



# Pediatric Oncolojide PET/MR Görüntüleme

## PET/MR Imaging in Pediatric Oncology

© Seda Gülbahar Ateş, © Lütfiye Özlem Atay

Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

### Öz

Hibrit pozitron emisyon tomografisi/manyetik rezonans (PET/MR) hasta radyasyon dozunu %70-80'e kadar azaltması, yüksek yumuşak doku rezolüsyonu, tek anestezi seansı ile tanısal MR ile PET görüntülerin elde edilmesi gibi özellikleri ile PET/MR'ın belirgin avantajlı kabul edildiği hasta gruplarının başında pediatrik hastalar gelmektedir. Pediatrik hastaların radyasyona erişkinlerden daha duyarlı olması ve takipte tekrarlayan görüntülemelere maruz kalması nedeniyle, PET/MR görüntüleme ile bu hastalarda kümülatif radyasyon dozunun azaltılması oldukça önemlidir. Pediatrik onkoloji hastalarında yapılan hibrit PET/MR çalışmaları, PET/MR'ın bu hastalarda radyasyon dozunu azaltmasının yanı sıra lezyon belirlemede tanısal performansının en az PET/bilgisayarlı tomografi kadar iyi olduğunu göstermiştir. Bu nedenle çalışmalar pediatrik onkolojide PET/MR'ın erişilebilir olduğu durumlarda primer PET görüntüleme modalitesi olarak kullanımını desteklemektedir. Bu derlemenin amacı pediatrik onkoloji hastalıklarında hibrit PET/MR görüntülemenin yerini literatür eşliğinde anlatmaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Pozitron emisyon tomografi/manyetik rezonans görüntüleme, hibrit görüntüleme, pediatrik tümörler

### Abstract

Pediatric patients are among the primary patient groups where positron emission tomography/magnetic resonance imaging (PET/MRI) is considered to have significant advantages, due to its ability to reduce radiation dose by up to 70-80%, high soft tissue resolution, and to obtain diagnostic MRI and PET images in a single anesthesia session. Due to the fact that pediatric patients are more sensitive to radiation compared to adults and are exposed to repeated imaging during follow-up, reducing the cumulative radiation dose in these patients through PET/MRI imaging is of great importance. Studies on hybrid PET/MRI in pediatric oncology patients have shown that, in addition to reducing radiation dose, PET/MRI provides diagnostic performance in lesion detection that is at least as good as PET/computed tomography, owing to its high soft tissue resolution. Therefore, when available, PET/MR is supported as the primary PET imaging modality in pediatric oncology. The aim of this review is to present the role of hybrid PET/MR imaging in pediatric oncology diseases in light of the literature.

**Keywords:** Positron emission tomography/magnetic resonance imaging, hybrid imaging, pediatric tumors

### Giriş

Günümüzde pozitron emisyon tomografisi/bilgisayarlı tomografi (PET/BT) görüntüleme görece kolay ulaşılabilirliği, anatomik ve moleküler bilgiyi birleştirerek tek seansta tüm vücut görüntülemeye olanak sağlaması ve onkoloji hastalarının yönetimindeki gösterilen katkısı ile çoğu kanserlerin değerlendirmesinde önemli görüntüleme yöntemlerinden biridir. PET ile manyetik

rezonans (MR) görüntüleme yöntemlerinin birleştirilmesi ile elde edilen hibrit PET/MR kameralarının klinik ve araştırma uygulamalarında yaygınlaşması sonucunda, PET/MR'ın hangi alanlarda PET/BT'nin yerini alabileceği önemli bir araştırma ve tartışma konusu olmuştur. PET/MR'ın PET/BT'ye göre belirgin avantajlı kabul edildiği hasta gruplarının başında ise pediatrik hastalar gelmektedir.

Pediatrik hastalarda PET/MR'ın kullanımının en

### Yazışma Adresi/Address for Correspondence

Seda Gülbahar Ateş, Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

E-posta: sedagulbahar@gazi.edu.tr ORCID ID: orcid.org/0000-0003-0422-0863

Geliş Tarihi/Received: 27.08.2024 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 makededir.

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.

önemli avantajı radyasyon maruziyetinin PET/BT'ye göre daha düşük olmasıdır (1). Çünkü PET/MR'ın anatomik korelasyon ve atenüasyon düzeltmede kullanılan bileşeni olan MR, BT'den farklı olarak iyonizan radyasyon içermez. Ayrıca PET/MR sisteminde PET ve MR sayımları ile eş zamanlı toplandığından ve MR sekansları nedeniyle her bir yatak görüntüleme süresinin görece uzun olması nedeniyle görüntü kalitesinden ödün vermeksizin PET radyofarmasötik dozunun azaltılması olasıdır (2). Yetmiş sekiz pediatrik hasta üzerinde yapılan retrospektif bir incelemede, 5 yıllık bir dönemde PET/BT'den alınan ortalama kümülatif dozun 78,9 mSV olduğu bulunmuştur (3). Pediatrik hasta popülasyonunda PET/MR'ın %70-80'e kadar enjekte edilen aktivitenin ve total radyasyon dozunun azaltılmasını sağladığı çalışmalarda gösterilmiştir (4,5,6,7). Merkezimizde 77 pediatrik onkolojik PET/MR incelemesi ile yapılan bir çalışmada, standart olarak 1,9 MBq/kg F-18 florodeoksiglukoz (F-18 FDG) dozunda ve 5 dakikalık PET yatak süresinde list-modda elde ettiğimiz PET görüntülerinden retrospektif simülasyonda pediatrik onkolojik PET/MR görüntüleme 1,2 MBq/kg F-18 FDG dozunun yeterli olduğu gösterilmiştir (6). Pediatrik hastaların radyasyona erişkinlerden daha duyarlı olması ve takipte tekrarlayan görüntülemelere maruz kalması nedeniyle, PET/MR görüntüleme ile bu hastalarda kümülatif radyasyon dozunun azaltılması oldukça önemlidir.

PET/MR'ın diğer bir avantajı yüksek yumuşak doku rezolüsyonudur. Pediatrik hastalarda sarkomlar, lenfomalar, beyin tümörleri gibi hastalıkların sıklığı da göz önünde bulundurulduğunda, pediatrik tümörlerin değerlendirilmesinde PET/MR yüksek yumuşak doku rezolüsyonu nedeniyle PET/BT'ye üstünlük sağlamaktadır. Merkezimizde yapılan pediatrik onkoloji hastalarında PET/BT ve PET/MR'ın karşılaştırıldığı çalışmada, PET/MR'ın PET/BT'ye göre daha iyi anatomik korelasyon sağladığı gösterilmiştir (8). Ayrıca MR'dan kaynaklanan yüksek yumuşak doku rezolüsyonu, pediatrik hastalarda yaş ilişkili normal fizyolojik bulguları patolojik bulgulardan ayırmada yardımcı olabilmektedir (9). PET/MR görüntüleme, MR'dan elde edilen fonksiyonel ve anatomik parametrelerle farklı PET radyofarmasötiklerinin kullanımı ile elde edilen moleküler ve metabolik bilgiyi eş zamanlı elde ederek, uzaysal ve zamansal olarak eşleştirilmiş gerçek bir multiparametrik yaklaşım sağlamaktadır. PET/MR'ın yüksek yumuşak doku rezolüsyonu ve multiparametrik görüntüleme yaklaşımı yumuşak doku-tümör dokusu

ayırımı, tümörün lokal yayılımı, reaktif-ödematöz değişiklikler ve kemik iliğinin değerlendirilmesi gibi tanısal zorluk olan durumlarda avantaj sağlayabilmektedir (10).

Pediatrik hastalarda özellikle 6 yaş altında görüntüleme sırasında anestezi gerekmesi nedeniyle, tek seansta standart MR ve PET görüntülerinin elde edilmesi tekrarlayan anestezi ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. PET/MR görüntüleme ile tek sedasyon-anestezi seansı ile görüntüleme tamamlanabildiğinden özellikle anestezi ilişkili yan etki ve komplikasyon riski azalmaktadır (1,10). Ayrıca PET/MR, MR'dan elde edilen veriyi kullanarak PET'te kısmi hacim düzeltmesini ve MR-temelli hareket düzeltme yöntemleri ile hareket artefaktlarının düzeltilmesini sağlayabilmektedir (11,12).

PET/MR'ın PET/BT'ye göre sınırlı olduğu alanlardan biri küçük akciğer lezyonlarının belirlenmesidir (13). Ancak yeni geliştirilen *zero-time echo* (ZTE) gibi MR sekansları ile özellikle akciğer nodüllerinin saptanmasındaki sınırlılığın önüne geçilmeye çalışılmaktadır (14). Ancak pediatrik hastalarda akciğer metastazlarının belirlenmesinde ek toraks BT görüntüleme halen önemini korumaktadır (2). PET/MR'ın diğer başlıca dezavantajları ise sınırlı erişilebilirliği, yüksek maliyeti, uzun çekim süreleri, metal etkileşimi ve artefaktlarıdır.

Pediatrik onkolojide PET/BT ve PET/MR'ı karşılaştıran sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar PET/MR'ın PET/BT'ye göre belirgin radyasyon dozunu azalttığını ve lezyon belirlemede tanısal performansının en az PET/BT kadar iyi olduğunu göstermiştir (7,15,16,17,18). Bu sonuçlar pediatrik onkolojide PET/MR'ın erişilebilir olduğu durumlarda primer görüntüleme modalitesi olarak kullanımını desteklemektedir. Merkezimizde de pediatrik onkoloji hastalarının görüntülenmesinde primer olarak tüm vücut PET/MR görüntüleme yapılmaktadır. Bu derlemenin amacı pediatrik onkoloji hastalıklarında hibrit PET/MR görüntülemenin yerini literatür eşliğinde anlatmaktır.

