneriler

Elektrofizyoloji konusunda deneyimli bir hekim, pile bağımlı olmayan hastada pili değerlendirmeli ve gerektiğinde yeniden programlamalıdır.

Pile bağımlı olan hastanın pil fonksiyonları değerlendirilmeli ve tekrar programlanmalıdır.

ICD'li hastada tarama sonrasında cihaz yeniden programlanmalı ve defibrilasyon eşik testi yapılmalıdır.

ICD'li hastalarda testten bir ve üç hafta sonra eşik testi ve diğer testler yapılmalıdır.

Aynı çalışmada, aritmi ve üst sınırı aşan bir pacing izlenmediği, işlem sırasında gelişen elektrokardi-yografik değişikliklerin ve semptomların da işlemi durdurmayı gerektirmediği belirtilmiştir.

Gimbel ve ark.nın^[78] çalışmasında, pile bağımlı 10 hastada toplam 11 MR incelemesi yapılmış, hastaların pilleri asenkronöz pacing moduna (VOO ve DOO 60/dk) alınmış, incelemeler sonunda program değişiklikleri izlenmemiştir.

Yine Gimbel ve ark.nın^[79] dört hastada yaptığı bir çalışmada, kardiyak MRG'nin 0.35-1.5 tesla değerlerindeki manyetik güç aralığında güvenle yapılabileceği bildirilmiştir. Başka bir çalışmada Fontaine ve

ark.^[80] MRG sırasında (1.5 tesla) iki odacıklı kalp pili olan bir hastada hızlı kardiyak pacing izlenmişlerdir.

Nörolojik MRG incelemesi yapılan ICD'li sekiz hastanın birinde görülen program değişikliği dışında önemli klinik olay izlenmemiştir.^[81]

Uygun monitörizasyonun yapıldığı çekimlerde pacing eşiklerinde, pil ve ICD programında değişiklikler ve batarya ömrünün tükenmesi gibi komplikasyonlar olsa da, şimdiye kadar ölüm bildirilmemiştir.

Kalıcı pil ya da ICD taşıyan hastalarda, eğer başka bir görüntüleme seçeneği varsa MRG kullanılmamalıdır. Bu hastalarda MRG, sadece bu işlemin hastaya yararının işlemin potansiyel riskinden fazla olduğu

durumlarda düşünülmalıdır. Bu çekimler, mutlaka MRG ve kardiyak elektrofizyoloji konusunda üst düzeyde deneyimi olan merkezlerde yapılmalıdır. Eğer çekim yapılacaksa, çekimin riskleri hastaya özel olarak anlatılmalı, hasta bilgilendirildikten sonra yazılı onayı mutlaka alınmalıdır.

Çekim sırasında hastanın kalp ritmi ve yaşamsal bulguları izlenmelidir. Çekim sırasında pil/ICD konusunda bir uzman hekim odada mutlaka bulunmalı, defibrilatörü de içeren acil müdahale ekipmanları hazır durumda olmalıdır. Manyetik rezonans fiziği ve güvenliği konusunda tecrübeli bir kişi de, çekimi işlem riskini en aza indirecek şekilde planlamalıdır. Pil ya da ICD işlem öncesi ve sonrasında programlanmalıdır.

Tablo 3'te, pile bağımlı olan hastalar, pile bağımlı olmayan hastalar ve ICD'si olan hastalar için işlem öncesi, işlem sırası ve sonrası için çeşitli öneriler yer almaktadır.

Vücutta bırakılan transvenöz pil ve defibrilatör leadleri

Bu tip leadler MR çekimi sırasında ısınma ve kardiyak uyarılma gibi önemli teorik riskler içerirler. Ayrıca, kırık leadlerde termal hasar riski normal leadlere göre çok daha fazladır.

Şimdiye kadar bu konuda yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu hastalara, pil ve ICD'si olan hastalarla aynı yaklaşımın uygulanması konusunda görüş birliği vardır.

Hemodinamik destek cihazları

İntra-aortik balon pompası, sağ ve sol ventrikül yardımcı cihazları değişik özelliklerde ferromanyetik materyal içeren, hareketli parçaları olan elektrikli cihazlardır. Şimdiye kadar herhangi bir değerlendirme yapılmamış olmasına rağmen, bu cihazların MRG için mutlak kontrendikasyon oluşturduğuna inanılmaktadır.

