



Klinik Öncesi Moleküler Görüntüleme Sistemleri: Teknolojik Gelişmeler ve Translasyonel Tıptaki Güncel Rolü

Preclinical Molecular Imaging Systems: Technological Advances and Their Current Role in Translational Medicine

© Güneş Yavuz

Boğaziçi Üniversitesi, XLAB- Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Öz

Moleküler görüntüleme; hücresel ve moleküler ölçekteki patolojik ve fizyolojik süreçlerin canlı organizmalarda (*in vivo*), yapısal bütünlüğe zarar vermeden (non-invaziv) izlenmesini, tanımlanmasını ve nicel olarak ölçülmesini sağlayan çok disiplinli bir alandır. Laboratuvar ortamında geliştirilen klinik öncesi (preklinik) moleküler görüntüleme teknolojileri; küçük hayvan modelleri üzerinde hastalıkların gelişim mekanizmalarını çözmek, yeni tedavi edici ajanların farmakokinetik süreçlerini değerlendirmek ve ilaç Araştırma ve Geliştirme çalışmalarını hızlandırmak adına translasyonel tıpta stratejik bir köprü görevi üstlenir. Geleneksel yöntemlerin aksine bu teknolojiler, aynı deney hayvanının boyutsal (*longitudinal*) olarak zaman içinde takip edilmesine olanak tanıyarak biyolojik verilerin gücünü artırır ve onkoloji, sinirbilim, kardiyoloji gibi alanlardaki araştırmalara katkı sunar. Bu derleme çalışmasında, klinik öncesi araştırmalarda aktif olarak kullanılan temel sistemler detaylıca ele alınmıştır. Bu bağlamda; mikron düzeyinde anatomik detay sunan mikro-bilgisayarlı tomografi (μ BT) ve mikro-manyetik rezonans görüntüleme (μ MRG), yüksek hassasiyetli metabolik veri üreten mikro-pozitron emisyon tomografisi (μ PET) ve mikro-tek foton emisyonlu BT (μ SPECT) nükleer sistemleri incelenmiştir. Ayrıca, biyoluminesans ve floresan tabanlı optik görüntüleme teknikleri ile mikro-ultrason yöntemleri değerlendirilmiştir. Özellikle biyoluminesans ve floresan optik görüntüleme sistemleri, iyonizan radyasyon içermemesi ve nispeten düşük maliyetli ve yüksek verimli deneysel uygulamalara olanak tanıması nedeniyle klinik öncesi

Abstract

Molecular imaging is a multidisciplinary field that enables the *in vivo*, non-invasive visualization, characterization, and quantitative assessment of pathological and physiological processes at the cellular and molecular levels without compromising structural integrity. Preclinical molecular imaging technologies developed in laboratory settings serve as a strategic bridge in translational medicine by facilitating the investigation of disease mechanisms in small animal models, evaluating the pharmacokinetic behavior of novel therapeutic agents, and accelerating drug discovery and development processes. Unlike conventional approaches, these technologies allow longitudinal monitoring of the same experimental animal over time, thereby enhancing the robustness of biological data and contributing significantly to research in oncology, neuroscience, and cardiology. In this review, the main imaging modalities widely used in preclinical research are discussed in detail. These include micro-computed tomography (μ CT) and micro-magnetic resonance imaging (μ MRI), which provide high-resolution anatomical detail; micro-positron emission tomography (μ PET) and micro-single-photon emission CT (μ SPECT), which offer highly sensitive metabolic and molecular information; as well as optical imaging techniques based on bioluminescence and fluorescence, together with micro-ultrasound systems. Optical imaging approaches, particularly bioluminescence and fluorescence-based methods, are widely utilized in preclinical studies due to their non-ionizing nature, relatively low cost, and high experimental throughput.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Dr. Güneş Yavuz, Boğaziçi Üniversitesi, XLAB- Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

E-posta: gunesyavuz75@gmail.com ORCID ID: orcid.org/0000-0002-6745-1741

Geliş Tarihi/Received: 02.06.2026 Kabul Tarihi/Accepted: 03.07.2026 Yayınlanma Tarihi/Publication Date: 23.07.2026

Cite this article as/Atıf: Yavuz G. Preclinical molecular imaging systems: technological advances and their current role in translational medicine. Nucl Med Semin. 2026;12:112-118