### **Pediatrik Onkolojik Görüntüleme PET/MR Görüntüleme Protokolleri**

Pediatrik onkolojik PET görüntüleme standart olarak verteksten ayak ucuna kadar tüm vücut görüntüleme yapılmaktadır (10). Merkezlerin tercihine göre pediatrik onkolojik PET/MR görüntüleme protokolleri değişmektedir (9). Tüm vücut görüntüleme için; atenüasyon düzeltmede de kullanılan 2-nokta Dixon T1-ağırlıklı sekanslar, *single-shot fast spin-echo* (SS-FSE) gibi sıvıya duyarlı T2-ağırlıklı sekanslar standart olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca STIR (*short tau inversion recovery*) sıvıya duyarlı yağ baskılı sekanstır ve özellikle koronal STIR sekansı kemik metastazı riskinin yüksek olduğu hastalıklarda (nöroblastom gibi.) görüntüleme protokolüne eklenir. Bunların haricinde difüzyon-ağırlıklı görüntüleme (DAG) tümör karakterizasyonuna katkı sağlayabilen ve onkolojik amaçlı MR görüntülemeye çok tercih edilen diğer bir sekanstır. Tüm vücut görüntülemeye sonradan primer tümör veya bilinen metastaz sahasına (karaciğer, akciğer gibi.) özgün ek aksiyel yüksek rezolüsyonlu sıvıya duyarlı-yağ baskılı MR sekansları alınabilmektedir (2,10). Nöroonkolojik hastalarda beyne yönelik alınan MR sekansları “Nöroonkolojide PET/MR Görüntüleme” bölümünde anlatılmıştır.

#### **Pediatrik Onkolojik Görüntülemeye Zorluklar ve PET/MR Görüntüleme**

PET/MR'ın pediatrik hastalarda faydalarından biri yüksek yumuşak doku rezolüsyonu ile yaş ilişkili fizyolojik bulgulardan anormal bulguların ayırımını kolaylaştırmasıdır (9). Pediatrik yaş grubunda en sık fizyolojik tutulumlardan biri Waldeyer halkası ve servikal lenf nodlarında izlenen F-18 FDG tutulumlarıdır. MR görüntüleri normal tonsil yapısının homojen sinyal intensitesi ve morfolojisi ile ayırımına yardımcı olmaktadır. Ayrıca genellikle tonsillerde simetrik olarak F-18 FDG tutulumu izlenmektedir (9). Benign F-18 FDG pozitif servikal lenf nodları da pediatrik hastalarda sıklıkla izlenmektedir. Çocuklarda lenf nodları için patolojik kısa aks boyut kriteri seviye 2'de 1,5 cm, diğer istasyonlarda 1 cm olarak belirlenmiştir (19). DAG boyundaki lenf nodlarının belirlenmesine ve karakterizasyonuna katkı sağlamaktadır (20). Ayrıca çocuklarda posterior boyunda, supraklaviküler-skalen alanlarda ve paraspinal yumuşak dokularda sıklıkla kahverengi yağ dokusu ile uyumlu fizyolojik artmış F-18 FDG tutulumları izlenmektedir. Bu tutulumlar genellikle simetrik ve yaygın olmakla birlikte, nadiren asimetrik ve sınırlı sahada olabilmektedir. Böyle durumlarda F-18 FDG tutulumunun MR görüntülerinde lezyon karşılığının belirlenmemesi kahverengi yağ dokusu lehine değerlendirilmekte olup, okuyucu güvenini artırmaktadır.

Timusun görünümü çocuklarda yaşa, fizyolojiye ve tedavi durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Küçük çocuklarda timus büyük görünürken, adolesan dönemde küçülmektedir. Kemoterapi sırasında genellikle timus küçülmektedir. Tedavi sonrası 12 ay içinde iyileşme fazında timus normal boyutlarının 1,5 katına kadar büyür

ve artmış F-18 FDG tutulumu göstermektedir (9,21). Bu timik rebound bulgusu MR görüntülerinde diffüz sinyal intensitesi ve DAG'de difüzyon kısıtlaması olmaması ile ayırt edilebilir (9).

Pediatrik hastalarda diğer bir zorluk kemik iliğinin değerlendirilmesi ve fizyolojik kemik iliği değişimleridir (9). Doğumda tüm iskelet sisteminde aktif kırmızı kemik iliği izlenmektedir. Ancak gelişim sürecinde belli bir sırayla inaktif sarı kemik iliğine dönüşüm izlenmektedir. Yaşamın ilk yılı sırasında uzun kemiklerin epifiz kısmında, erken çocukluk döneminde diafiz ve geç çocukluk döneminde metafizlerde yağlı sarı kemik iliğine dönüşüm olmaktadır. Son değişiklik proksimal uzun kemiklerin proksimal metafizlerinde izlenmekte olup, adolesanlarda ve genç erişkinlerde bu alanlarda rezidüel kırmızı kemik iliği izlenebilmektedir (9). İnaktif sarı kemik iliğinin yağ oranı yüksek olup, tüm sekanslarda cilt altı yağ dokusu ile benzer intensitededir. Kırmızı kemik iliğinin ise sıvı içeriği daha yüksek olup, T1-ağırlıklı görüntülerde kas doku intensitesine benzer intensitede veya biraz daha hiperintens izlenmektedir (22). T2-ağırlıklı FSE veya STIR gibi sıvı duyarlı ve yağ baskılı sekanslar metastazların belirlenmesinde, yüksek sıvı içeriği ve artmış vaskülarite nedeniyle, yüksek duyarlılık göstermektedir. Ancak kırmızı kemik iliği olan çocuklarda MR'ın metastazları ayırmada duyarlılığı düşmektedir. Bu nedenle F-18 FDG PET'in MR'a eklenmesi metastazların belirlenmesinde duyarlılığı artırmaktadır (9,23). Kemik iliği metastazlarının değerlendirilmesinde hibrit PET/MR'dan elde edilen multiparametrik bilgi (artmış F-18 FDG tutulumu, T1-ağırlıklı MR'da düşük, T2-ağırlıklı MR'da yüksek sinyal intensitesi, DAG'da difüzyon sinyal artışı gibi) çocuk hastaların değerlendirmesine katkı sağlayarak okuyucu güvenini artırabilmektedir.

#### **Pediatrik Onkolojik Hastalıklar ve PET/MR Görüntüleme**

##### **Santral Sinir Sistemi Tümörleri**

Santral sinir sistemi (SSS) tümörleri tüm pediatrik malignitelerin %20'sini oluşturmaktadır (1,24). Çocuklarda beyin tümörleri lösemilerden sonra ikinci en sık maligniteler iken, en sık solid tümörlerdir. Çocuklarda primer malign SSS patolojilerinin %80'ininden fazlasını astrositomlar (çoğunluğu düşük gradeli-pilositik astrositom), medulloblastom (tüm SSS tümörlerinin %15'i) ve ependimomlar oluşturur (25). Pediatrik hastalarda beyin tümörleri oldukça heterojen bir patoloji grubudur. Nörofibromatozis tip 1, 2 (pilositik astrositoma, düşük

gradeli gliomalar, ependimomlar), Turcot sendromu (medulloblastom, yüksek gradeli gliomalar), Li-Fraumeni sendromu, Gorlin sendromu ve von Hippel-Lindau sendromu (hemanjioblastom) beyin tümörlerinin gelişimine risk faktörü olan genetik hastalıklardır (25).

Nroonkolojide konvansiyonel MR görüntüleme standart görüntüleme modalitesidir. Onkolojik tüm vücut PET/BT görüntülemenin aksine beyin PET/BT'de BT komponenti atenüasyon düzeltme dışında çok sınırlı klinik bilgi sağlamaktadır. Bu nedenle pediatrik nroonkolojide hibrit PET/MR görüntüleme düşük radyasyon içermesi yanında MR'ın sağladığı yüksek yumuşak doku rezolüsyonu ve fonksiyonel tanısal bilgi nedeniyle oldukça umut vadedicidir (26). Nroonkolojide kullanılan MR sekansları ile PET radyofarmastikleri ve klinik özellikleri ilgili ayrıntılı bilgiler "Nroonkolojide PET/MR Görüntüleme" bölümünde anlatılmıştır.

Pediatrik nroonkolojide hibrit PET/MR görüntüleme, erişkin hastalarda olduğu gibi tümör derecelendirmesi ve biyolojik özelliklerinin öngörülmesi, biyopsi yerinin belirlenmesi, tümör yaygınlığının belirlenerek cerrahi ve radyoterapi planlaması, tedavi ilişkili değişikliklerim rekürren hastalıktan ayırımında kullanılabilir. Farklı radyofarmasötikler ile yapılan PET görüntülerinden elde edilen metabolik ve moleküler bilgi ile MR sekanslarından elde edilen multiparametrik anatomik ve fonksiyonel bilginin eş zamanlı elde edilmesi pediatrik nroonkolojide tanısal doğruluğu iyileştirebilir. Erişkin hastalarda beyin tümörlerinin değerlendirilmesinde hibrit PET/MR görüntülemenin özellikle tedavi ilişkili değişiklikler-rekürren hastalık ayırımında olmak üzere tüm endikasyonlarda tanısal doğruluğu iyileştirdiği çalışmalarda gösterilmiştir (27,28,29,30). Ancak pediatrik nroonkoloji alanında hibrit PET/MR görüntüleme ile ilgili yapılmış oldukça sınırlı sayıda ve genellikle olgu serisi şeklinde çalışmalar mevcuttur. Marner ve ark. (31) 169 pediatrik beyin tümörü hastasında yaptığı görece geniş hasta serili hibrit F-18 fluoroetiltirozin (F-18 FET) PET/MR çalışmasında, tedavi almamış (58 lezyon) ve almış hastalarda (83 lezyon) tümöral/non-tümöral lezyon ayırımında PET/MR'ın (%96, %91) yalnız PET (%76, %83) ve yalnız MR'a (%90, %81) göre tanısal doğruluğu anlamlı olarak artırdığı gösterilmiştir.