Özet ve sonuçlar

Güvenli MRG, başlangıçta hastanın dikkatli incelenmesini, kardiyovasküler cihazların ve bu cihazların özelliklerinin kesin olarak belirlenmesini, çekimin yapılacağı zamanda yarar ve risklerin dikkatli analizini ve uygun hekim izlemine gerektirir.

Artan MRG gereksinimi ve kardiyovasküler cihaz kullanımı, MRG için daha güvenli cihazların üretiminde endüstriyel ve akademik tarafların işbirliğinin devam etmesini ve daha da yoğunlaşmasını gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

1. Quint DJ. Indications for emergent MRI of the central nervous system. JAMA 2000;283:853-5.
2. Pennell DJ, Sechtem UP, Higgins CB, Manning WJ, Pohost GM, Rademakers FE, et al. Clinical indications for cardiovascular magnetic resonance (CMR): Consensus Panel report. Eur Heart J 2004;25:1940-65.
3. Brown DW, Croft JB, Giles WH, Anda RF, Mensah GA. Epidemiology of pacemaker procedures among Medicare enrollees in 1990, 1995, and 2000. Am J Cardiol 2005;95:409-11.
4. Moss AJ, Zareba W, Hall WJ, Klein H, Wilber DJ, Cannom DS, et al. Prophylactic implantation of a defibrillator in patients with myocardial infarction and reduced ejection fraction. N Engl J Med 2002;346:877-83.
5. Abraham WT, Fisher WG, Smith AL, Delurgio DB, Leon AR, Loh E, et al. Cardiac resynchronization in chronic heart failure. N Engl J Med 2002;346:1845-53.
6. Bristow MR, Saxon LA, Boehmer J, Krueger S, Kass DA, De Marco T, et al. Cardiac-resynchronization therapy with or without an implantable defibrillator in advanced chronic heart failure. N Engl J Med 2004;350:2140-50.
7. Bardy GH, Lee KL, Mark DB, Poole JE, Packer DL, Boineau R, et al. Amiodarone or an implantable cardioverter-defibrillator for congestive heart failure. N Engl J Med 2005;352:225-37.
8. Shellock FG, Cruess JV. MR procedures: biologic effects, safety, and patient care. Radiology 2004;232:635-52.
9. Prasad SK, Pennell DJ. Safety of cardiovascular magnetic resonance in patients with cardiovascular implants and devices. Heart 2004;90:1241-4.
10. Faris OP, Shein MJ. Government viewpoint: U.S. Food & Drug Administration: Pacemakers, ICDs and MRI. Pacing Clin Electrophysiol 2005;28:268-9.
11. Shellock FG. Reference manual for magnetic resonance safety, implants, and devices: 2006 edition. Los Angeles, CA: Biomedical Research Publishing Group; 2006.
12. Kanal E, Shellock FG. Policies, guidelines, and recommendations for MR imaging safety and patient management. SMRI Safety Committee. J Magn Reson Imaging 1992;2:247-8.
13. Kanal E, Borgstede JP, Barkovich AJ, Bell C, Bradley WG, Etheridge S, et al. American College of Radiology White Paper on MR Safety: 2004 update and revisions. AJR Am J Roentgenol 2004;182:1111-4.
14. Kanal E, Borgstede JP, Barkovich AJ, Bell C, Bradley WG, Felmlee JP, et al. American College of Radiology White Paper on MR Safety. AJR Am J Roentgenol 2002;178:1335-47.
15. Ahmed S, Shellock FG. Magnetic resonance imaging safety: implications for cardiovascular patients. J Cardiovasc Magn Reson 2001;3:171-82.
16. Kanal E, Shellock FG, Talagala L. Safety considerations in MR imaging. Radiology 1990;176:593-606.
17. Kanal E, Barkovich AJ, Bell C, Borgstede JP, Bradley