Copyright © 2026 Yazar(lar). 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 © 2026 The Author(s). Published by Galenos Publishing House on behalf of Turkish Society of Nuclear Medicine. This is an open access article under the Creative Commons AttributionNonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde bu sistemlere ek olarak, dedektör teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak ortaya çıkan dijital klinik öncesi PET ve SPECT sistemleri, artırılmış sinyal-gürültü oranı, daha yüksek sayım verimliliği ve gelişmiş kantitatif doğruluk sayesinde konvansiyonel fotomultiplier tüp tabanlı sistemlere kıyasla önemli performans üstünlükleri sunmaktadır. Tekil sistemlerin kısıtlılıklarını aşmak adına geliştirilen μ PET/ μ BT ve μ PET/ μ MR görüntüleme gibi hibrit konfigürasyonların, yapay zeka destekli görüntü yeniden yapılandırma algoritmaları ve hedefe yönelik akıllı kontrast ajanlar sayesinde performans sınırlarını genişlettiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Moleküler görüntüleme, pozitron emisyon tomografisi, manyetik rezonans görüntüleme, klinik öncesi araştırma, çok modellenli görüntüleme

Recent advances in detector technology have led to the emergence of digital preclinical PET and SPECT systems, which provide improved signal-to-noise ratio, higher count sensitivity, and enhanced quantitative accuracy compared with conventional photomultiplier tube-based systems. Furthermore, hybrid imaging configurations such as μ PET/ μ CT and μ PET/ μ MRI, combined with artificial intelligence-assisted image reconstruction algorithms and targeted smart contrast agents, have significantly expanded the performance limits of these modalities. Overall, preclinical imaging systems represent an indispensable component of the translational research pipeline, and ongoing integration of digital technologies is expected to further advance spatial resolution, sensitivity, and quantitative imaging capabilities in the future.

Keywords: Molecular imaging, positron emission tomography, magnetic resonance imaging, preclinical research, multimodal imaging

Giriş

Canlı organizmalardaki biyolojik süreçleri moleküler ve hücre düzeyde haritalandıran moleküler görüntüleme, konvansiyonel anatomik görüntüleme yöntemlerinin sınırlarını aşarak patolojilerin henüz makroskobik yapısal değişiklikler ortaya çıkmadan çok daha erken evrelerde tespit edilmesine olanak tanımıştır (1). Tarihsel süreçte biyolojik mekanizmaların anlaşılmasında *in vitro* (laboratuvar ortamı) ve *ex vivo* (doku temelli) yöntemler önemli katkılar sağlamış olsa da bu yaklaşımlar canlı organizmanın dinamik ve bütüncül fizyolojisini tam olarak yansıtmakta yetersiz kalmıştır. Bu metodolojik sınırlılıklar, canlı sistemlerin doğrudan incelenmesine imkân tanıyan klinik öncesi küçük hayvan görüntüleme sistemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır (2).

Bu alandaki literatür verileri incelendiğinde, ilk klinik öncesi görüntüleme sistemlerinin insan ölçekli klinik cihazların küçük laboratuvar hayvanlarına uyarlanmasıyla ortaya çıktığı; ancak yetersiz uzaysal çözünürlük ve anatomik uyumsuzluk gibi kısıtlamalar nedeniyle zamanla küçük hayvan anatomisine özgü, mikron ölçekli yüksek çözünürlüklü özel sistemlerin geliştirildiği görülmektedir (3). Günümüzde klinik öncesi moleküler görüntüleme teknolojileri; onkoloji, nöroloji ve kardiyovasküler tıp araştırmalarının yanı sıra yenilikçi farmakolojik ajanların geliştirilmesinde de kritik bir rol oynamakta, biyolojik süreçlerin non-invaziv olarak izlenmesine imkan sağlayarak translaşyonel araştırmaların en önemli itici güçlerinden biri olarak kabul edilmektedir (4). Bu

derlemenin amacı, modern klinik öncesi moleküler görüntüleme sistemlerini yapısal, fonksiyonel ve metabolik kapasiteleri açısından karşılaştırmalı olarak incelemek ve bu sistemlerin translaşyonel tıptaki güncel rolünü değerlendirmektir (5).

1. Teknolojiler, Görüntüleme Sistemleri ve Endüstriyel Analiz

1.1. Mikro-Bilgisayarlı Tomografi (μ BT)

μ BT, X-ışını kullanarak mikron düzeyinde uzaysal çözünürlükte üç boyutlu anatomik görüntüler elde edilmesini sağlayan bir görüntüleme yöntemidir (4). Bu sistemler klinik öncesi çalışmalarda özellikle kemik doku analizleri, akciğer görüntülemesi ve kontrast ajanlar aracılığıyla vasküler yapıların incelenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, yumuşak doku kontrastının sınırlı olması ve canlı hayvanlarda iyonizan radyasyon maruziyeti oluşturmaya başlıca kısıtlılıkları arasında bulunmaktadır (5).

