



Pozitron Emisyon Tomografisi/Manyetik Rezonans Görüntüleme (PET/MR): Klinik Uygulamada Karşılaşılan Yaygın Tuzaklar ve Sınırlamalar

Positron Emission Tomography/Magnetic Resonance Imaging (PET/MRI): Common Pitfalls and Limitations in Clinical Practice

Onur Erdem Şahin

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

Öz

Pozitron emisyon tomografisi/bilgisayarlı tomografi (PET/ BT) cihazının ve başta F-18 florodeoksiglukoz olmak üzere çeşitli PET radyofarmasötiklerinin hayatımıza girmesi başta kanserler olmak üzere birçok hastalığın yönetiminde paradigma değişikliğine ve Nükleer Tıp biliminin önemli bir ivme kazanmasına neden olmuştur. PET komponentinin sağladığı fonksiyonel bilgiler BT ile elde edilen anatomik veriler ile birlikte farklı hastalıkların yönetiminde etkili bir yaklaşım olanağı sağlamıştır. Zaman içerisinde her iki komponentteki gelişmeler görüntüleme başarısını paralel olarak artırmıştır. Bununla birlikte BT'nin doğası gereği yetersiz kaldığı yumuşak doku kontrastı ve yarattığı ek iyonizan radyasyon bir problem olarak karşımıza çıkmaya devam etmiştir. Teknolojik ve mühendislik gelişmeler sonucu son dönemde hayatımıza giren PET/manyetik rezonans (MR) görüntüleme sağladığı yüksek doku kontrastı ve ek fonksiyonel bilgilerle BT'nin eksik kaldığı yerleri doldurduğu gibi ek faydalar sunmuştur. Bununla birlikte yeni problemleri de birlikte getirmiştir. Atenüasyon düzeltmesi en büyük problem olarak karşımıza çıksa da teknolojik-yazılımsal ilerlemeler ile gelişme sağlanmıştır. Bununla birlikte özellikle kemik ve akciğerdeki sinyal problemleri halen gelişmelere ihtiyaç duymaktadır. Akciğer lezyonlarının değerlendirilmesi diğer bir zorluk olup kısa eko zamanlı sekansların kullanıma girmesi ile ilerleme kaydedilmiştir. Ayrıca MR görüntülemenin farklılıkları ve artefaktları alışmamız gereken alanlardır.

Abstract

The introduction of positron emission tomography/computed tomography (PET/CT), particularly with F-18 fluorodeoxyglucose, has transformed disease management, especially in oncology, marking a major breakthrough in nuclear medicine. Since its advent, PET/CT has been widely adopted as both a primary and complementary imaging modality. The functional data from PET, integrated with anatomical details from CT, has facilitated more effective disease management. Advancements in PET and CT technologies have enhanced imaging outcomes, but limitations of CT, such as inadequate soft tissue contrast and ionizing radiation exposure, remain. In response, PET/magnetic resonance imaging (MRI) has emerged, offering high tissue contrast and additional functional data, addressing CT's shortcomings. However, PET/MRI introduces new challenges, including attenuation correction and signal issues in bone and lung imaging. Evaluating lung lesions is still challenging, though progress has been made with short echo time sequences. The distinct imaging characteristics and artifacts of MRI necessitate adaptation, requiring familiarity with various sequences and proper imaging protocols. The MRI component also introduces safety concerns that must be addressed with proper procedures and staff training. Additionally, the high cost of PET/MRI limits its availability to major research centers. Despite these challenges, PET/MRI represents a new milestone in nuclear medicine, generating excitement in the field. Ongoing developments are expected to

Yazışma Adresi/Address for Correspondence

Onur Erdem Şahin, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

E-posta: onur.sahin@iuc.edu.tr ORCID ID: orcid.org/0000-0003-2330-80

Geliş Tarihi/Received: 27.09.2024 Kabul Tarihi/Accepted: 14.10.2024



Copyright© 2024 Yazar. Türkiye Nükleer Tıp Derneği adına Galenos Yayınevi tarafından yayımlanmıştır. Creative Commons Atıf-GayriTicari 4.0 Uluslararası (CC BY-NC 4.0) Uluslararası Lisansı ile lisanslanmış, açık erişimli bir makaledir.

Copyright© 2024 The Author. Published by Galenos Publishing House on behalf of Turkish Nuclear Medicine Society. This is an open access article under the Creative Commons AttributionNonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

İçerdiği farklı sekanslara hakim olmamız gerektiği gibi uygun çekim protokollerinin oluşturulması da önemlidir. MR komponentinin yarattığı yeni güvenlik problemleri dikkatle ele alınmalı uygun prosedürler oluşturularak personel eğitimine özen gösterilmelidir. PET/MR'in görece pahalı bir yöntem olması büyük araştırma merkezlerinde sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Tüm bunlarla birlikte PET/MR Nükleer Tıp alanında yeni bir dönüm noktası olmuş ve yeni bir alan açmıştır. İlerleyen dönemde yeni gelişmelerle birlikte mevcut sorunların düzeleceği düşünülmeyle birlikte mevcut sorunların, tuzakların ve artefaktların bilinmesi doğru yorumlama için önem arz etmektedir. Bu derlemede genel sorunlar, dikkat edilmesi gereken alanlar ve tuzaklardan bahsedilmeye çalışılacaktır.