Pediatrik beyin tümörlerinin tedavisinde tam rezeksiyon ana tedavi seçeneğidir. Erken dönemde post-operatif rezidü hastalığın belirlenmesi MR'da izlenen tedavi ilişkili değişiklikler nedeniyle önemli bir tanısal

zorluktur. Yirmi yedi hastada yapılan bir çalışmada erken post-operatif hibrit F-18 FET MR'ın tedavi ilişkili değişikliklerden rezidü hastalığı ayırmada özgüllüğünün (%100 vs. %75) ve doğruluğunun (%87 vs. %77) yalnız MR'a göre belirgin yüksek olduğu gösterilmiştir (32). Pediatrik hastalarda tanısal MR görüntüleri ile PET görüntülerinin tek seansta hibrit PET/MR kameraları ile elde edilmesinin biyopsi planlamasına katkı sağlayacağı küçük hasta serilerinde gösterilmiştir (33). Ayrıca olgu serilerinde hibrit PET/MR'ın tedavi yanıtını değerlendirmede, tümör progresyonunu psdoprogresyondan ayırmada, tedavi sonunda rezidü tümör dokusu varlığını değerlendirmede katkı sağlayabileceği gösterilmiştir (34,35). Hibrit PET/MR görüntüleme ile PET ve MR'dan elde edilen tamamlayıcı multiparametrik bilgilerin pediatrik beyin tümörlerinin değerlendirmesine katkısını değerlendiren daha geniş hasta serili çalışmalara ihtiyaç vardır.

#### Lenfomalar

Lenfomalar ocukluk ve adolesan çağındaki tümörlerin yaklaşık %10-15'ini oluşturmaktadır. Non-hodgkin lenfomalar (NHL) 15 yaş altında daha sıklıkla, 15-19 yaş aralığında hodgkin lenfoma (HL) daha sıklıkla (10,36). NHL görece daha heterojen bir hastalık grubu olup, çocukluk çağındaki en sık alt tipleri Burkitt lenfoma ve diffüz büyük B hücreli lenfomadır (37). Erişkinlerde olduğu gibi pediatrik lenfomaların evrelemesinde, interim tedavi yanıtı ve tedavi sonu yanıt değerlendirmesinde F-18 FDG PET yaygın olarak kullanılmaktadır. Pediatrik lenfoma hastalarında 5 yıllık sağ kalımın %90'ın üzerinde olması ve takipte tekrarlayan görüntülemelerin yapılması nedeniyle, radyasyon dozunun azaltılması bu hastalarda oldukça önemlidir (37).

Pediatrik lenfoma hastalarında PET/MR, kontrast enjeksiyonu gerektirmemesi ve radyasyon dozunu azaltması nedeniyle uygun bir görüntüleme modalitesidir. Pediatrik hastalarda PET/MR uygulamalarında en önemli noktalardan biri hasta uyumunu sağlamak amacıyla çekim süresinin ve protokolünün optimizasyonudur. Kirchner ve ark. (38) pediatrik lenfomalarda tüm vücut DAG ile PET/MR protokollerini karşılaştırdıkları çalışmalarında, pediatrik lenfomaların evrelemesinde F-18 FDG PET/MR görüntülemenin üstün olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu hastalarda kontrast uygulamanın veya DAG'ın PET/MR protokolüne eklenmesinin PET/MR'ın tanısal doğruluğunda anlamlı değişikliğe sebep olmadığı gösterilmiştir (38). Benzer şekilde Jannusch ve ark. (39) pediatrik lenfomalarda evrelemede ve izlemde

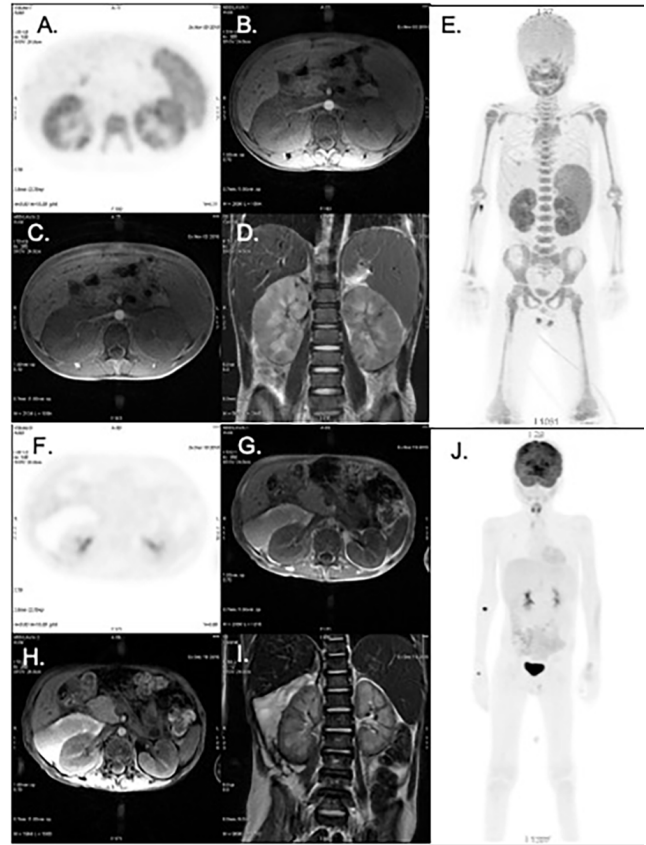
F-18 FDG PET/MR görüntülemesinde kontrast kullanımının tanısal performansa katkı sağlamadığını göstermiştir. Ancak erişkin hastalarda DAG'ın PET/MR protokolüne eklenmesinin düşük F-18 FDG tutulumu gösteren lenfomalarda ve ekstra-nodal hastalık belirlenmesinde katkı sağladığını gösteren çalışmalar mevcuttur (40). Çalışmalarda bu farklılık, pediatrik hastalardaki lenfomaların çoğunlukla yüksek F-18 FDG tutulumu göstermesi nedeniyle saptanabilirliğinin yüksek olması ile ilişkilili olabilir.

Pediatrik lenfomalarda PET/BT ve PET/MR'ı karşılaştıran erken çalışmalarda, PET/MR'ın %40-45 oranında radyasyon dozunu azalttığı; lezyonların belirlenmesi, karakterizasyonu ve Ann Arbor evrelemesinde PET/BT'ye benzer tanısal performans gösterdiği ortaya konmuştur (17,18). Verhagen ve ark. (41) pediatrik HL'de F-18 FDG PET/MR'ı değerlendiren ve referans yöntem olarak PET/BT'yi kullandıkları çalışmalarında, nodal ve ekstra-nodal hastalık belirlenmesinde evrelemede (duyarlılık %100, özgüllük %99,5) ve tedavi yanıtı belirlemede (duyarlılık %83,3, özgüllük %100) PET/MR'ın oldukça başarılı olduğunu göstermiştir. Ayrıca PET/BT ve PET/MR'ın modifiye Ann Arbor evrelemesinde ve Deuville skorlamasında yüksek uyum gösterdiği bulunmuştur (41). Bunların haricinde PET/MR'ın yüksek yumuşak doku rezolüsyonu nedeniyle malign lenf nodlarının belirlenmesinde PET/BT'ye benzer veya yüksek duyarlılık göstermesi lenfomalarda kullanımı açısından oldukça önemlidir (18). Pediatrik lenfoma hastalarının değerlendirmesinde PET/MR görüntülemenin bilinen avantajları ve tanısal performansının PET/BT'ye en azından benzer düzeyde olması nedeniyle, PET/MR erişilebilir olduğu durumlarda bu hastalarda tercih edilen PET görüntüleme modalitesi olabilir (Şekil 1).

Lenfoma hastalarında kemik iliği tutulumunu belirlemede F-18 FDG PET oldukça önemlidir. Güncel onkoloji kılavuzlarına göre özellikle pediatrik HL'de F-18 FDG pozitif 3 veya daha fazla odak varlığı durumunda kemik iliği biyopsisi yapılması gerekmemektedir. Bu nedenle kemik iliğini daha iyi değerlendirme potansiyeli bulunan PET/MR lenfomaların değerlendirmesinde belirgin katkı sağlamaktadır (Şekil 2) (7,16). Rashidi ve ark. (42) çocuk ve genç erişkinlerde kemik iliği metastazların saptanmasında F-18 FDG PET ile DAG bulgularının birlikte değerlendirilmesinin ayrı ayrı değerlendirilmelerine göre duyarlılık ve özgüllüğü belirgin artırdığını göstermiştir. PET/MR kemik iliği tutulumunun belirlenmesindeki üstün tanısal performansının yanı sıra değerlendirici güvenini

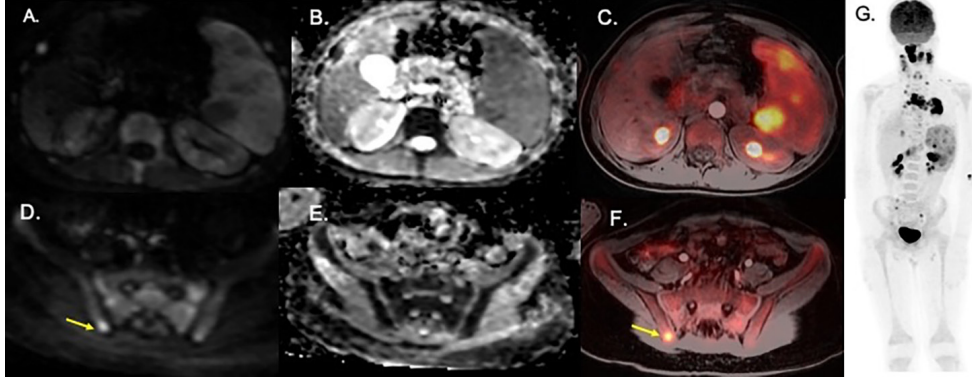
de artırmaktadır (9). Öte yandan PET/MR'ın görece sınırlı olduğu alanlardan biri akciğerin değerlendirmesidir. Subsantimetrik akciğer nodüllerini değerlendirmede PET/MR'ın duyarlılığı PET/BT'den düşüktür (43). Ancak lenfomaların akciğer tutulumunda genellikle nodüllerin büyük ve F-18 FDG tutulumunun yüksek olması nedeniyle, PET/MR ile akciğer tutulumu başarılı bir şekilde gösterilebilmektedir (17).