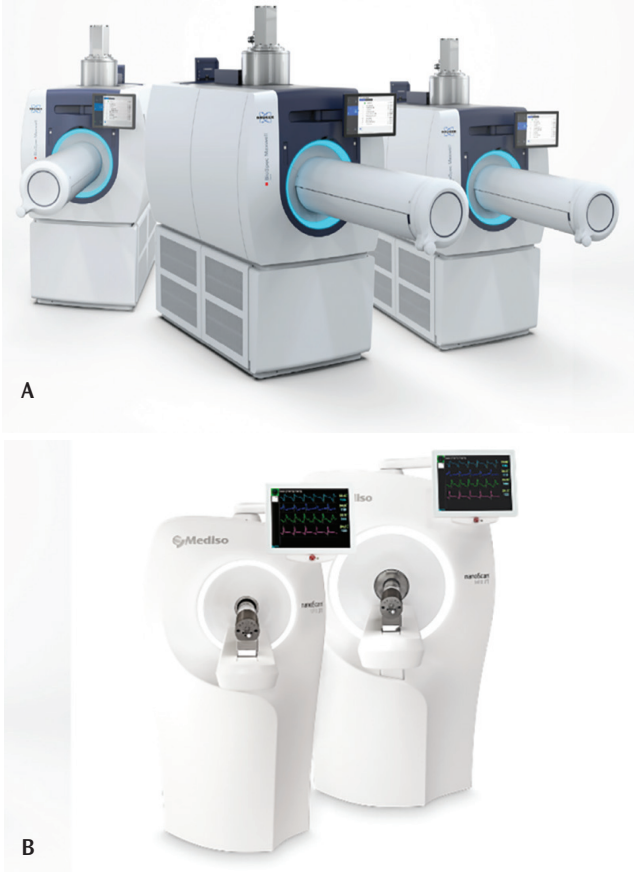
Önemli Husus: μ BT, yüksek kemik ve anatomik çözünürlük gereksinimlerinde başlıca görüntüleme yöntemlerinden biri olmakla birlikte, boylamsal çalışmalarda kümülatif iyonizan radyasyon etkisi dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

1.2. Mikro-Manyetik Rezonans Görüntüleme (μ MRG)

Klinik öncesi MRG sistemleri, küçük hayvan modellerinde yüksek sinyal-gürültü oranı ve üstün uzaysal çözünürlük elde etmek amacıyla genellikle

4,7-15,2 T (Tesla) aralığında ultra-yüksek manyetik alan gücü kullanmaktadır (Şekil 1) (2). İyonizan radyasyon içermemesi ve mükemmel yumuşak doku kontrastı sağlaması, bu sistemleri klinik öncesi araştırmalarda vazgeçilmez görüntüleme araçlarından biri haline getirmiştir. Özellikle beyin tümörlerinin görüntülenmesi, nörodejeneratif süreçlerin izlenmesi ve kardiyak fonksiyonların kantitatif değerlendirilmesinde, diğer birçok görüntüleme sistemine kıyasla üstün anatomik ve fonksiyonel bilgi sağlayarak hastalık mekanizmalarının anlaşılmasına ve yeni tanı ve tedavi stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır (2,6,7). En büyük kısıtlılığı ise yüksek kurulum maliyeti ve uzun tarama süreleridir.

Önemli Husus: μ MRG, yumuşak doku patolojilerinin non-invaziv ve uzun dönemli takibinde yüksek düzeyde anatomik ve fonksiyonel doğruluk sağlayan önemli bir görüntüleme sistemi olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 1. A. Bruker- BioSpec Maxwell: Kriyojeniz yeni jenerasyon μ MRG serisi (6) ve B. Mediso 3T, 7T μ MRG Sistemleri (7)
 μ MRG: Mikro-manyetik rezonans görüntüleme

1.3. Nükleer Tıp Görüntüleme Sistemleri

Mikro-pozitron emisyon tomografisi (μ PET) ve mikro-tek foton emisyonlu BT (μ SPECT), pikomolar düzeyde duyarlılıkları sayesinde metabolik süreçlerin doğrudan görüntülenmesine olanak tanıyan moleküler görüntüleme teknikleridir (8). Bu yöntemlerde kullanılan radyofarmasötikler aracılığıyla tümör metabolizması, reseptör-ligand etkileşimleri ve gen ekspresyonu izlenebilmektedir (9). μ SPECT'in bazı uygulamalarda μ PET'e kıyasla daha iyi uzamsal çözünürlük sunabilmesine karşın, μ PET genellikle daha yüksek duyarlılık ve daha güçlü kantitatif analiz kapasitesi ile öne çıkmaktadır (10).