Anahtar Kelimeler: PET/MR, atenüasyon, artefakt, akciğer, SUV

address current issues, but understanding existing challenges and pitfalls is essential for accurate interpretation. This review discusses the general challenges, critical areas of concern, and potential pitfalls associated with PET/MRI.

Keywords: PET/MRI, attenuation, artifact, lung, SUV

Giriş

On dokuzuncu yüzyılın sonlarında başlayan ve 20.yüzyılda hızlanarak devam eden fizik ve teknoloji alanındaki gelişmeler 1973 yılında Phelps ve ark. (1) ilk pozitron emisyon tomografi (PET) cihazının geliştirilmesini sağlamıştır. Townsend (2) 1998 yılında ilk hibrit PET/bilgisayarlı tomografi (BT) prototipini geliştirmeleri ile başlayan süreç 2001 yılında ilk ticari PET/BT cihazının piyasaya sürülmesi ile büyük bir heyecan yaratmış ve onkolojik hastalıkların yönetiminde dönüm noktası olmuştur. Günümüzde de benzer şekilde devam eden bu heyecan Nükleer Tıp alanında logaritmik bir gelişmeyi başlatmış ve birçok radyofarmasötüğün hayatımıza girmesine yol açmıştır. Bize hem anatomik hem fonksiyonel görüntüleme sağlayan bu cihaz birçok hastalığın yönetiminde paradigma değişikliğine neden olmuştur.

Günümüzde PET/BT ve mevcut radyofarmasötikler birçok onkolojik, nörolojik, enfektif ve enflamatuvar hastalığın tanısında, takibinde, nüksünde ve tedavi yanıtının değerlendirilmesinde aktif olarak kullanılmaktadır. İlk cihazın piyasa girmesinden sonra gerek PET gerekse de BT komponentleri zaman içerisinde önemli gelişme kaydetmekle birlikte BT görüntülemesinin doğasından ötürü olan handikaplar karşımıza çıkmaya devam etmektedir.

Bilgisayarlı tomografi görüntüleri X-ışınının dokularda gösterdiği atenüasyon farklılıklarına dayanarak elde edilmektedir. Yumuşak dokularda yeterli

kontrast yaratamaması yeterli anatomik bilginin elde edilememesine neden olmaktadır. Ayrıca görüntülemenin doğasından ötürü iyonizan radyasyona neden olması PET görüntülemesine ek radyasyon yükü oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak PET/BT görüntülerinin aynı anda değil ardışık olarak alınması da hasta ve organ hareketine bağlı sorunları birlikte getirmektedir.

Bu nedenlerden dolayı hibrit PET/manyetik rezonans (MR) görüntülemesine ihtiyaç duyulmuş ve teknolojik ilerlemeler bunun gerçekleşmesini mümkün kılmıştır. İlk PET/MR cihazının 2010 yılında hayatımıza girmesiyle birlikte Nükleer Tıp camiasında yeni ve alışık olmadığımız bir alan açılmıştır. MR komponentinin sağladığı yüksek doku kontrastı, iyonizan radyasyon içermemesi ve farklı sekanslarla sağlanan çeşitli morfolojik ve fonksiyonel bilgiler PET/BT'nin eksik kaldığı alanları doldurmuştur. Ayrıca görüntülemelerin aynı anda elde edilmesi hareket sorunlarını çözmede katkı sağlamıştır.

Her ne kadar PET/MR konseptini düşünmek kolay olsa da hayata geçirilmesi hiç kolay olmamıştır. MR görüntülemesinde manyetik alanın homojen olması elzemdir. Bu yapının içine PET komponentlerini eklemek büyük sorunları birlikte getirmiştir. Ayrıca MR sistemlerinin yarattığı manyetik alan ve radyo frekans (RF) sinyallerinin PET dedektörlerini etkilemesi de ayrı bir sorun olarak karşımıza çıkmış ve manyetik alanda çalışabilen silikon dedektör gibi değişikliklerle aşılmıştır. Bu sorunların üstesinden gelinmesi büyük bir teknolojik ve mühendislik emek gerektirmiştir. Tüm sorunlar tam anlamıyla

çözülemez de hem teknolojik hem de yazılımsal gelişmeler ile birlikte ilerleme devam etmektedir. Görece alışıksız olmadığımız bu hibrit görüntüleme yönteminin özellikle MR komponentinin oluşturduğu yeni handikapları, tuzakları ve eksik kaldığı yerleri bilmek görüntülemeleri yorumlarken önem arz etmektedir. Bu yazıda bu alanları kısaca anlatmaya çalışacağım.

Atenüasyon Düzeltme Artefaktları

PET'in temelinde pozitron ışıması sonrası gelişen anihilasyon fotonları bulunmaktadır. Görüntülerin doğru bir şekilde oluşabilmesi için 511 keV enerjiye sahip bu fotonların atenüasyon ve saçılım düzeltmelerinin yapılması elzemdir. Hibrit PET/BT sistemlerinde bu düzeltmeler BT verisi ile kolayca ve hızla sağlanmaktadır. BT görüntülerinin elde edilmesinde kullanılan frenleme radyasyonunun geniş bir spektrumda ve daha düşük enerji seviyelerinde olması bir handikap olsa da sağladığı atenüasyon haritası yeterli düzeltmeye imkan sağlamaktadır (3).