- WG Jr, Froelich JW, et al. ACR guidance document for safe MR practices: 2007. *AJR Am J Roentgenol* 2007; 188:1447-74.
18. Teitelbaum GP, Bradley WG Jr, Klein BD. MR imaging artifacts, ferromagnetism, and magnetic torque of intravascular filters, stents, and coils. *Radiology* 1988;166:657-64.
 19. Schaefer DJ. Safety aspects of switched gradient fields. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 1998;6:731-48.
 20. Schaefer DJ, Bourland JD, Nyenhuis JA. Review of patient safety in time-varying gradient fields. *J Magn Reson Imaging* 2000;12:20-9.
 21. Schaefer DJ. Safety aspects of radiofrequency power deposition in magnetic resonance. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 1998;6:775-89.
 22. Levine GN, Gomes AS, Arai AE, Bluemke DA, Flamm SD, Kanal E, et al. Safety of magnetic resonance imaging in patients with cardiovascular devices: an American Heart Association scientific statement from the Committee on Diagnostic and Interventional Cardiac Catheterization, Council on Clinical Cardiology, and the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention: endorsed by the American College of Cardiology Foundation, the North American Society for Cardiac Imaging, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *Circulation* 2007;116:2878-91.
 23. Schaefer DJ. Health effects and safety of radiofrequency power deposition associated with magnetic resonance procedures. In: Shellock FG, editor. *Magnetic resonance procedures: health effects and safety*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2001. p. 55-74.
 24. ECRI Institute. Health devices alert: a new MRI complication? May 27, 1988.
 25. United States Food and Drug Administration, Center for Devices and Radiological Health. A primer on medical device interactions with magnetic resonance imaging systems. Available from: <http://www.fda.gov/cdrh/ode/primerf6.html>. Accessed: December 1, 2006.
 26. American Society for Testing and Materials (ASTM) International. ASTM F2503-05 standard practice for marking medical devices and other items for safety in the magnetic resonance environment. Available from: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/F2503-05.htm>. Accessed: November 2, 2006.
 27. Hug J, Nagel E, Bornstedt A, Schnackenburg B, Oswald H, Fleck E. Coronary arterial stents: safety and artifacts during MR imaging. *Radiology* 2000;216:781-7.
 28. Friedrich MG, Strohm O, Kivelitz D, Gross W, Wagner A, Schulz-Menger J, et al. Behaviour of implantable coronary stents during magnetic resonance imaging. *Int J Cardiovasc Intervent* 1999;2:217-22.
 29. Scott NA, Pettigrew RI. Absence of movement of coronary stents after placement in a magnetic resonance imaging field. *Am J Cardiol* 1994;73:900-1.
 30. Shellock FG, Shellock VJ. Metallic stents: evaluation of MR imaging safety. *AJR Am J Roentgenol* 1999; 173:543-7.
 31. Syed MA, Carlson K, Murphy M, Ingkanisorn WP, Rhoads KL, Arai AE. Long-term safety of cardiac magnetic resonance imaging performed in the first few days after bare-metal stent implantation. *J Magn Reson Imaging* 2006;24:1056-61.
 32. Sommer T, Maintz D, Schmiedel A, Hackenbroch M, Hofer U, Urbach H, et al. High field MR imaging: magnetic field interactions of aneurysm clips, coronary artery stents and iliac artery stents with a 3.0 Tesla MR system. *Rofo* 2004;176:731-8. [Abstract]
 33. Nehra A, Moran CJ, Cross DT 3rd, Derdeyn CP. MR safety and imaging of neuroform stents at 3T. *AJNR Am J Neuroradiol* 2004;25:1476-8.
 34. Schroeder AP, Houliand K, Pedersen EM, Thuesen L, Nielsen TT, Egeblad H. Magnetic resonance imaging seems safe in patients with intracoronary stents. *J Cardiovasc Magn Reson* 2000;2:43-9.
 35. Gerber TC, Fasseas P, Lennon RJ, Valeti VU, Wood CP, Breen JF, et al. Clinical safety of magnetic resonance imaging early after coronary artery stent placement. *J Am Coll Cardiol* 2003;42:1295-8.
 36. Porto I, Selvanayagam J, Ashar V, Neubauer S, Banning AP. Safety of magnetic resonance imaging one to three days after bare metal and drug-eluting stent implantation. *Am J Cardiol* 2005;96:366-8.
 37. Rutledge JM, Vick GW 3rd, Mullins CE, Grifka RG. Safety of magnetic resonance imaging immediately following Palmaz stent implant: a report of three cases. *Catheter Cardiovasc Interv* 2001;53:519-23.
 38. Shellock FG, Forder JR. Drug eluting coronary stent: in vitro evaluation of magnet resonance safety at 3 Tesla. *J Cardiovasc Magn Reson* 2005;7:415-9.
 39. Boston Scientific Corporation. Boston Scientific's TAXUS Express2 paclitaxel-eluting stent system first drug-eluting stent to receive FDA approval allowing immediate MRI exams. Boston Scientific; April 5, 2005. Available from: http://www.ptca.org/press_rel/20050405pr_boston.html. Accessed: August 29, 2006.
 40. Shellock FG. MR safety at 3T: bare metal and drug eluting coronary artery stents. *SIGNALS*. 2005;53:26-27.
 41. MRI safety. Institute for Magnetic Resonance Safety, Education, and Research. Available from: <http://www.MRIsafety.com>. Accessed: June 19, 2006.
 42. Shellock FG. Biomedical implants and devices: assessment of magnetic field interactions with a 3.0-Tesla MR system. *J Magn Reson Imaging* 2002;16: 721-32.
 43. van der Laan MJ, Bartels LW, Bakker CJ, Viergever MA, Blankensteijn JD. Suitability of 7 aortic stent-graft models for MRI-based surveillance. *J Endovasc Ther* 2004;11:366-71.
 44. Shellock FG, Morisoli SM. Ex vivo evaluation of ferromagnetism, heating, and artifacts produced by heart valve prostheses exposed to a 1.5-T MR system. *J Magn Reson Imaging* 1994;4:756-8.