F-18 FDG PET lenfomaların interim ve tedavi sonu tedavi yanıtı değerlendirmesinde uzun yıllardır



**Şekil 1.** Dokuz yaşında Burkitt lenfoma tanılı erkek çocuk hasta. Evreleme (üst 2 sıra) ve tedavi yanıtı (alt iki sıra) amacıyla yapılan F-18 FDG PET/MR çalışmaları (A. Aksiyel PET, B. ve C. Aksiyel T1, D. Koronal T2, E. MIP evreleme görüntüleri, F. Aksiyel PET, G ve H. Aksiyel T1, I. Koronal T2, E. MIP tedavi yanıtı görüntüleri). Evreleme amacıyla yapılan FDG PET/MR görüntülemesinde hastada yaygın kemik iliği, dalak ve bilateral böbrek tutulumu dikkati çekmektedir. Kemoterapi sonrasında tedaviye yanıt belirleme amaçlı FDG PET/MR görüntülemesinde patolojik PET tutulumlarının kaybolduğu ve MR görüntülemesinde de böbrek parankim kalınlığının normale döndüğü dikkati çekmektedir

FDG: Florodeoksiglukoz, PET: Pozitron emisyon tomografi, MR: Manyetik rezonans, MIP: Maksimum yoğunluk projeksiyonu



**Şekil 2.** Dokuz yaşında diffüz büyük B hücreli lenfoma tanılı erkek çocuk, evreleme F-18 FDG PET/MR çalışması [A ve D. Aksiyel DAG, B ve E. Aksiyel apparent diffusion coefficient (ADC) haritalama, C. ve F. Aksiyel T1-ağırlıklı PET/MR füzyon görüntüleri]. Tüm vücut MIP PET görüntülerinde (G) boyunda, mediastende ve abdomende multipl lenf nodları izlenmektedir. Dalakta MR görüntülerinde ayırt edilebilen multipl lezyonlarda (A ve B) PET görüntülerde artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir. MIP görüntülerinde (G) kemik iliğinde diffüz düşük düzeyde tutulum izlenmektedir. Sağ iliak kanat sakroiliak eklem komşuluğunda inferiorda (sarı oklar) DAG'da (D) fokal sinyal artışı ve bu alanda PET görüntülerde yoğun artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir. Bulgu kemik iliği tutulumuyla uyumlu olarak değerlendirilmiştir. FDG: Florodeoksiglukoz, PET: Pozitron emisyon tomografi, MR: Manyetik rezonans, DAG: Difüzyon-ağırlıklı görüntüleme MIP: Maksimum yoğunluk projeksiyonu

kabul görmüş kritik bir yere sahiptir. Morakote ve ark. (44) pediatrik HL ve non-HL hastalarında tedavi yanıtını değerlendirmede DAG ile F-18 FDG PET/MR'ı karşılaştırdıkları çalışmalarında, HL hastalarında tedavi yanıtını değerlendirmede DAG ile F-18 FDG PET/MR'ın yüksek uyum gösterdiğini bulmuştur. Ancak non-HL'de DAG ile F-18 FDG PET/MR'da yanıt bulgularının uyumsuz olduğu ve birlikte değerlendirilmesi gerektiği gösterilmiştir (44). Bu nedenle lenfoma hastalarında tedavi yanıtı belirlemede hibrit PET/MR'da DAG'ın da değerlendirilmesi faydalı olabilir.

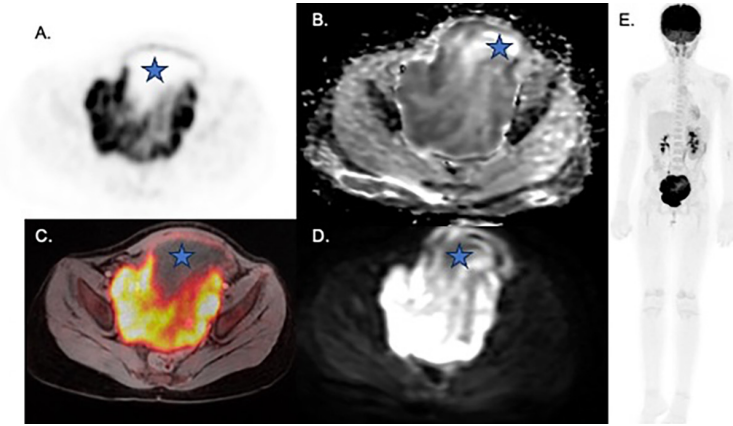
### Sarkomlar

Heterojen bir hastalık grubu olan sarkomlar tüm çocukluk çağı solid tümörlerinin yaklaşık %10'unu oluştururlar (45). MR görüntüleme pediatrik kemik ve yumuşak doku sarkomlarında tanı ve lokal tümör evrelemede standart görüntüleme modalitesidir. MR görüntüleme primer tümörün lokal yaygınlığının sınırlarının belirlenmesi, komşu organlarla ilişkisinin değerlendirilmesi, nörovasküler yapılar invazyonun ve lokal-bölgesel lenf nodlarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (46). F-18 FDG PET/BT ise tüm vücut evreleme-uzak metastazların araştırması amacıyla genellikle hasta değerlendirmesine dahil edilmektedir. Bu hastalarda hibrit PET/MR görüntüleme tek seansta lokal ve tüm vücut evrelemeye olanak sağlamaktadır (Şekil 3 ve 4). Pediatrik sarkomlar ve hibrit PET/MR görüntüleme

konusunda yapılmış az sayıda çalışma bulunmaktadır.

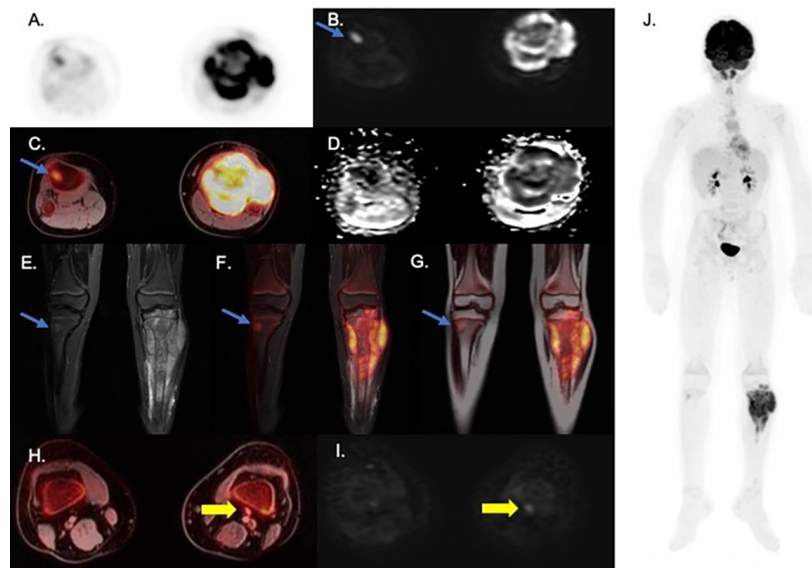
Pediatrik hastalarda yumuşak doku sarkomlarından en sık rabdomyosarkom izlenmektedir (45). Rabdomyosarkomlar en sık baş-boyun bölgesi ve pelvik bölgede izlenmektedir. Bu hastalarda en sık metastaz lokal lenf nodlarında ve akciğerde gözlenmektedir (10). F-18 FDG PET/BT pediatrik sarkomların evrelemede ve izlemede özellikle lenf nodu ve kemik metastazlarının belirlenmesinde başarılıdır (47). Pediatrik rabdomyosarkomların değerlendirmesinde bölgesel lenf nodlarının ve uzak metastazların değerlendirilmesinde F-18 FDG PET/BT veya PET/MR'ın kullanımı önerilmektedir (48). Bu hastaların değerlendirilmesine özellikle DAG'ı içeren hibrit PET/MR'ın kullanımı lenf nodlarının belirlenmesinde ve tedavi yanıtının değerlendirmesine katkı sağlayabilir. Ayrıca PET/MR izlemede nekrotik, rezidüel veya rekürren tümörlerin belirlenmesi ve biyopsi planlanmasına yardımcı olabilir (Şekil 3) (10). Pourmehdi Lahiji ve ark. (49) DAG'de difüzyon kısıtlaması yaygınlığı ile F-18 FDG PET'te tutulumun rabdomyosarkom hastalarında prognostik göstergeler olduğunu göstermiştir. Ayrıca yumuşak doku sarkomlarında radyoterapi sonrası rezidü hastalığı değerlendirmede hibrit F-18 FDG PET ile MR spektroskopinin kullanımının radyasyon ilişkili değişiklikler-canlı tümör ayırımında yararlı olabileceği düşünülmektedir (50).

Osteosarkom ve Ewing sarkom en sık pediatrik primer kemik maligniteleridir (45). Kemik sarkomları en



**Şekil 3.** On yaşında pelvis yerleşimli rabdomyosarkom tanılı kız çocuk hasta, evreleme F-18 FDG PET/MR çalışması (A. Aksiyel PET, B. Aksiyel ADC, C. Aksiyel T1-ağırlıklı MR-PET füzyon, D. DAG, E. MIP görüntüleri). Pelviste geniş boyutlu, anteriorunda kistik-nekrotik alanlar içeren (yıldızlar), DAG'da sinyal artışı, ADC görüntülerde difüzyon kısıtlaması gösteren, 10x11x9 cm boyutlu kitlede patolojik artmış F-18 FDG tutulumu izlenmiştir. DAG ve ADC MR görüntüleri kistik-nekrotik alanların değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır

FDG: Florodeoksiglukoz, PET: Pozitron emisyon tomografi, MR: Manyetik rezonans, ADC: Apparent diffusion coefficient, DAG: Difüzyon-ağırlıklı görüntüleme MIP: Maksimum yoğunluk projeksiyonu