MR görüntülemenin temelinde BT'deki gibi bir X-ışını yayılımı olmaması, hava ve kemikteki sinyal sorunlarının yarattığı veri eksikliği gibi sebepler MR verisi ile atenüasyon düzeltmesinde önemli zorluklar yaratmaktadır. PET/MR sisteminin bu konudaki önemli tek avantajının görüntülerin aynı anda edilmesine bağlı hareket sorunlarını azaltması olduğu söylenebilir.

Bununla birlikte MR tabanlı atenüasyon düzeltme (MRAC) görüntüleri oluşturmak için farklı yöntemler mevcuttur. En çok kullanılan yöntem olan segmentasyon temelli uygulamalarda MR görüntülerinden elde edilen anatomik bilgiler hava, yumuşak doku, akciğer, yağ gibi belirli doku sınıflarına ayrılır ve bunların her birisine belirli atenüasyon katsayıları uygulanır. Bu amaçla en çok yağ ve su içerikli dokuyu ayırt edebilen T1 ağırlıklı Dixon sekansı kullanılmaktadır. Akciğerlerin büyük bölümünü kaplayan havanın düşük proton yoğunluğuna sahip olması ve kemik dokudan elde edilen düşük sinyal, atenüasyon düzeltmesinde en büyük sorunları oluşturmaktadır. Beyin görüntüleme kortikal kemiklerin yarattığı bu düzeltme sorunu PET/MR'da standart uptake değerlerinde (SUV) %30'lara varan farklılıklara yol açabilmektedir (4).

Kemik dokuyu görüntülemek için kullanılabilen *ultrashort echo time* (UTE) ve *zero echo time* (ZTE) gibi kısa eko zamanlı MR sekansları özellikle beyin görüntülerinin atenüasyon düzeltmesine önemli katkı sağlamıştır. Bununla birlikte görece uzun sürmesi ve

geniş alanlarda artefaktlara neden olabilmesi tüm vücuda uygulanabilmesine engel olmaktadır. Teknolojik gelişmeler ve son dönemlerde popülerleşen derin öğrenme algoritmaları atenüasyon düzeltme sorunlarını azaltabilme potansiyeline sahip olup umut vadetmektedir (5).

Diğer bir yaklaşım atlas temelli düzeltmelerdir. Bu yöntemde daha önceden hazırlanmış haritalar ile hasta görüntüleri eşleştirilerek atenüasyon düzeltmesi sağlanmaktadır. En büyük avantajı diğer yöntemlere kıyasla daha fazla anatomik detaya sahip olmasıdır. Bununla birlikte bireylerin anatomileri arasında büyük farklılıklar izlenebilmesi ve olası anatomik anormallikler nedeniyle bu yöntemin tüm vücuda uygulanması zorlaşmakta ve uygulama alanını beyin görüntüleme ile sınırlamaktadır.

Bir diğer yaklaşım ise eşzamanlı tahmin yöntemleridir. Bu yöntemlerde atenüasyon haritası oluşturulurken MR verisinin yanı sıra PET emisyon bilgileri de kullanılır. Diğer yöntemlerden farklı olarak PET emisyon bilgileri kullanarak PET görüntüsü ve atenüasyon haritası aynı anda yeniden yapılandırılır. Uygulamanın temelinde atenüasyon ve aktivitenin maksimum olasılık ile yeniden yapılandırılması algoritmaları bulunmaktadır (6,7). Atenüasyon düzeltme faktörünü belirlerken PET emisyon verileri tek başına yeterli olmadığından, MR dataları ve *time of flight* (TOF) bilgisi tahminin doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca çekim alanının küçük olduğu durumlarda eksik bölgenin tamamlanması amacıyla da bu algoritmalarından yararlanılabilmektedir. Bununla birlikte F-18 florodeoksiglukoz (FDG) gibi yeterli anatomik bilgi verebilen radyofarmasötikler için uygun olup saçılımlara hassastır.

Özet olarak atenüasyon düzeltmesi PET/MR sistemleri için önemli bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. Özellikle akciğer gibi hava içerikli dokular ve kemik dokulardaki sinyal problemleri yanlış atenüasyon haritalamalarına (u-map) neden olabilmektedir. Bu sorunları aşmak için farklı yöntemler kullanılmakta ve gelişmeler devam etmektedir. Bununla birlikte olası atenüasyon düzeltme problemlerini ve PET/BT sistemleri ile farklılıklarını akılda bulundurmak, gerek ilk görüntüleme gerekse de karşılaştırmalı değerlendirme yaparken oluşabilecek problemleri engellemede önem arz etmektedir.