45. Edwards MB, Taylor KM, Shellock FG. Prosthetic heart valves: evaluation of magnetic field interactions, heating, and artifacts at 1.5 T. *J Magn Reson Imaging* 2000;12:363-9.
46. Shellock FG, Riedinger MS. Reproducibility and accuracy of using room-temperature vs. ice-temperature injectate for thermodilution cardiac output determination. *Heart Lung* 1983;12:175-6.
47. Shellock FG. Prosthetic heart valves and annuloplasty rings: assessment of magnetic field interactions, heating, and artifacts at 1.5 Tesla. *J Cardiovasc Magn Reson* 2001;3:317-24.
48. Bock M, Mohrs OK, Voigtlaender T, Kauczor HU, Semmler W. MRI safety aspects and artifacts of atrial septal defect and patent foramen ovale occluders at 1.5 tesla: a phantom study. *Rofo* 2006;178:272-7. [Abstract]
49. Shellock FG, Morisoli SM. Ex vivo evaluation of ferromagnetism and artifacts of cardiac occluders exposed to a 1.5-T MR system. *J Magn Reson Imaging* 1994;4:213-5.
50. Shellock FG, Valencerina S. Septal repair implants: evaluation of magnetic resonance imaging safety at 3 T. *Magn Reson Imaging* 2005;23:1021-5.
51. Watanabe AT, Teitelbaum GP, Gomes AS, Roehm JO Jr. MR imaging of the bird's nest filter. *Radiology* 1990;177:578-9.
52. Kiproff PM, Deeb ZL, Contractor FM, Houry MB. Magnetic resonance characteristics of the LGM vena cava filter: technical note. *Cardiovasc Intervent Radiol* 1991;14:254-5.
53. Kim D, Edelman RR, Margolin CJ, Porter DH, McArdle CR, Schlam BW, et al. The Simon nitinol filter: evaluation by MR and ultrasound. *Angiology* 1992;43:541-8.
54. Grassi CJ, Matsumoto AH, Teitelbaum GP. Vena caval occlusion after Simon nitinol filter placement: identification with MR imaging in patients with malignancy. *J Vasc Interv Radiol* 1992;3:535-9.
55. Bartels LW, Bakker CJ, Viergever MA. Improved lumen visualization in metallic vascular implants by reducing RF artifacts. *Magn Reson Med* 2002;47:171-80.
56. Liebman CE, Messersmith RN, Levin DN, Lu CT. MR imaging of inferior vena caval filters: safety and artifacts. *AJR Am J Roentgenol* 1988;150:1174-6.
57. Hartman J, Nguyen T, Larsen D, Teitelbaum GP. MR artifacts, heat production, and ferromagnetism of Guglielmi detachable coils. *AJNR Am J Neuroradiol* 1997;18:497-501.
58. Shellock FG, Detrick MS, Brant-Zawadski MN. MR compatibility of Guglielmi detachable coils. *Radiology* 1997;203:568-70.
59. Marshall MW, Teitelbaum GP, Kim HS, Deveikis J. Ferromagnetism and magnetic resonance artifacts of platinum embolization microcoils. *Cardiovasc Intervent Radiol* 1991;14:163-6.
60. Hennemeyer CT, Wicklow K, Feinberg DA, Derdeyn CP. In vitro evaluation of platinum Guglielmi detachable coils at 3 T with a porcine model: safety issues and artifacts. *Radiology* 2001;219:732-7.
61. Shellock FG, Gounis M, Wakhloo A. Detachable coil for cerebral aneurysms: in vitro evaluation of magnetic field interactions, heating, and artifacts at 3T. *AJNR Am J Neuroradiol* 2005;26:363-6.
62. Shellock FG, Tkach JA, Ruggieri PM, Masaryk TJ. Cardiac pacemakers, ICDs, and loop recorder: evaluation of translational attraction using conventional ("long-bore") and "short-bore" 1.5- and 3.0-Tesla MR systems. *J Cardiovasc Magn Reson* 2003;5:387-97.
63. Shellock FG, Shellock VJ. Cardiovascular catheters and accessories: ex vivo testing of ferromagnetism, heating, and artifacts associated with MRI. *J Magn Reson Imaging* 1998;8:1338-42.
64. Hartnell GG, Spence L, Hughes LA, Cohen MC, Saouaf R, Buff B. Safety of MR imaging in patients who have retained metallic materials after cardiac surgery. *AJR Am J Roentgenol* 1997;168:1157-9.
65. Dempsey MF, Condon B. Thermal injuries associated with MRI. *Clin Radiol* 2001;56:457-65.
66. Dempsey MF, Condon B, Hadley DM. Investigation of the factors responsible for burns during MRI. *J Magn Reson Imaging* 2001;13:627-31.
67. Achenbach S, Moshage W, Diem B, Bieberle T, Schibgilla V, Bachmann K. Effects of magnetic resonance imaging on cardiac pacemakers and electrodes. *Am Heart J* 1997;134:467-73.
68. Roguin A, Schwitter J, Vahlhaus C, Lombardi M, Brugada J, Vardas P, et al. Magnetic resonance imaging in individuals with cardiovascular implantable electronic devices. *Europace* 2008;10:336-46.
69. Hayes DL, Holmes DR Jr, Gray JE. Effect of 1.5 tesla nuclear magnetic resonance imaging scanner on implanted permanent pacemakers. *J Am Coll Cardiol* 1987;10:782-6.
70. Smith JM. Industry viewpoint: Guidant: Pacemakers, ICDs, and MRI. *Pacing Clin Electrophysiol* 2005;28:264.
71. Stanton MS. Industry viewpoint: Medtronic: Pacemakers, ICDs, and MRI. *Pacing Clin Electrophysiol* 2005;28:265.
72. Levine PA. Industry viewpoint: St. Jude Medical: Pacemakers, ICDs and MRI. *Pacing Clin Electrophysiol* 2005;28:266-7.
73. Irnich W, Irnich B, Bartsch C, Stertmann WA, Gufler H, Weiler G. Do we need pacemakers resistant to magnetic resonance imaging? *Europace* 2005;7:353-65.
74. Food and Drug Administration, Center for Devices and Radiological Health. Medical device reporting. Available from: <http://www.fda.gov/cdrh/mdr>. Accessed: December 1, 2006.
75. Martin ET, Coman JA, Shellock FG, Pulling CC, Fair R, Jenkins K. Magnetic resonance imaging and cardiac pacemaker safety at 1.5-Tesla. *J Am Coll Cardiol* 2004;43:1315-24.