**Şekil 4.** On yaşında osteosarkom tanılı erkek çocuk hasta, evreleme F-18 FDG PET/MR çalışması (A. Aksiyel PET, B. ve I. Aksiyel DAG, C. ve H. Aksiyel PET-T1 ağırlıklı MR füzyon, D. Aksiyel ADC, E. Koronal STIR, F. Koronal STIR-PET füzyon, G. Koronal T2-PET füzyon, J. MIP görüntüleri). Sol tibia proksimal diafizer kesiminde izlenen epifize uzanan, distalinde intramedüller uzanım göstererek orta diafizer kesimine dek uzanan (E, F, G), yumuşak doku komponentli, DAG'da (B) sinyal artışı, ADC (D) görüntülerinde difüzyon kısıtlaması gösteren kitlede PET görüntülerinde heterojen tarzda yoğun patolojik artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir. Ayrıca sağ tibia proksimal metafizer kesiminde (mavi oklar) DAG'da (B) sinyal artışı, STIR görüntülerde (E) hiperintens olarak izlenen öncelikle metastazla uyumlu değerlendirilen lezyonda fokal patolojik artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir. Ayrıca sol popliteal bölgede (H-I, sarı oklar) milimetrik lenf nodunda düşük düzeyde artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir. Sol tibia distal metafiz kesiminde MR görüntülerinde non-ossifiye fibrom ile uyumlu olarak değerlendirilen düşük düzeyde F-18 FDG tutulumu lezyon izlenmiştir

FDG: Florodeoksiglukoz, PET: Pozitron emisyon tomografi, DAG: Difüzyon-ağırlıklı görüntüleme, MR: Manyetik rezonans, ADC: Apparent diffusion coefficient, STIR: Short tau inversion recovery, MIP: Maksimum yoğunluk projeksiyonu

sık ekstremite yerleşimli olmakla birlikte, pelvik, kosta ve vertebral yerleşimli olabilmektedirler. Osteosarkom ve Ewing sarkomun evreleme ve tedavi yanıtı değerlendirmesinde kemik sintigrafisinin yerini F-18 FDG PET almıştır. Hibrit PET/MR görüntüleme, primer kemik sarkomlarının evreleme ve izleminde, cerrahi planlamasında ve tedavi yanıtı değerlendirmesinde tek seansta lokal tanısal MR görüntülemeye ve tüm vücudun metastaz değerlendirmesine olanak sağlaması nedeniyle faydalıdır (51).

Osteosarkomların yaklaşık %40'ında tümör trombusü izlenmektedir. Kötü prognozla ilişkili olan tümör trombuslerinin belirlenmesi cerrahi planlama açısından önemlidir. F-18 FDG PET/MR, F-18 FDG PET/BT'ye kıyasla tümör trombus yükünün ve ilgili damar yapısının daha doğru değerlendirilmesine olanak tanır (51). Osteosarkomların en sık metastaz yerleri akciğer, kemikler ve nadiren lenf nodlarıdır. Ewing sarkom en sık akciğere metastaz yaparken, kemik ve kemik iliği metastazları da izlenmektedir (10,51). Osteosarkom ve Ewing sarkomda primer tümör ile aynı kemikte ancak anatomik olarak primer tümörle bağlantısız küçük skip lezyonlar izlenebilmektedir. Bu lezyonların varlığı kötü prognozla ilişkilidir. Ayrıca ileri evre osteosarkom hastalarında kemik metastazları da izlenebilmektedir (51). F-18 FDG PET kostalar ve kalvaryum gibi küçük kemiklerde izlenen 1 cm'den büyük lezyonları belirlemede başarılı iken, MR ise subsantimetrik lezyonları belirlemede daha başarılıdır. Bu nedenle kemik-kemik iliği metastazlarının belirlenmesinde hibrit PET/MR'ın kullanımı iki modalitenin birbirini tamamlayıcı özellik göstermesi ile tanısal doğruluğu artırılabilir (Şekil 4) (42,51). Eiber ve ark. (52) malign kemik lezyonlarının anatomik sınırlarının belirlenmesi ve karakterizasyonunda hibrit PET/MR'ın PET/BT'ye üstün olduğunu göstermiştir. Bu sonuçların özellikle primer kemik tümörlerinin, erken kemik iliği infiltrasyonunun ve düşük F-18 FDG tutulumu gösteren tümörlerin değerlendirmesinde katkı sağlayacağı sonucuna ulaşmışlardır (52).

Chodyla ve ark. (53) Ewing sarkom tanılı 11 hastada yaptığı çalışmada, hibrit PET/MR görüntülemenin evrelemede ve tedavi yanıtı değerlendirmede başarılı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada evrelemede 11 hastanın 8'inde uzak metastaz izlenirken, bu hastaların tamamında metastaz varlığı PET/MR'da saptanmıştır. Ancak akciğer metastazı olan 3 hastanın 2'sinde PET/MR'da akciğer metastazı belirlenirken, 1'inde saptanamamıştır

(53). Yumuşak doku ve kemik sarkomlarının en sık metastaz yerlerinden biri olması nedeniyle akciğerin değerlendirmesi bu hastalarda oldukça önemlidir. Bu hastalarda akciğer metastazlarına genellikle rezeksiyon uygulanmakta olup, akciğer metastazlarının atlanması prognozu etkilemektedir (51). MR sekanslarındaki gelişmelere rağmen PET/MR'ın akciğer metastazlarını değerlendirmede sınırlılığı devam etmekte olup, hibrit PET/MR ile değerlendirilmiş pediatrik sarkom hastalarında tanısal toraks BT yapılmalıdır (2,15,43).

Pediatrik sarkomlarda hibrit PET/MR görüntülemede yapılan kantitatif-radiomik analizler ilişkili çalışmalar umut vadeden sonuçlar ortaya koymuştur. PET'ten elde edilen metabolik ve MR'dan elde edilen fonksiyonel bilgilerin kantitatif verilere dönüştürülmesi ile elde edilen görüntüleme biyobelirteçleri tümör derecesini, tümör alt tipini, prognozunu öngörmeye kullanılabilir. Ancak bu alandaki çalışmaların tamamı sınırlı hasta sayısına sahip olup, geniş hasta serisine sahip çalışmalara ihtiyaç vardır (54,55,56).

#### Langerhans Hücreli Histiositoz

Langerhans hücreli histiositoz (LHH), mononükleer fagositik hücrelerin anormal proliferasyon ve fonksiyonu ile karakterize, çocuklarda en sık izlenen histiositik hastalıktır. LHH'de en sık kemik, cilt, akciğer ve hipofiz bezi tutulumu olmakla birlikte tüm organlarda tutulum izlenebilir. LHH'de klinik spektrum yavaş seyirli tek lezyonlardan multisistem tutulumla giden agresif hastalık arasında değişmektedir. Mortal seyreden kötü prognozlu hastalıkla ilişkili olan karaciğer, dalak ve kemik iliği tutulumu yüksek riskli hastalık olarak sınıflandırılmaktadır. Tedavi seçenekleri risk durumuna göre değişmekte olup, düşük riskli tek lezyonlarda lokal tedaviler ve yüksek riskli multisistem hastalıklarda agresif sistemik tedaviler uygulanmaktadır (46,57).

LHH tanısında ve evrelemede radyolojik görüntüleme oldukça önemlidir. Ayrıca görüntüleme doğru biyopsi yerinin belirlenmesinde yardımcı olabilir. LHH'nin görüntülenmesinde konvansiyonel olarak radyografi ve kemik sintigrafisi kullanılmakla birlikte, F-18 FDG PET'in duyarlılığının ve özgüllüğünün daha yüksek olduğu gösterilmiştir (46). Ayrıca F-18 FDG PET'in tedavi sonunda aktif lezyonların ve tedavi edilmiş inaktif lezyonların belirlenmesini sağlaması, tedavi sonunda konvansiyonel yöntemlerden daha erken dönemde yanıtı belirlemesi önemli avantajlarıdır (58). Ferrell ve ark. (59) 107 pediatrik LHH tanılı hastada yaptığı çalışmada, PET



ve konvansiyonel görüntülemelerde uyumsuzlukların büyük kısmının F-18 FDG PET'te pozitif tutulum olan ancak konvansiyonel görüntülemelerde saptanamayan lezyonlar veya konvansiyonel görüntülemelerde saptanan ancak inaktif olan lezyonlar ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenle de F-18 FDG PET/BT'nin LHH tanılı hastaların değerlendirilmesinde kritik öneme sahip olduğu sonucuna varılmıştır (59).

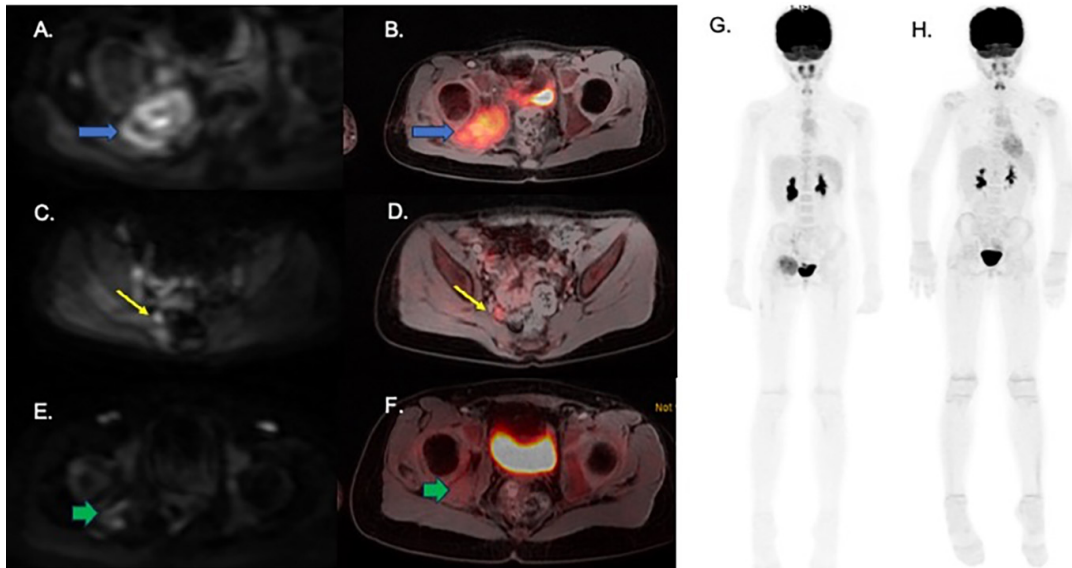
LHH tanılı pediatrik hastalarda PET/BT ve PET/MR hastalık yaygınlığını daha iyi karakterize etmesi, tüm vücut görüntülemeye olanak sağlaması, hastalık aktivitesini ve tedavi yanıtını değerlendirmesi nedeniyle kullanılabilir (Şekil 5). Sher ve ark. (60) LHH ve Rosai-Dorfman hastalığında PET/MR'ın PET/BT'ye benzer tanılabilir performans, görüntü kalitesi ve sayısal değerlendirme sağladığını göstermiştir. PET/MR'ın radyasyon dozunu azaltması da göz önünde bulundurulduğunda histiyositik hastalıkları olan pediatrik hastalarda PET/MR'ın PET/BT'ye iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır (60). Wang ve Xu (61) 52 LHH hastasında yaptıkları çalışmada PET/MR'ın 21 hastada multisistem tutulumunu göstererek hastalık yaygınlığını başarılı bir şekilde belirlediğini göstermiştir. Baratto ve ark. (62) LHH'de evreleme ve tedavi yanıtı değerlendirmede tüm vücut DAG ile F-18 FDG PET'i

karşılaştırdıkları çalışmalarında, iki modalitenin benzer doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir. DAG ve F-18 FDG PET'in birlikte kullanımının avantaj sağlayabileceği sonucuna varılmıştır, ancak bu konuda çalışmalara ihtiyaç vardır (62).