Artefaktlar

Inhomojenite Artefaktları

Daha önce de bahsedildiği gibi MR görüntülemesinde ana manyetik alanının (B0) görüntüleme alanı boyunca sabit, düzgün ve aynı şiddette olması doğru görüntüleme için çok önemlidir. PET/MR sistemlerinin geliştirilmesindeki en büyük zorluklardan biri gerek PET sistemlerinin MR'a, gerekse de MR sistemlerinin PET görüntülemesine etkisinin önüne geçebilmektir. Manyetik alanın homojen olmaması durumunda inhomojenite artefaktları karşımıza çıkmaktadır.

Bu artefaktların temelinde farklı sorunlar olabilir. PET sistemlerinin MR sistemlerine etkisi sonucu olan homojenite sorunları, RF alan distorsiyonları ve elektronik arka plan gürültüsü gibi sorunlar mühendislik gelişmeler ile aşılmaya çalışılmıştır. MR cihazının kalibrasyon sorunları ve manyetik alan düzeltme (shimming) işlemlerindeki eksiklikler inhomojenite sorunlarını ortaya çıkarabilir. Ayrıca farklı dokuların farklı manyetik özelliklere sahip olması, metalik implantlar veya vücut dışı metal cisimler de homojeniteyi bozabilmektedir. Inhomojenite sorunlarında görüntüde distorsiyon, sinyal bozuklukları (fazla veya az sinyal) ve çizgisel-dalgali artefaktlar görülebilmektedir. Özellikle 3 Tesla (3T) ve üzerindeki manyetik güce sahip cihazlar homojenite değişimlerinden daha dramatik etkilenebilmektedir. Günümüzdeki PET/MR cihazlarında da 3T MR kullanılmakta olduğu göz önüne alındığında bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Oluşan artefaktlar görüntü yorumlamayı güçleştirebileceği gibi SUV değerlerini de bozabilir. Bu sorunları aşabilmek için metal artefaktlarını düzeltme amaçlı özel teknikler ve TOF PET tekniklerindeki gelişmeler umut vadedicidir (8).

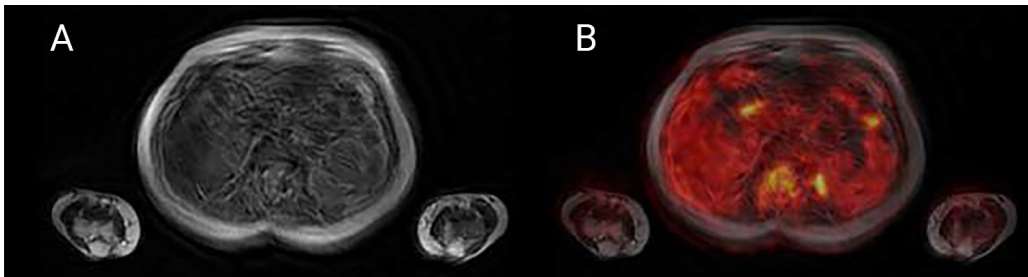
Hareket ve Pulsasyon Artefaktları

Hasta hareketi tüm görüntülemelerde çekim kalitesini etkileyen bir durumdur. PET/MR cihazlarının PET/BT'ye

kıyasla daha dar bir gantriye sahip olması ve uygulanan vücut koilleri klostrifobik bir ortam sağlamakta ve hasta tahammülünü zorlayabilmektedir. Bu da hastaların hareket sorunlarını artırabilir. Daha önce bahsettiğimiz PET/MR görüntülemesindeki atenüasyon düzeltme sorunları hasta hareketinin yaratacağı etkileri daha dramatik hale getirmektedir (Şekil 1). Bu yüzden hasta hareketinin minimize edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Hareket artefaktları özellikle faz kodlama yönünde meydana gelen solunum, kalp atışı, peristaltik veya istemsiz vücut hareketleri gibi farklı nedenlerden kaynaklanabilir. Tüm ilgi alanı boyunca izlenmesi trunkasyon (Gibbs) artefaktlarından ayırımı sağlar. Hayalet imajlar, tekrarlayan çizgilenmeler veya bulanıklık şeklinde izlenebilir. Pulsasyon artefaktları kardiyak hareket, aort gibi büyük damarlardaki pulsasyonlar (Şekil 2) veya beyin omurilik sıvısının (BOS) ritmik hareketlerden kaynaklanır ve MR imajlarında tekrarlanan gölgeler ve çizgilenmelere yol açar (9).

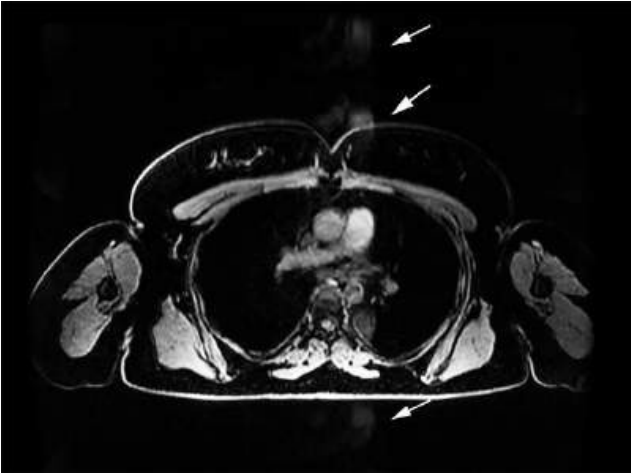
Özellikle diyafragmatik bölgede gerek solunum hareketlerinin gerekse de hasta hareketinin yaratabileceği sorunlar zaten zor olan akciğer ve yumuşak doku ayırımı daha da zorlaştırabilir ve ciddi atenüasyon düzeltme yanlışlıklarına zemin hazırlayabilir. Gerek atenüasyon düzeltmesini gerekse de anatomik değerlendirmeyi doğru yapabilmek için kritik bölgelerde solunum tetiklemeli, navigatörlü veya solunum tutturularak görüntüleme yapılması önemlidir. Bu sayede solunum hareketlerinden kaynaklanan artefaktlar en aza indirilir. Ayrıca kardiyolojik PET/MR görüntülemelerinde elektrokardiyografi sinyalleri ve solunum hareketleri ile uyumlu eş zamanlı görüntüleme imkanı bulunması PET/BT'ye önemli bir avantajı olup görüntüleme doğruluğunu artırmaktadır (10).