76. Gimbel JR. Implantable pacemaker and defibrillator safety in the MR environment: new thoughts for the new millennium. In: Kanal E, editor. Practical MR safety considerations for physicians, physicists and technologists. Oak Brook, IL: Radiological Society of North America; 2001. p. 69-76.
77. Avery JK. Loss prevention case of the month. Not my responsibility! J Tenn Med Assoc 1988;81:523.
78. Gimbel JR, Bailey SM, Tchou PJ, Ruggieri PM, Wilkoff BL. Strategies for the safe magnetic resonance imaging of pacemaker-dependent patients. Pacing Clin Electrophysiol 2005;28:1041-6.
79. Gimbel JR, Johnson D, Levine PA, Wilkoff BL. Safe performance of magnetic resonance imaging on five patients with permanent cardiac pacemakers. Pacing Clin Electrophysiol 1996;19:913-9.
80. Fontaine JM, Mohamed FB, Gottlieb C, Callans DJ, Marchlinski FE. Rapid ventricular pacing in a pacemaker patient undergoing magnetic resonance imaging. Pacing Clin Electrophysiol 1998;21:1336-9.
81. Gimbel JR, Kanal E, Schwartz KM, Wilkoff BL. Outcome of magnetic resonance imaging (MRI) in selected patients with implantable cardioverter defibrillators (ICDs). Pacing Clin Electrophysiol 2005;28:270-3.