### Nöroblastom

Nöroblastom çocuklarda en sık ekstrakranial yerleşimli solid tümördür. Olguların %90'ı 5 yaş altında tanı almaktadır. Nöroblastomlar çoğunlukla abdomen yerleşimli ve adrenal medulla kaynaklı olmakla birlikte, toraks, pelvis veya boyun yerleşimli olabilir (64). Hastaların %50'si tanı anında lokalize hastalığa sahipken, %35'inde lokal lenf nodu metastazı izlenmektedir. Nöroblastomların diğer en sık metastatik bölgeleri kemik, kemik iliği ve karaciğerdir (63).

Nöroblastomların ilk değerlendirmesinde ultrason, BT ve MR yaygın olarak kullanılmaktadır. 123Iodine (123I)-metaiodobenzylguanidine (MIBG) yüksek özgüllük ve duyarlılığı ile nöroblastomlarda metastatik hastalığın değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. MIBG bir norepinefrin analogu olup, %90 nöroblastomun 123I-MIBG pozitif olduğu gösterilmiştir (64). MIBG negatif hastalarda veya mikst MIBG tutulumu gösterdiği



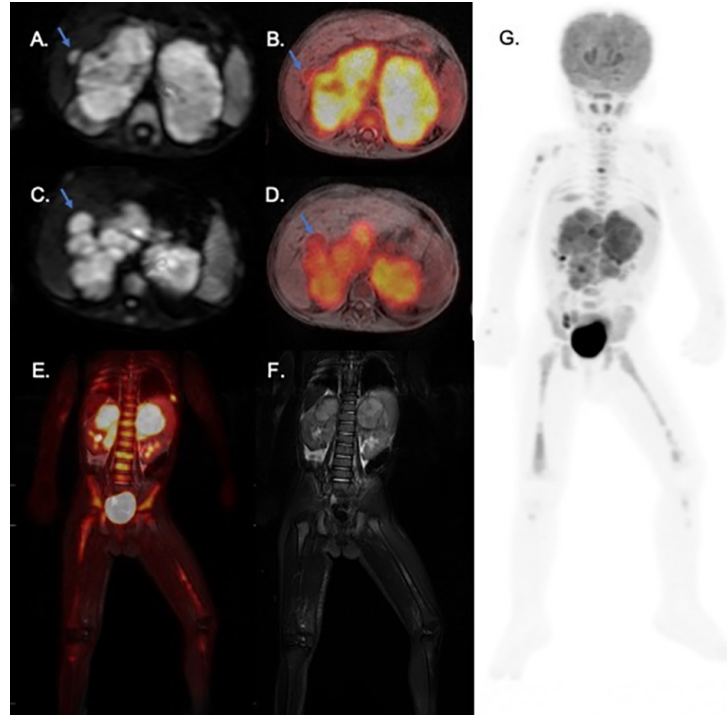
**Şekil 5.** Yedi yaşında Langerhans hücreli histiyozis tanılı kız çocuk hasta, evreleme ve tedavi yanıtı F-18 FDG PET/MR çalışmaları (A ve C. Evreleme aksiyel DAG, B ve D. Evreleme aksiyel T1-ağırlıklı PET/MR füzyon, G. Evreleme MIP PET görüntüleri; E. Tedavi yanıtı aksiyel DAG, F. Tedavi yanıtı aksiyel T1-ağırlıklı PET/MR füzyon, H. Tedavi yanıtı MIP PET görüntüleri). Sağ asetabulum düzeyinde DAG'da (A, mavi ok) sinyal artışı izlenen ekspansiyon yumuşak doku komponentli lezyonda patolojik artmış F-18 FDG tutulumu izlenmiştir. Ayrıca sağ internal iliak düzeyde (C ve D, sarı oklar) patolojik lenf nodu izlenmiştir. Hastanın tedavi sonrası yanıt değerlendirme PET/MR görüntülerinde lezyonun boyutlarının küçüldüğü, DAG'da sinyal artışının azaldığı ve metabolik aktivitesinin belirgin gerilediği dikkati çekmiştir

FDG: Florodeoksiglukoz, PET: Pozitron emisyon tomografi, MR: Manyetik rezonans, DAG: Difüzyon-ağırlıklı görüntüleme, MIP: Maksimum yoğunluk projeksiyonu

düşünülen hastalarda F-18 FDG PET kullanılmaktadır. Ayrıca nöroblastomda F-18 FDG tutulumu ve yaygınlığı kötü prognozla ilişkilidir. Ayrıca yüksek riskli rekürren nöroblastomu olan hastalarda biyopsi yerinin belirlenmesinde F-18 FDG PET kullanılmaktadır (10,65). PET/MR görüntüleme nöroblastom hastalarının değerlendirilmesinde yüksek yumuşak doku rezolüsyonu ile PET/BT'ye göre avantaj sağlamaktadır (Şekil 6). Liang ve ark. (66) yaptığı çalışmada nöroblastom hastalarında PET/MR'ın lokal invazyonu ve uzak metastazları belirlemeyi kolaylaştırdığı, evreleme ve yeniden evrelemede tanısallığı doğruluğu iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada yalnızca PET görüntülere göre hibrit PET/MR'ın 2/3 hastada evreyi artırdığı gösterilmiştir (66). Pediatrik onkoloji hastalarında PET/BT'nin ise yalnız PET görüntülerine göre %20 hastada evreyi artırdığı gösterilmiştir (67). Nöroblastomların en önemli metastaz bölgelerinden biri olan kemik iliğinin değerlendirilmesinde PET/MR'ın başarılı olduğu bilinmektedir (42). Bu hastalarda F-18 FDG

PET'te kemik iliğinde izlenen yüksek fizyolojik aktivite nedeniyle MR görüntüleri metastazların belirlenmesinde doğrulayıcı bilgi sağlamaktadır (46). Soliman ve ark. (68) nöroblastom hastalarında tüm vücut MR'ın F-18 FDG PET/BT'ye göre %24 daha fazla kemik iliği metastazı gösterdiğini bulmuştur. Bu nedenle nöroblastom hastalarında hibrit PET/MR ile kemik iliği daha iyi değerlendirilebilir.

Refrakter nöroblastomlarda 68-Galyum (Ga-68) ile işaretli DOTA bileşikleri (DOTATATE, DOTANOC, DOTATOC) ile PET görüntüleme yapılabilmektedir. Nöroblastomlarda somatostatın reseptör 2 ekspresyonu olması bu ajanlarla PET görüntülemesine olanak vermektedir. Ayrıca teranostik yaklaşımla Ga-68 DOTATATE tutulumu gösteren bu refrakter nöroblastom olgularında 177-Lutesyum DOTATATE tedavisi uygulanabilmektedir (69). Ayrıca nöroblastomun evreleme ve izleminde Ga-68 DOTATATE kullanılabilir. Ga-68 DOTATATE'nin 123I-MIBG'ye ve konvansiyonel görüntüleme yöntemlerine göre hastalığı belirlemede duyarlılığının daha yüksek olduğunu gösteren



**Şekil 6.** Üç yaşında kız çocuk hasta, karaciğer ve kemik-kemik iliği metastatik nöroblastom, evreleme F-18 FDG PET/MR çalışması (A ve C. Aksiyel DAG, B ve D. Aksiyel T1-ağırlıklı PET/MR füzyon, E. Koronal STIR-PET füzyon, F. Koronal STIR, G. MIP PET görüntüleri). Abdomende her iki sürrenal bez lojunu dolduran, karaciğer düzeyinde karaciğerden sınırları net ayırt edilemeyen, geniş boyutlu, lobule konturlu kitlede DAG'da (A ve C) sinyal artışı ve PET görüntülerinde (B ve D) artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir. Ayrıca karaciğerde metastaz ile uyumlu lezyonlarda (mavi oklar) DAG'da (A ve C) sinyal artışı ve PET görüntülerde artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir. STIR görüntülerde (F) kemik iliği alanlarında hiperintens görünüm ve PET görüntülerde artmış F-18 FDG tutulumu izlenmektedir

FDG: Florodeoksiglukoz, PET: Pozitron emisyon tomografi, MR: Manyetik rezonans, DAG: Difüzyon-ağırlıklı görüntüleme, STIR: Short tau inversion recovery

çalışmalar mevcuttur (69,70). Ancak henüz nöroblastom hastalarında Ga-68 DOTATATE PET/MR görüntüleme üzerine çalışma bulunmamaktadır.