Şekil 1. Hareket artefaktı. Gerek MR (A) gerekse de füzyon PET/MR imajlarında (B) hareketin oluşturduğu artefakt izlenmektedir. MR: Manyetik rezonans, PET: Pozitron emisyon tomografi

Su-Yağ Değişim Artefaktı

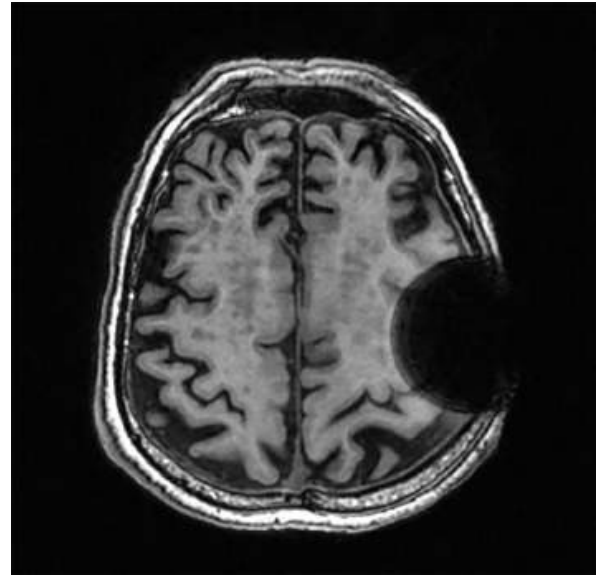
Dixon yöntemi, MR görüntülemeye yağ ve su sinyallerini ayırmak için kullanılan bir tekniktir. Bu görüntüleme yönteminde yağ ve su sinyalleri farklı fazlarla elde edilerek sadece su ve sadece yağ sinyallerini içeren görüntüler elde edilebilir. Ancak, bu işlem sırasında faz kayması gibi nedenlerle su ile yağ sinyalleri birbirine karışabilir ve su-y yağ değişim artefaktları karşımıza çıkar. Bu artefaktlar anatomik değerlendirmede sorunlar oluşturabilir. Ayrıca MRAC görüntülerinde oluşabilecek artefaktlar SUV değerlerinde yanlış hesaplamalara neden olabilmektedir. Firmalar bu sorunları minimize etmek amacıyla algoritmalar geliştirmiş olmakla birlikte u- map görüntüleri kontrol edilmeli ve olası artefaktlara dikkat edilmelidir (11).



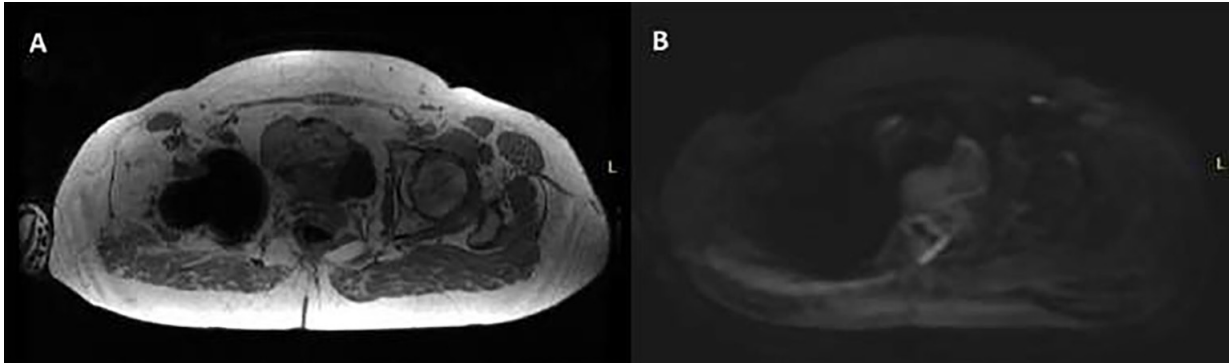
Şekil 2. Pulsasyon artefaktı (aksiyal T1A Dixon su imajı). Aortun oluşturduğu pulsasyon artefaktı bir hat üzerinde izlenen hayalet görüntülerle kendini göstermektedir

Metal Artefaktları

Metal gibi manyetik alanı ve RF sinyallerini etkileyebilen maddeler (protez, implant, stent vs.) sinyal alımındaki bozulma ve etkilenmeye bağlı olarak görüntülemeyi bozarak artefaktlara neden olur. Bu distorsiyon alanları metalin yapısı ve büyüklüğüne bağlı olarak çok geniş alanları etkileyebilir ve görüntüleri yorumlamayı imkansız hale getirebilir (Şekil 3 ve 4). Buna bağlı olarak MRAC görüntülerini de etkileyeceğinden SUV değerlerinde yanlış değerlendirmelere neden olur. Bu artefaktları azaltmak amacıyla farklı görüntü tamamlama teknikleri, “*metal artifact reduction sequence*” gibi metal artefaktlarını azaltıcı yöntemler ile gelişme sağlamıştır (12,13).