Önemli Husus: Nükleer görüntüleme sistemleri, hücrel metabolizma ve farmakokinetik süreçlerin kantitatif analizinde yüksek duyarlılık ve güvenilirlik sağlayarak translasyonel araştırmalarda önemli bir rol üstlenmektedir.

1.4. Optik Görüntüleme Sistemleri: Biyoluminesans ve Floresan Görüntüleme

Optik görüntüleme, lüsiferaz geni ile işaretlenmiş hücrelerden (biyoluminesans) veya floresan problemlerden yayılan ışığın yüksek duyarlılığa sahip dedektörler aracılığıyla tespit edilmesi esasına dayanmaktadır (1). Bu yöntem, iyonizan radyasyon içermemesi, yüksek duyarlılığı ve nispeten düşük maliyetli ve yüksek verimli uygulama imkanı sunması nedeniyle klinik öncesi araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ışığın biyolojik dokularda saçılma ve absorpsiyona uğraması nedeniyle özellikle derin doku görüntülemesinde penetrasyon derinliği ve uzaysal çözünürlük belirgin şekilde sınırlanmaktadır (2,11).

Önemli Husus: Optik görüntüleme, erken evre ilaç taramaları ve tümör progresyon takibinde yüksek hızlı ve düşük maliyetli en ideal tarama yöntemidir.

1.5. Hibrit (Çoklu-Modalite) Sistemler

Tek bir görüntüleme modalitesinin hem yüksek uzamsal çözünürlük hem de yüksek moleküler duyarlılığı aynı anda sağlayamaması, hibrit görüntüleme sistemlerinin (örneğin, μ PET/ μ BT ve μ PET/ μ MRG) geliştirilmesini gerekli kılmıştır (10). Bu sistemler, metabolik veriyi anatomik lokalizasyon ile entegre ederek teşhis ve izlem süreçlerinde daha kapsamlı bilgi sunmaktadır (5).

Klinik öncesi araştırmalarda tek bir görüntüleme yöntemi çoğu zaman biyolojik sürecin tüm boyutlarını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda PET, düşük konsantrasyonlardaki hedef moleküllerin ve

radioişaretili izleyicilerin yüksek duyarlılıkla izlenmesine olanak sağlarken; MRG, yumuşak doku kontrastı ile birlikte morfolojik, fonksiyonel ve difüzyon/perfüzyon temelli ek parametreler sağlar. BT ise yüksek anatomik çözünürlük ile kesin lokalizasyon bilgisi sağlamaktadır. Hibrit görüntüleme yaklaşımları, bu tamamlayıcı veri setlerini aynı zaman noktasında birleştirerek fizyolojik değişkenlik, pozisyon farklılıkları ve zamansal uyumsuzluklardan kaynaklanan belirsizlikleri azaltmaktadır.

Hibrit sistemler; tümör biyolojisi, beyin reseptör haritalaması, kardiyak fonksiyon değerlendirmesi, farmakokinetik analiz, izleyici doğrulaması ve tedavi yanıtının erken değerlendirilmesi gibi birçok alanda güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Aynı deney hayvanı üzerinde elde edilen eş zamanlı moleküler ve anatomik veriler, veri bütünlüğünü artırarak daha güvenilir korelasyonların kurulmasına ve deney başına daha yüksek bilgi çıktısına olanak tanımaktadır. Bu özellikleri sayesinde hibrit görüntüleme sistemleri, onkoloji, nörobilim, kardiyoloji, teranostik ve immünoloji alanlarında translasyonel araştırma değerini önemli ölçüde artırmaktadır.

Translasyonel açıdan bakıldığında, aynı hayvan üzerinde ardışık PET/BT, SPECT/BT veya PET/SPECT/BT görüntülemelerinin gerçekleştirilebilmesi; biyodağılım, farmakokinetik, hedef bağlanımı ve tedavi yanıtı gibi parametrelerin daha güçlü istatistiksel temellerle değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu durum, elde edilen verilerin yalnızca prelinik modellemeyi değil, aynı zamanda klinik araştırmaya geçiş kararlarını da daha güvenilir biçimde desteklemesine katkıda bulunmaktadır (5,7,8,10,12).

Önemli Husus: Klinik öncesi araştırmaların geleceğinin, veri kaybını minimize eden ve eş zamanlı veri analizi imkanı sunan hibrit görüntüleme sistemlerinin entegrasyonu ile daha da güçleneceği öngörülmektedir.