### Nörofibromatozis Tip 1

Nörofibromatozis tip 1 (NF1) otozomal dominant geçişli genetik nörokutanöz bir hastalıktır. NF1 tanılı çocuklarda yaygın pleksiform nörofibromlar izlenmektedir. Pleksiform nörofibromların malign periferik sinir kılıfı tümörlerine dönüşme riski bulunmaktadır. Malign periferik sinir kılıfı tümörleri radyoterapi ve kemoterapiye dirençli olup, tek küratif tedavi seçeneği radikal rezeksiyondur. Radikal rezeksiyonun yalnızca erken evrede mümkün olması nedeniyle malign periferik sinir kılıfı tümörlerinin erken tanısı önemlidir (71,72). F-18 FDG PET/BT malignleşen veya malignleşme riski olan bu lezyonların belirlenmesinde yardımcı olabilmektedir (73). Ancak bu hastaların rutin takibinde tüm vücut MR görüntülemenin kullanımı önerilmektedir (74). Semptomlarda ve fizik muayene bulgularında değişiklik, lezyonun boyutunda ve MR'da lezyon karakterinde değişiklik olan hastalarda PET kullanılabilir (73). Hibrit PET/MR bu hastaların değerlendirmesinde tek seansta tanısız MR görüntülemeye ve PET'ten elde edilen metabolik bilgiye olanak vermesi açısından yararlıdır. Reinert ve ark. (72) 28 NF1 hastasında yaptığı F-18 FDG PET/MR çalışmasında, benign pleksiform nörofibromları malign periferik sinir kılıfı tümörlerinden ayırmada maksimum standart uptake değeri eşik değerini 2,78 olarak bulmuştur (72). Hibrit PET/MR görüntüleme ile MR'dan elde edilen morfolojik bilgi ile PET'ten elde edilen metabolik bilginin birlikte elde edilmesi lezyonların büyüme hızı ve metabolik aktivitenin korele edilmesi ile malign transformasyonun belirlenmesine yardımcı olmaktadır (72). Raad ve ark. (75) 10 NF1 hastasında PET/BT ve PET/MR'ı karşılaştırdıkları çalışmalarında, PET/MR'ın %50 oranında radyasyon dozunu azalttığı ve %100 doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir (75). Bu nedenle hibrit PET/MR bu kompleks olguların yönetimine ve cerrahi planlamasına katkı sağlayabilir.

### Sonuç

Hibrit PET/MR görüntüleme, radyasyon dozunu azaltması, tek anestezi seansında tanısız MR ve metabolik PET görüntülemeye olanak tanınması ve yüksek yumuşak doku rezolüsyonu ve en az PET/BT'ye denk tanısız performansı ile pediatrik onkoloji hastalarında ulaşılabilir olduğu durumlarda tercih edilmesi gereken PET görüntüleme modalitesidir. PET/MR ile elde edilen

multiparametrik görüntüleme yaklaşımı canlı olmayan yumuşak doku-tümör dokusu ayrımı, tümörün lokal yayılımı, kemik iliğinin değerlendirilmesi gibi tanısız zorluk olan durumlarda avantaj sağlamaktadır.

### Kaynaklar

1. Giraudo C, Carraro S, Zucchetta P, Cecchin D. Pediatric imaging using PET/MR imaging. *Magn Reson Imaging Clin N Am.* 2023;31:625-636.
2. Kwatra NS, Lim R, Gee MS, States LJ, Vossough A, Lee EY. PET/MR imaging: current updates on pediatric applications. *Magn Reson Imaging Clin N Am.* 2019;27:387-407.
3. Chawla SC, Federman N, Zhang D, et al. Estimated cumulative radiation dose from PET/CT in children with malignancies: a 5-year retrospective review. *Pediatr Radiol.* 2010;40:681-686.
4. Martin O, Schaarschmidt BM, Kirchner J, et al. PET/MRI versus PET/CT for whole-body staging: results from a single-center observational study on 1,003 sequential examinations. *J Nucl Med.* 2020;61:1131-1136.
5. Zucchetta P, Branchini M, Zorz A, et al. Quantitative analysis of image metrics for reduced and standard dose pediatric 18F-FDG PET/MRI examinations. *Br J Radiol.* 2019;92:20180438.
6. Aydos U, Balcı E, Ateş SG, Akdemir ÜÖ, Karadeniz C, Atay LÖ. Quantitative and visual analyses of the effect of activity reduction on image metrics and quality in 18F-FDG PET/MRI in pediatric oncology. *Turk J Med Sci.* 2023;53:289-302.
7. Schäfer JF, Gatidis S, Schmidt H, et al. Simultaneous whole-body PET/MR imaging in comparison to PET/CT in pediatric oncology: initial results. *Radiology.* 2014;273:220-231.
8. Uslu-Beşli L, Atay Kapucu L, Karadeniz C, et al. Comparison of FDG PET/MRI and FDG PET/CT in pediatric oncology in terms of anatomic correlation of FDG-positive lesions. *J Pediatr Hematol Oncol.* 2019;41:542-550.
9. Baratto L, Hawk KE, States L, et al. PET/MRI improves management of children with cancer. *J Nucl Med.* 2021;62:1334-1340.
10. States LJ, Reid JR. Whole-Body PET/MRI Applications in pediatric oncology. *AJR Am J Roentgenol.* 2020;215:713-725.
11. Catana C. Motion correction options in PET/MRI. *Semin Nucl Med.* 2015;45:212-223.
12. Cecchin D, Barthel H, Poggiali D, et al. A new integrated dual time-point amyloid PET/MRI data analysis method. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2017;44:2060-2072.
13. Rauscher I, Eiber M, Fürst S, et al. PET/MR imaging in the detection and characterization of pulmonary lesions: technical and diagnostic evaluation in comparison to PET/CT. *J Nucl Med.* 2014;55:724-729.
14. Wang X, Cui Y, Wang Y, et al. Assessment of lung nodule detection and lung CT screening reporting and data system classification using zero echo time pulmonary MRI. *J Magn Reson Imaging.* 2024 Apr 11.
15. Gatidis S, Schmidt H, Gücke B, et al. Comprehensive Oncologic imaging in infants and preschool children with substantially

- reduced radiation exposure using combined simultaneous <sup>18</sup>F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/magnetic resonance imaging: a direct comparison to <sup>18</sup>F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography. *Invest Radiol.* 2016;51:7-14.
16. Hirsch FW, Sattler B, Sorge I, et al. PET/MR in children. Initial clinical experience in paediatric oncology using an integrated PET/MR scanner. *Pediatr Radiol.* 2013;43:860-875.
  17. Ponisio MR, McConathy J, Laforest R, Khanna G. Evaluation of diagnostic performance of whole-body simultaneous PET/MRI in pediatric lymphoma. *Pediatr Radiol.* 2016;46:1258-1268.
  18. Sher AC, Seghers V, Paldino MJ, et al. Assessment of sequential PET/MRI in comparison with PET/CT of pediatric lymphoma: a prospective study. *AJR Am J Roentgenol.* 2016;206:623-631.
  19. Spijkers S, Littooi AS, Nivelstein RAJ. Measurements of cervical lymph nodes in children on computed tomography. *Pediatr Radiol.* 2020;50:534-542.
  20. Muehe AM, Siedek F, Theruvath AJ, et al. Differentiation of benign and malignant lymph nodes in pediatric patients on ferumoxytol-enhanced PET/MRI. *Theranostics.* 2020;10:3612-3621.
  21. Gawande RS, Khurana A, Messing S, et al. Differentiation of normal thymus from anterior mediastinal lymphoma and lymphoma recurrence at pediatric PET/CT. *Radiology.* 2012;262:613-622.
  22. Person A, Janitz E, Thapa M. Pediatric bone marrow: normal and abnormal MRI appearance. *Semin Roentgenol.* 2021;56:325-337.
  23. Daldrup-Link HE, Franzius C, Link TM, et al. Whole-body MR imaging for detection of bone metastases in children and young adults: comparison with skeletal scintigraphy and FDG PET. *AJR Am J Roentgenol.* 2001;177:229-236.
  24. Jadvar H, Connolly LP, Fahey FH, Shulkin BL. PET and PET/CT in pediatric oncology. *Semin Nucl Med.* 2007;37:316-331.
  25. Panigrahy A, Blüml S. Neuroimaging of pediatric brain tumors: from basic to advanced magnetic resonance imaging (MRI). *J Child Neurol.* 2009;24:1343-1365.
  26. Pedersen C, Aboian M, McConathy JE, Daldrup-Link H, Franceschi AM. PET/MRI in pediatric neuroimaging: primer for clinical practice. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2022;43:938-943.
  27. Harat M, Rakowska J, Harat M, et al. Combining amino acid PET and MRI imaging increases accuracy to define malignant areas in adult glioma. *Nat Commun.* 2023;14:4572.
  28. Hojjati M, Badve C, Garg V, et al. Role of FDG-PET/MRI, FDG-PET/CT, and dynamic susceptibility contrast perfusion mri in differentiating radiation necrosis from tumor recurrence in glioblastomas. *J Neuroimaging.* 2018;28:118-125.
  29. Pyatigorskaya N, Sgard B, Bertaux M, Yahia-Cherif L, Kas A. Can FDG-PET/MR help to overcome limitations of sequential MRI and PET-FDG for differential diagnosis between recurrence/progression and radionecrosis of high-grade gliomas? *J Neuroradiol.* 2021;48:189-194.
  30. Pyka T, Hiob D, Preibisch C, et al. Diagnosis of glioma recurrence using multiparametric dynamic <sup>18</sup>F-fluoroethyl-tyrosine PET-MRI. *Eur J Radiol.* 2018;103:32-37.
  31. Marner L, Lundemann M, Sehested A, et al. Diagnostic accuracy and clinical impact of [<sup>18</sup>F]FET PET in childhood CNS tumors. *Neuro Oncol.* 2021;23:2107-2116.
  32. Marner L, Nysom K, Sehested A, et al. Early Postoperative <sup>18</sup>F-FET PET/MRI for pediatric brain and spinal cord tumors. *J Nucl Med.* 2019;60:1053-1058.
  33. Preuss M, Werner P, Barthel H, et al. Integrated PET/MRI for planning navigated biopsies in pediatric brain tumors. *Childs Nerv Syst.* 2014;30:1399-1403.
  34. Shankar A, Bomanji J, Hyare H. Hybrid PET-MRI imaging in paediatric and TYA brain tumours: clinical applications and challenges. *J Pers Med.* 2020;10:218.
  35. Tsouana E, Stoneham S, Fersht N, et al. Evaluation of treatment response using integrated <sup>18</sup>F-labeled choline positron emission tomography/magnetic resonance imaging in adolescents with intracranial non-germinomatous germ cell tumours. *Pediatr Blood Cancer.* 2015;62:1661-1663.
  36. Chun GYC, Sample J, Hubbard AK, Spector LG, Williams LA. Trends in pediatric lymphoma incidence by global region, age and sex from 1988-2012. *Cancer Epidemiol.* 2021;73:101965.
  37. Pfister SM, Reyes-Múgica M, zar AJ, et al. Summary of the inaugural WHO classification of pediatric tumors: transitioning from the optical into the molecular era. *Cancer Discov.* 2022;12:331-355.
  38. Kirchner J, Deuschl C, Schweiger B, et al. Imaging children suffering from lymphoma: an evaluation of different <sup>18</sup>F-FDG PET/MRI protocols compared to whole-body DW-MRI. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2017;44:1742-1750.
  39. Jannusch K, Morawitz J, Schweiger B, et al. [<sup>18</sup>F]FDG PET/MRI in children suffering from lymphoma: does MRI contrast media make a difference? *Eur Radiol.* 2023;33:8366-8375.
  40. Giraudo C, Raderer M, Karanikas G, et al. <sup>18</sup>F-Fluorodeoxyglucose positron emission tomography/magnetic resonance in lymphoma: comparison with <sup>18</sup>F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography and with the addition of magnetic resonance diffusion-weighted imaging. *Invest Radiol.* 2016;51:163-169.
  41. Verhagen MV, Menezes LJ, Neriman D, et al. <sup>18</sup>F-FDG PET/MRI for Staging and interim response assessment in pediatric and adolescent hodgkin lymphoma: a prospective study with <sup>18</sup>F-FDG PET/CT as the reference standard. *J Nucl Med.* 2021;62:1524-1530.
  42. Rashidi A, Baratto L, Theruvath AJ, et al. Diagnostic accuracy of 2-[<sup>18</sup>F]FDG-PET and whole-body DW-MRI for the detection of bone marrow metastases in children and young adults. *Eur Radiol.* 2022;32:4967-4979.
  43. Dahlsgaard-Wallenius SE, Hildebrandt MG, et al. Hybrid PET/MRI in non-small cell lung cancer (NSCLC) and lung nodules-a literature review. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2021;48:584-91.