Şekil 3. Metal artefaktı (aksiyal T1A Dixon su imajı). Sol parietal bölgede metal artefaktına bağlı belirgin görüntü kaybı izlenmektedir



Şekil 4. Metal artefaktı. Sağ kalça protezinin aksiyal DAG (B) ve aksiyal T1A faz-ıç (A) görüntülerinde oluşturduğu artefakt izlenmektedir. DAG: Difüzyon ağırlıklı görüntüleme

Gibbs Artefaktı

Trunkasyon artefaktı MR imajlarında özellikle sinyal şiddetinde keskin geçişlerin olduğu BOS-spinal kord gibi alanlarda Fourier dönüşümlerindeki sorunlara bağlı görülür ve paralel çizgilenmeler ile kendini gösterir (14).

Aliasing Artefaktı

Görüntüleme alanının görüntülenen vücut bölümünden küçük olması durumunda izlenen bir artefakt tipidir. Görüntüleme alanına sığmayan vücut bölümü görüntünün diğer tarafında belirir. Önlenmesi için görüntüleme alanının uygun büyüklükte ayarlanması önem taşır (14).

Akciğer Parankimi

PET/BT görüntülemesinde BT görüntülerinin iyonizan radyasyonu azaltmak amacıyla düşük dozda elde edilmesi, nefes tutturulmadan alınması ve iki görüntülemenin ardışık elde edilmesi akciğer parankiminin ideal şartlarda görüntülenememesine yol açmaktadır. Bununla birlikte BT komponenti özellikle F-18 FDG tutulumu göstermeyen küçük boyutlu parankim nodüllerini tespit edebilmemize yardımcı olmaktadır. PET/MR sistemlerinde ise akciğer parankiminin değerlendirmesi daha zorlayıcı olabilmektedir.

Akciğer parankiminin MR görüntülemeindeki en önemli zorluğu doku yoğunluğunun az olup büyük kısmını hava oluşturmasıdır. Bu da proton yoğunluğunun düşük olması anlamına gelmektedir. MR sinyalinin proton yoğunluğu ile direkt ilişkili olması düşük sinyal-gürültü oranı yaratmakta ve görüntüleme için büyük problem oluşturmaktadır (15). Ayrıca keskin hava-yumuşak doku geçişleri ve solunum-kardiyak hareketler sonucu oluşan artefaktlar MR görüntülemeyi güçleştirmektedir. Kısa T2 relaksasyon zamanına (1-2 ms) sahip akciğer dokusunu konvansiyonel MR sekansları ile değerlendirebilmek iyice zorlaşmaktadır. Radyofarmasötik tutulumu gösteren lezyonlarda ise enflamatuvar/enfektif durumlar ile malignite ayırımı yapmak da güçleşmektedir. Bazı hastaların mevcut toraks BT görüntülemeleri bu değerlendirmede yardımcı olsa bile görüntülemeler arasındaki değişimler değerlendirilememektedir.

Birçok PET/MR protokolünde mevcut olan aksiyal T1A Dixon görüntülemenin parankim nodülü tespit edebilme oranı 10 mm'den küçük nodüllerde %40, 6mm'den küçük nodüllerde ise %15 gibi kabul edilemez düzeylere inmektedir. Bu oran solunum gated T2A görüntüler için sırasıyla %48 ve %76 değerlerine yükselse de özellikle

akciğer metastazlarının sık izlendiği malignitelerde yeterli ölçüde değildir (16).

MR görüntüleme doğası itibarıyla BT'ye kıyasla gelişime daha açık bir modalitedir. Zaman içerisinde geliştirilen ve eko süresini iyice kısaltan yüksek rezolüsyonlu UTE ve ZTE sekansları akciğer görüntülemesindeki sorunları minimize etmektedir. Farklı rekonstrüksiyon yöntemleriyle birlikte neredeyse milimetrik boyutlu nodüllerin tespit edilebildikleri gösterilmiştir (17,18,19). ZTE'nin UTE'ye kıyasla daha kısa sürede alınması ve daha az artefakt izlenmesi en büyük avantajları olmakla birlikte çok kısa eko zamanı nedeniyle mediasten gibi yumuşak doku alanlarının görüntülenmesinde yetersizliğe neden olmaktadır (20). Ayrıca bu sekansların ticari firmalar tarafından ek paket olarak satılması merkezlere yeni bir mali külfet anlamına gelmektedir.