1.6. Klinik Öncesi Görüntüleme Sistemlerinde Hayvan Uyumluluğu ve Görüş Alanı (FOV) Sınırlamaları

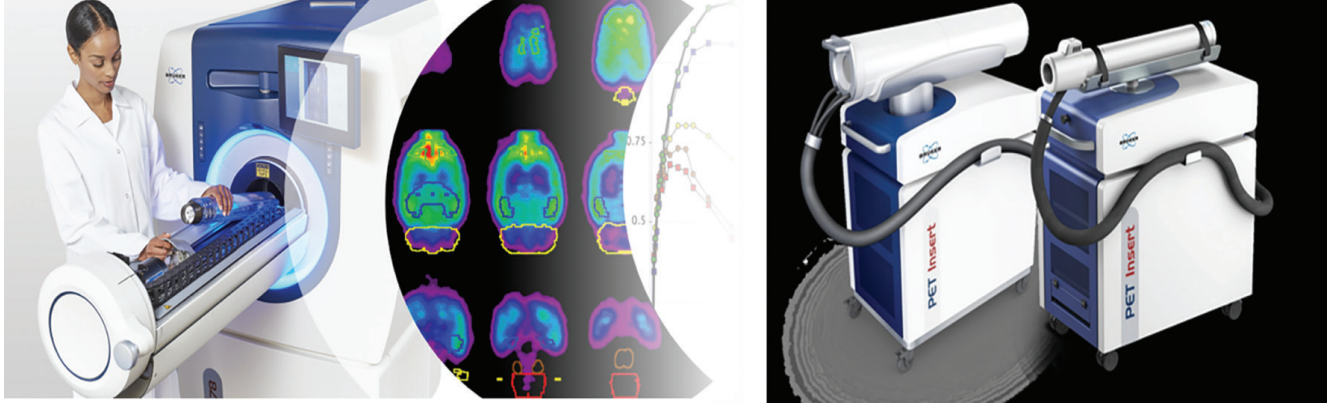
Klinik öncesi moleküler görüntüleme sistemleri, mikron düzeyinde uzaysal çözünürlüğü koruyabilmek amacıyla genellikle dar tünel çapı ve sınırlı bir FOV (*field of view*) ile tasarlanmaktadır (8). Bu nedenle, kullanılabilecek hayvan modeli, sistemin fiziksel geometrisi, dedektör tasarımı ve tarama hacmi gibi teknik parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (13).

- **Mikro-Ultrason (μ US):** μ US sistemleri, yüksek frekanslı transdüserler (30-70 MHz) kullanarak yüksek uzaysal çözünürlük sağlamaktadır. Ancak bu frekans aralığı, akustik dalgaların doku içerisindeki penetrasyon derinliğini yaklaşık 1,5-2 cm ile sınırlandırmaktadır (13,14). Bu fiziksel kısıt nedeniyle μ US, özellikle fare, sıçan ve zebra balığı gibi küçük hayvan modellerinde yüzeysel ve orta derinlikteki yapısal ve fonksiyonel görüntüleme uygulamalarında tercih edilmektedir. Daha derin anatomik yapılarda sinyal penetrasyonunun azalması nedeniyle, yetişkin kemirgenler veya tavşan gibi daha büyük modellerde derin doku görüntülemesi sınırlı kalmaktadır.

- **μ BT:** μ BT sistemlerinde masaüstü cihazların yatak ve tünel çapı genellikle 5-8 cm aralığında değişmektedir (4,15). Bu geometrik sınırlamalar, aynı anda birden fazla küçük kemirgenin veya tek bir yetişkin sıçanın görüntülenmesine olanak tanırken, tavşan veya primat gibi daha büyük hayvan modelleri için uygunluğu önemli ölçüde kısıtlamaktadır.

- **μ MRG:** μ MRG sistemlerinde manyetik alan gücünün artışı, sistem tasarımına bağlı olarak mıknatıs tünel çapının daralması ile ilişkilidir (2). Dar tünelli (7-12 cm) sistemler genellikle fare ve sıçan gibi küçük kemirgen modellerin görüntülenmesine uygunken, daha geniş tünel açıklığına sahip (20-30 cm) prelinik MRG sistemleri gelişmiş gradyent bobinleri ile birlikte tavşan, kedi ve küçük primat gibi daha büyük hayvan modellerinin görüntülenmesine olanak sağlamaktadır (6,12).

- **Nükleer Hibrit Sistemler (μ PET/BT, μ PET/MR):** Nükleer hibrit sistemler, sistem tasarımına bağlı olarak farklı hayvan modellerine uyum göstermektedir. Kompakt ve masaüstü tasarıma sahip sistemler (maksimum ~10 cm tünel çapı), genellikle fare ve orta boy sıçan gibi küçük kemirgen modellerin görüntülenmesine olanak tanırken; modüler ve genişletilebilir hibrit sistemler, yaklaşık 25-30 cm'ye kadar ulaşabilen tarama uzunlukları sayesinde yetişkin tavşanlar ile küçük boy primat modellerinin tüm vücut düzeyinde metabolik görüntülenmesine imkan sağlamaktadır (Şekil 2) (8). Benzer şekilde, bağımsız nükleer modüllerin yüksek alanlı mıknatıslarla fiziksel kombinasyonu, küçük hayvanlarda eş zamanlı multimodal veri üretimini mümkün kılmaktadır (Şekil 3) (16).