44. Morakote W, Baratto L, Ramasamy SK, et al. Comparison of diffusion-weighted MRI and [18F]FDG PET/MRI for treatment monitoring in pediatric Hodgkin and non-Hodgkin lymphoma. *Eur Radiol.* 2024;34:643-653.
45. Arndt CA, Rose PS, Folpe AL, Laack NN, editors. Common musculoskeletal tumors of childhood and adolescence. *Mayo Clinic Proceedings*; 2012: Elsevier.
46. Guja KE, Behr G, Bedmutha A, Kuhn M, Nadel HR, Pandit-Taskar N. Molecular imaging with PET-CT and PET-MRI in pediatric musculoskeletal diseases. *Semin Nucl Med.* 2024;54:438-455.
47. Ricard F, Cimarelli S, Deshayes E, Mognetti T, Thiesse P, Giammarile F. Additional benefit of F-18 FDG PET/CT in the staging and follow-up of pediatric rhabdomyosarcoma. *Clin Nucl Med.* 2011;36:672-627.
48. van Ewijk R, Schoot RA, Sparber-Sauer M, et al. European guideline for imaging in paediatric and adolescent rhabdomyosarcoma - joint statement by the European Paediatric Soft Tissue Sarcoma Study Group, the Cooperative Weichteilsarkom Studiengruppe and the Oncology Task Force of the European Society of Paediatric Radiology. *Pediatr Radiol.* 2021;51:1940-1951.
49. Pourmehdi Lahiji A, Jackson T, Nejadnik H, et al. Association of tumor [18F]FDG activity and diffusion restriction with clinical outcomes of rhabdomyosarcomas. *Mol Imaging Biol.* 2019;21:591-598.
50. Zhang X, Chen YL, Lim R, Huang C, Chebib IA, El Fakhri G. Synergistic role of simultaneous PET/MRI-MRS in soft tissue sarcoma metabolism imaging. *Magn Reson Imaging.* 2016;34:276-279.
51. Padwal J, Baratto L, Chakraborty A, et al. PET/MR of pediatric bone tumors: what the radiologist needs to know. *Skeletal Radiol.* 2023;52:315-328.
52. Eiber M, Takei T, Souvatzoglou M, et al. Performance of whole-body integrated 18F-FDG PET/MR in comparison to PET/CT for evaluation of malignant bone lesions. *J Nucl Med.* 2014;55:191-197.
53. Chodyla M, Barbato F, Dirksen U, et al. Utility of Integrated PET/MRI for the primary diagnostic work-up of patients with ewing sarcoma: preliminary results. *Diagnostics (Basel).* 2022;12:2278.
54. Giraud C, Fichera G, Stramare R, et al. Radiomic features as biomarkers of soft tissue paediatric sarcomas: preliminary results of a PET/MR study. *Radiol Oncol.* 2022;56:138-141.
55. Orsatti G, Zucchetta P, Varotto A, et al. Volumetric histograms-based analysis of apparent diffusion coefficients and standard uptake values for the assessment of pediatric sarcoma at staging: preliminary results of a PET/MRI study. *Radiol Med.* 2021;126:878-885.
56. Maennlin S, Chaika M, Gassenmaier S, et al. Evaluation of functional and metabolic tumor volume using voxel-wise analysis in childhood rhabdomyosarcoma. *Pediatr Radiol.* 2023;53:438-449.
57. Gadner H, Grois N, Pötschger U, et al. Improved outcome in multisystem Langerhans cell histiocytosis is associated with therapy intensification. *Blood.* 2008;111:2556-2562.
58. Binkovitz LA, Olshefski RS, Adler BH. Coincidence FDG-PET in the evaluation of Langerhans' cell histiocytosis: preliminary findings. *Pediatr Radiol.* 2003;33:598-602.
59. Ferrell J, Sharp S, Kumar A, Jordan M, Picarsic J, Nelson A. Discrepancies between F-18-FDG PET/CT findings and conventional imaging in Langerhans cell histiocytosis. *Pediatr Blood Cancer.* 2021;68:e28891.
60. Sher AC, Orth R, McClain K, Allen C, Hayatghaibi S, Seghers V. PET/MR in the assessment of pediatric histiocytoses: a comparison to PET/CT. *Clin Nucl Med.* 2017;42:582-588.
61. Wang F, Xu Y. The diagnostic value of 18F-FDG PET/MR in Langerhans histiocytosis in children. *J Nuc Med.* 2022;63:3129.
62. Baratto L, Nyalakonda R, Theruvath AJ, et al. Comparison of whole-body DW-MRI with 2-[18F]FDG PET for staging and treatment monitoring of children with Langerhans cell histiocytosis. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2023;50:1689-1698.
63. Colon NC, Chung DH. Neuroblastoma. *Adv Pediatr.* 2011;58:297-311.
64. Vik TA, Pfluger T, Kadota R, et al. (123)I-mIBG scintigraphy in patients with known or suspected neuroblastoma: Results from a prospective multicenter trial. *Pediatr Blood Cancer.* 2009;52:784-790.
65. Papanthanasou ND, Gaze MN, Sullivan K, et al. 18F-FDG PET/CT and 123I-metaiodobenzylguanidine imaging in high-risk neuroblastoma: diagnostic comparison and survival analysis. *J Nucl Med.* 2011;52:519-525.
66. Liu J, Li C, Yang X, et al. The diagnostic value of 18F-FDG PET/CT bone marrow uptake pattern in detecting bone marrow involvement in pediatric neuroblastoma patients. *Contrast Media Mol Imaging.* 2022 Jan 6;2022:7556315.
67. Bar-Sever Z, Keidar Z, Ben-Barak A, et al. The incremental value of 18F-FDG PET/CT in paediatric malignancies. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2007;34:630-637.
68. Soliman H, El-Noueam K, Ettaby A, Fadel S, Abougabal AM. Whole-body three-dimensional short tau inversion recovery and T1-weighted in/opposed phase MRI in the detection of neuroblastoma bone marrow metastasis: comparative study with PET/CT utilising bone marrow biopsy as the reference standard. *Clin Radiol.* 2023;78:e535-e541.
69. Kong G, Hofman MS, Murray WK, et al. Initial experience with gallium-68 DOTA-octreotate PET/CT and peptide receptor radionuclide therapy for pediatric patients with refractory metastatic neuroblastoma. *J Pediatr Hematol Oncol.* 2016;38:87-96.
70. Kroiss A, Putzer D, Uprimny C, et al. Functional imaging in pheochromocytoma and neuroblastoma with 68Ga-DOTA-Tyr 3-octreotide positron emission tomography and 123I-metaiodobenzylguanidine. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2011;38:865-873.
71. Combemale P, Valeyrie-Allanore L, Giammarile F, et al. Utility of 18F-FDG PET with a semi-quantitative index in the detection of sarcomatous transformation in patients with neurofibromatosis type 1. *PLoS One.* 2014;9:e85954.

72. Reinert CP, Schuhmann MU, Bender B, et al. Comprehensive anatomical and functional imaging in patients with type I neurofibromatosis using simultaneous FDG-PET/MRI. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2019;46:776-787.
73. Voss SD. Functional and anatomical imaging in pediatric oncology: which is best for which tumors. *Pediatr Radiol*. 2019;49:1534-1544.
74. Evans DGR, Salvador H, Chang VY, et al. Cancer and central nervous system tumor surveillance in pediatric neurofibromatosis 1. *Clin Cancer Res*. 2017;23:e46-e53.
75. Raad RA, Lala S, Allen JC, et al. Comparison of hybrid 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/magnetic resonance imaging and positron emission tomography/computed tomography for evaluation of peripheral nerve sheath tumors in patients with neurofibromatosis type 1. *World J Nucl Med*. 2018;17:241-248.