PET/MR cihazına sahip merkezlerin neredeyse tamamının PET/BT cihazına da sahip olması bu sorun için ideal olmayan bir çözüm alternatifi sağlamaktadır. Özellikle akciğer metastaz olasılığı yüksek olan veya halihazırda akciğer metastazları mevcut hastalarda toraks bölgesinden ek PET/BT görüntülerinin alınması bu sorunlara geçici ve ideal olmayan bir çözüm alternatifi olabilir. Bununla birlikte bu yöntem hastayı ek iyonizan radyasyona maruz bırakmakta, tek cihaz-tek çekim avantajını ortadan kaldırmakta ve çekim prosedürünü uzatmaktadır. Kısıtlı bir alan olması nedeniyle her ne kadar uzun bir görüntüleme olmasa da PET/BT cihazını da işgal ederek günlük işleyişi bozabilmektedir. Dolayısıyla ilerleyen dönemlerde sekanslarda ve rekonstrüksiyon yöntemlerindeki gelişmeler ile birlikte ulaşılabilirliğin artması bu problemlerin çözümünü sağlayacaktır.

Güvenlik ve Personel Eğitimi

PET/MR cihazları MR komponentinin yarattığı yüksek manyetik alan nedeniyle önemli riskler taşır ve sıkı güvenlik protokollerine ihtiyaç duyar.

Hastanın tıbbi geçmişinin ayrıntılı bir şekilde sorgulanması hayati önem taşır. Hastalarda mevcut olabilecek ferromanyetik implantlar manyetik alan ile etkileşime gireceği için hareket edebilir ve hayati problemlere yol açabilir. Mevcut implantlar manyetik alandan etkilenmeyecek şekilde üretilse dahi RF enerjisi nedeniyle ciddi ısınmalar ve yanıklara neden olabilir. Ayrıca beyin pili, pacemaker gibi elektronik cihazların elektronik aksamlarını bozarak işlevsiz hale getirebilir. Mevcut implantlar MR uyumlu dense dahi bu belli koşullar için geçerlidir. Örneğin 1.5 Tesla cihaz için

güvenli olan bir malzeme 3T cihaz için olmayabilir. Bu yüzden üretici firmalar malzemeleri için manyetik alan gücü, RF dalgaları gibi güvenli olan çekim koşullarını açıklayan talimatlar oluştururlar. Eğer malzeme ile ilgili şüphe mevcutsa emin olunana kadar hasta PET/MR cihazına alınmamalıdır. Ayrıca hastalar ayrıntılı olarak bilgilendirilmeli ve çekim öncesi tüm metal eşyaları çıkartılmalıdır. Hastaların özel çekim önlükleri ile çekime alınması güvenliği artıracığı gibi hasta konforunu da yükseltecektir.

PET/MR cihaz odasına girecek tüm malzemelerin manyetik olup olmamasına özenle dikkat edilmelidir. Acil durumlarda aspiratör, defibrilatör gibi cihazların panikle odaya sokulması gerek ülkemizde gerekse de dünyada ölümle sonuçlanabilen birçok kazaya neden olmuştur. Çekim odasına yalnızca MR uyumlu cihazlar alınmalıdır. Fantomlar, tamir araç-gereçleri, temizlik malzemeleri, tıbbi malzemeler, ilgili personellerin kişisel eşyaları dahil olmak üzere odaya girecek tüm malzemelerin kontrolü gerek insan güvenliği gerekse de cihaz güvenliği için elzemdir.

Hasta haricinde PET/MR odasına teknisyenler, tıbbi fizikçiler, bakım elemanları, temizlik personeli gibi birçok sağlık personelinin girmesi gerekir. Odaya girecek personeller önceden belirlenmelidir. Bu personeller güvenlik prosedürleri açısından düzenli olarak eğitilmelidir. Ayrıca acil durumlarda nasıl davranılacağı ile ilgili prosedürler oluşturulmalı ve ilgili personellerin düzenli eğitimi sağlanmalıdır. Çekim odasında MR uyumlu acil durum ekipmanlarının hazırda bulundurulması gerekmektedir. Protokollerin oluşturulması acil durumlarda yaşanacak panik sonucu oluşabilecek hataların engellemesi açısından büyük önem taşır.

Diğer Sorunlar

PET/MR cihazları anlatıldığı gibi büyük bir mühendislik ürünüdür. Bu da arızalara daha yatkın hale getirdiği gibi bakım maliyetlerini yükseltmektedir. Ülkemizde PET/MR görüntüleme için ek bir ücret ödenmediği de göz önüne alındığında yaygınlaşmasını engellemektedir. Teknolojik gelişmeler ve politikadaki değişiklikler bu sorunların çözümüne katkı sağlayabilir.