Şekil 2. A. Bruker- Tüm vücut/düşük Doz µPET/BT ve B. Bruker- µPET insert platformu
µPET: Mikro-pozitron emisyon tomografi, BT: Bilgisayarlı tomografi



Şekil 3. MR Solutions- Klinik öncesi, cryogen-free 7T MRG ve entegre µPET insert sistemi (16)
MRG: Manyetik rezonans görüntüleme, µPET: Mikro-pozitron emisyon tomografi

Önemli Husus: Klinik öncesi moleküler görüntüleme sistemlerinde hayvan uyumluluğu, büyük ölçüde cihazın donanımsal tasarımına bağlıdır. Optik ve µUS sistemleri genellikle küçük kemirgen modelleri ile sınırlı görüntüleme kapasitesi sunarken, modüler nükleer hibrit sistemler ve geniş tünel açıklığına sahip MRG platformları tavşan ve küçük primat modellerine kadar uzanan daha geniş bir hayvan spektrumunun görüntülenmesine olanak tanımaktadır.

1.7. Endüstriyel Üreticiler ve Teknolojik Çözümler

Klinik öncesi moleküler görüntüleme pazarı, yüksek araştırma-geliştirme maliyetleri ve mikron düzeyinde mühendislik gereksinimleri nedeniyle küresel ölçekte faaliyet gösteren sınırlı sayıda uzman üretici tarafından şekillendirilmektedir (5,8,13). Bu alanda öne çıkan başlıca

firmalar arasında *Bruker*, *Molecubes*, *Mediso*, *MILabs*, *MR Solutions* ve *Revvity* (eski *PerkinElmer*) yer almaktadır.

Siemens Healthineers ve GE HealthCare ise ağırlıklı olarak klinik görüntüleme sistemlerinde lider konumda olmakla birlikte, klinik öncesi alanda da yüksek çözünürlüklü çözümler geliştirmiştir (13). Bu kapsamda Siemens tarafından geliştirilen Inveon platformu ile GE HealthCare'in eXplore serisi, µPET/µBT ve yüksek çözünürlüklü klinik öncesi PET sistemlerine örnek olarak gösterilebilir.

- **Bruker Corporation:** Klinik öncesi görüntüleme alanında önde gelen üreticilerden biridir. Şirket, özellikle BioSpec serisi yüksek alan güçlü klinik öncesi MRG sistemleri ile tanınmaktadır (6). Sıvı helyum ihtiyacını ortadan kaldıran *cryogen-free* süper iletken mıknatıs teknolojileri ile sistemlerin operasyonel maliyetlerini azaltmaya yönelik çözümler geliştirmektedir. Portföyü, fare, sıçan ve küçük primat modellerine uyumlu farklı tünel çapı seçeneklerini içermektedir.

- **Molecubes:** Masa üstü ve modüler tasarıma sahip µPET, µSPECT ve µBT sistemleri geliştiren bir üreticidir (15). Kompakt yapısı sayesinde laboratuvar alanı kısıtlı araştırma merkezlerinde tercih edilmektedir. Ancak sistem geometrisi nedeniyle genellikle fare ve sıçan gibi küçük kemirgen modelleri ile sınırlı görüntüleme kapasitesi sunmaktadır.

- **Mediso Medical Imaging Systems:** Klinik öncesi PET ve SPECT tabanlı multimodal görüntüleme sistemlerinde (nanoScan serisi) uzmanlaşmıştır (7). Geliştirdiği dedektör teknolojileri, özellikle PET/BT ve PET/MR uygulamalarında yüksek uzaysal çözünürlük ve kantitatif

doğruluk sağlamaktadır. Geniş FOV seçenekleri ile tavşan modellerine kadar uzanan uygulamalara olanak tanımaktadır.

- **MILabs (Rigaku):** SPECT görüntülemeye çoklu iğne deliği (*multi-pinhole*) kolimasyon teknolojisini kullanan yüksek çözünürlüklü sistemler geliştirmektedir (17). Tek bir gantri içerisinde PET, SPECT, BT ve optik görüntüleme modüllerini entegre edebilen multimodal platformlar sunmaktadır.

- **MR Solutions:** Klinik öncesi multimodal görüntüleme sistemlerinde (PET/MR ve SPECT/MR) öncü firmalardan biridir. Özellikle *cryogen-free* MRG teknolojisi ve PET insert çözümleri ile eş zamanlı multimodal görüntüleme uygulamalarına olanak sağlamaktadır (Şekil 3) (16).

- **Revvity (PerkinElmer):** Optik moleküler görüntüleme alanında önemli üreticilerden biridir. Şirketin IVIS serisi, biyoluminesans ve floresan görüntüleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan klinik öncesi platformlar arasında yer almaktadır (11). Sistemler, özellikle fare ve yeni doğan sıçan gibi küçük hayvan modellerinin *in vivo* görüntülenmesine uygun olarak kullanılmaktadır.

Önemli Husus: Klinik öncesi görüntüleme sistemleri pazarı, yüksek manyetik alan gücüne sahip tam ölçekli sistemler geliştiren üreticiler (*Bruker, Mediso*) ile modüler, kompakt ve masaüstü çözümler sunan üreticiler (*Molecubes, MILabs, MR Solutions*) arasında farklı teknolojik yaklaşımlar temelinde çeşitlilik göstermektedir (Tablo 1).

Klinik öncesi moleküler görüntüleme sistemleri, hücrel ve moleküler düzeyde elde edilen biyolojik veriler ile klinik uygulamalarda kullanılan makroskobik

tanısal yöntemler arasında önemli bir translayonel köprü oluşturarak modern biyomedikal araştırmaların temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir (1,5). Bu derlemede gösterildiği üzere, nükleer tıp yöntemlerinin yüksek moleküler duyarlılığı ile manyetik rezonans ve BT'nin yüksek uzamsal çözünürlüğü, çoklu modalite sistem mimarileri içerisinde birleştirilerek tekil görüntüleme tekniklerinin fiziksel ve teknik sınırlılıklarının aşılmasına olanak sağlamaktadır (5,10).

Görüntüleme sistemlerinin tünel geometrisi, dedektör hassasiyeti ve sinyal penetrasyon özellikleri; fare ve sıçan gibi küçük kemirgenlerden tavşan ve primat gibi daha büyük translayonel modellere kadar uzanan farklı hayvan modellerinde kullanılabilirliği belirleyen temel teknik parametrelerdir (8,12). Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, bu sistemleri yalnızca anatomik ve fonksiyonel görüntüleme araçları olmaktan çıkarak, yapay zeka destekli rekonstrüksiyon algoritmaları ve teranostik yaklaşımların entegrasyonu sayesinde kantitatif biyobelirteç üretimine imkân veren gelişmiş araştırma platformlarına dönüştürmüştür (13,18,19,20).

Gelecekteki çalışmaların, çok hedefli moleküler problemlerin geliştirilmesi, yeni nesil dedektör teknolojilerinin (örneğin, kuantum tabanlı dedektör yaklaşımları) entegrasyonu ve translayonel süreçlerde standardizasyonu güçlendirecek metodolojik çerçevelerin oluşturulması üzerine yoğunlaşması beklenmektedir (13,20). Bu gelişmelerin, klinik öncesi ve klinik araştırmalar arasındaki translayonel bariyerlerin azaltılmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir (13,18).

Tablo 1. Klinik öncesi görüntüleme sistemlerinde başlıca üreticiler ve teknolojik odak alanları

Firma	Ana modaliteler	Teknolojik odak	Hayvan uyumluluğu
<i>Bruker</i> (6)	µMRG	Yüksek alan MRG, <i>cryogen-free</i> (helyum gerektirmeyen) mıknatıs teknolojileri	Fare, sıçan, küçük primatlar
<i>Molecubes</i> (15)	µPET, µSPECT, µBT	Modüler kübik (masaüstü) sistem mimarisi	Fare, sıçan
<i>Mediso</i> (7)	µPET/BT, µPET/MR, µSPEC	Yüksek çözünürlüklü multimodal görüntüleme (nanoScan platformu)	Fare, sıçan, tavşan
<i>MILabs</i> (17)	µPET, µSPECT, µBT, optik görüntüleme	Çok iğne delikli (<i>multi-pinhole</i>) SPECT ve entegre multimodal sistemler	Fare, sıçan, tavşan (sınırlı sistemlerde)
<i>MR Solutions</i> (16)	µMRG, PET/MR, SPECT/MR	<i>Cryogen-free</i> MRG teknolojisi ve PET insert sistemleri	Fare, sıçan, küçük primatlar
<i>Revvity</i> (11) (<i>PerkinElmer</i>)	Optik görüntüleme	IVIS biyoluminesans ve floresan görüntüleme sistemleri	Fare, yenidoğan kemirgenler