PET/MR cihazı gantri boyutunun dar olması ve vücut koili gereksinimi nedeniyle daha klostrifobik bir ortam oluşturmaktadır. Ayrıca her eklenen MR sekansı görüntülemeyi uzatmakta ve hastaların sabrını zorlayabilmektedir. Optimal çekim protokolü ve sekans seçimleri her hastalık için değişebilmektedir. Bölgesel ek

MR sekans ihtiyacı hastadan hastaya, durumdan duruma değişebilir. Çekim protokollerinin önceden oluşturulması ve bölgesel ek görüntülemelerin ilgili doktor tarafından karar verilmesi uygun olacaktır. Birçok hastalık için standart bir çekim protokolünün mevcut olmaması bir eksiklik olup ilerleyen dönemlerde yeni çalışmalarla ortaya konulmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç

Hayatımıza görece yeni girmiş olan PET/MR görüntüleme sağladığı yüksek doku rezolüsyonu, radyasyon avantajı ve fonksiyonel bilgiler ile yeni bir dönemi başlatmıştır. PET/BT'nin eksik kaldığı yerleri tamamlamakla birlikte kendi sorunlarını da birlikte getirmiştir. PET/MR sisteminin sahip olduğu sorunları bilmek hatalı raporlamaların önüne geçecektir. Klinik endikasyonları birçok alanda halen oturmamış olup geniş ve kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gerek PET gerek MR komponentlerindeki gelişmeler gerekse de yazılım alanındaki ilerlemeler mevcut sorunların çözümünde umut vadetmektedir.

Kaynaklar

1. Phelps ME, Hoffman EJ, Mullani NA, Ter-Pogossian MM. Application of annihilation coincidence detection to transaxial reconstruction tomography. *J Nucl Med.* 1975;16:210-224.
2. Townsend DW. Combined positron emission tomography-computed tomography: the historical perspective. *Semin Ultrasound CT MR.* 2008;29:232-235.
3. Afaq A, Faul D, Chebrolu VV, et al. Pitfalls on PET/MRI. *Semin Nucl Med.* 2021;51:529-539.
4. Keller SH, Holm S, Hansen AE, et al. Image artifacts from MR-based attenuation correction in clinical, whole-body PET/MRI. *MAGMA.* 2013;26:173-181.
5. Schramm G, Rigie D, Vahle T, et al. Approximating anatomically-guided PET reconstruction in image space using a convolutional neural network. *Neuroimage.* 2021;224:117399.
6. Mehranian A, Zaidi H. Clinical assessment of emission- and segmentation-based MR-guided attenuation correction in whole-body time-of-flight PET/MR imaging. *J Nucl Med.* 2015;56:877-883.
7. Jung JH, Choi Y, Im KC. PET/MRI: Technical challenges and recent advances. *Nucl Med Mol Imaging.* 2016;50:3-12.
8. Delso G, ter Voert E, de Galiza Barbosa F, Veit-Haibach P. Pitfalls and limitations in simultaneous PET/MRI. *Semin Nucl Med.* 2015;45:552-559.
9. Noda C, Ambale Venkatesh B, Wagner JD, Kato Y, Ortman JM, Lima JAC. Primer on commonly occurring MRI artifacts and how to overcome them. *Radiographics.* 2022;42:E102-E103.

10. Catana C. Motion correction options in PET/MRI. *Semin Nucl Med.* 2015;45:212-223.
11. Ladefoged CN, Hansen AE, Keller SH, et al. Impact of incorrect tissue classification in Dixon-based MR-AC: fat-water tissue inversion. *EJNMMI Phys.* 2014;1:101.
12. Schramm G, Maus J, Hofheinz F, et al. Evaluation and automatic correction of metal-implant-induced artifacts in MR-based attenuation correction in whole-body PET/MR imaging. *Phys Med Biol.* 2014;59:2713-2726.
13. Koch KM, Brau AC, Chen W, et al. Imaging near metal with a MAVRIC-SEMAC hybrid. *Magn Reson Med.* 2011;65:71-82.
14. Morelli JN, Runge VM, Ai F, et al. An image-based approach to understanding the physics of MR artifacts. *Radiographics.* 2011;31:849-866.
15. Sim AJ, Kaza E, Singer L, Rosenberg SA. A review of the role of MRI in diagnosis and treatment of early stage lung cancer. *Clin Transl Radiat Oncol.* 2020;24:16-22.
16. de Galiza Barbosa F, Geismar JH, Delso G, et al. Pulmonary nodule detection in oncological patients - value of respiratory-triggered, periodically rotated overlapping parallel T2-weighted imaging evaluated with PET/CT-MR. *Eur J Radiol.* 2018;98:165-170.
17. Chassagnon G, Martin C, Ben Hassen W, et al. High-resolution lung MRI with ultrashort-TE: 1.5 or 3 Tesla? *Magn Reson Imaging.* 2019;61:97-103.
18. Zhu X, Chan M, Lustig M, Johnson KM, Larson PEZ. Iterative motion-compensation reconstruction ultra-short TE (iMoCo UTE) for high-resolution free-breathing pulmonary MRI. *Magn Reson Med.* 2020;83:1208-1221.
19. Crimi F, Varotto A, Orsatti G, et al. Lung visualisation on PET/MRI: implementing a protocol with a short echo-time and low flip-angle volumetric interpolated breath-hold examination sequence. *Clin Radiol.* 2020;75:239.e15-239.e21.
20. Bae K, Jeon KN, Hwang MJ, et al. Comparison of lung imaging using three-dimensional ultrashort echo time and zero echo time sequences: preliminary study. *Eur Radiol.* 2019;29:2253-2262.