µMRG: Mikro-manyetik rezonans görüntüleme, µPET: Mikro-pozitron emisyon tomografi, µBT: Mikro-bilgisayarlı tomografi, µSPECT: Mikro-tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi, IVIS: *In vivo* görüntüleme sistemi

Sonuç

Sonuç olarak, klinik öncesi görüntüleme alanı cihaz merkezli bir yapıdan, entegre çoklu modalite sistemlere dayalı veri odaklı bir araştırma ekosistemine doğru evrilmektedir. Bu dönüşümün, translasyonel araştırmalarda veri bütünlüğü, doğruluk ve tekrarlanabilirlik açısından önemli kazanımlar sağlaması beklenmektedir.

Dipnotlar

Çıkar Çatışması: Yazarlar tarafından çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Yapay Zeka (AI) Kullanım Beyanı: Dil düzeltme, metin düzenleme, veri analizi ve literatür desteği alınmıştır.

Kaynaklar

- Weissleder R, Pittet MJ. Imaging in the era of molecular oncology. *Nature*. 2008;452:580-589.
- James ML, Gambhir SS. A molecular imaging primer: modalities, imaging agents, and applications. *Physiol Rev*. 2012;92:897-965.
- Chatziioannou AF. Molecular imaging of small animals with dedicated PET tomographs. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2002;29:98-114.
- Cunha L, Horvath I, Ferreira S, et al. Preclinical imaging: an essential ally in modern biosciences. *Mol Diagn Ther*. 2014;18:153-173.
- Serkova NJ, Glunde K, Haney CR, et al. Preclinical applications of multi-platform imaging in animal models of cancer. *Cancer Res*. 2021;81:1189-1200.
- Grandjean J, Canella C, Anckaert C, et al. Common functional networks in the mouse brain revealed by multi-centre resting-state fMRI analysis. *NeuroImage*. 2020;205:116278.
- Nagy K, Tóth M, Major P, et al. Performance evaluation of the small-animal nanoScan PET/MRI system. *J Nucl Med*. 2013;54:1825-1832.
- Bruzgo-Grzybko M, Kalita IS, Olichwier AJ, Bielicka N, Chabielska E, Gromotowicz-Popławska A. Preclinical PET and SPECT imaging in small animals: technologies, challenges and translational impact. *Cells*. 2025;15:73.
- Kuntner C, Stout D. Quantitative preclinical PET imaging: opportunities and challenges. *Front Phys*. 2014;2:12.
- Xu S, Liu G, Wei Q, et al. Recent advances in radionuclide medical imaging techniques. *Front Med*. 2025;12:1062020.
- Mezzanotte L, van 't Root M, Karatas H, Goun EA, Löwik CWGM. In vivo molecular bioluminescence imaging: new tools and applications. *Trends Biotechnol*. 2017;35:640-652.
- Hettiarachchi P, Park T. Choice of animal models to investigate cell migration and invasion in glioblastoma. *Cancers (Basel)*. 2025;17:2776.
- Kim SJ, Lee HY. In vivo molecular imaging in preclinical research. *Lab Anim Res*. 2022;38:31.
- Moran CM, Pye SD, Ellis W, et al. A comparison of the imaging performance of high resolution ultrasound scanners for preclinical imaging. *Ultrasound Med Biol*. 2011;37:493-501.
- Muller FM, Vanhove C, Vandeghinste B, Vandenberghe S. Performance evaluation of a micro-CT system for laboratory animal imaging with iterative reconstruction capabilities. *Med Phys*. 2022;49:3121-3133.
- Emvalomenos G, Trajanovska S, Pham BTT, et al. Performance evaluation of a PET insert for preclinical MRI in stand-alone PET and simultaneous PET-MRI modes. *EJNMMI Phys*. 2021;8:68.
- Beekman FJ, van der Have F, Vastenhouw B, et al. U-SPECT-I: a novel system for submillimeter-resolution tomography with radiolabeled molecules in mice. *J Nucl Med*. 2005;46:1194-1200.
- Saboury B, Bradshaw T, Boellaard R, et al. Artificial intelligence in nuclear medicine: opportunities, challenges, and responsibilities toward a trustworthy ecosystem. *J Nucl Med*. 2023;64:188-196.
- Zaidi H, El Naqa I. Quantitative molecular positron emission tomography imaging using advanced deep learning techniques. *Annu Rev Biomed Eng*. 2021;23:249-276.
- Visvikis D, Lambin P, Beuschaus Mauridsen K, et al. Application of artificial intelligence in nuclear medicine and molecular imaging: a review of current status and future perspectives for clinical translation. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2022;49:4452-4463.