

## Tıbbi Görüntüleme Ünitelerinde Fiziksel Risk Etmenlerinin Eliminasyonu İçin Uzay Modeli

Murat DENİZ<sup>1</sup>, Birgül DENİZ<sup>2</sup>, İsmail BENTLİ<sup>\*3</sup>

<sup>1</sup>İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, 44280, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Turguz Özal Tıp Merkezi, 44280, Malatya, Türkiye

<sup>3</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

Murat DENİZ ORCID No: 0009-0009-3315-2274, Birgül DENİZ ORCID No: 0009-0003-3480-6504,  
İsmail BENTLİ ORCID No: 0000-0003-3775-7341

### MAKALE BİLGİSİ

### ÖZ

Geliş: 04.02.2026  
Kabul: 16.04.2026

#### Anahtar Kelimeler

Tıbbi görüntüleme,  
Fiziksel risk etmenleri,  
Radyasyon güvenliği,  
Ergonomik tasarım.

#### \* Sorumlu Yazar

ismail.bentli@inonu.edu.  
tr

Hastanelerde Tıbbi Görüntüleme Teknolojileri (TGT), tanısal doğruluk açısından kritik öneme sahip olmakla birlikte çalışan sağlığı bakımından çok boyutlu fiziksel riskler barındırmaktadır. İyonize radyasyon, manyetik alan, gürültü, termal stres ve ergonomik zorlanmalar çalışanların maruz kaldığı başlıca tehlikeler arasında yer almaktadır. Literatür, mevcut mimari düzenin çalışan ile cihaz arasında zorunlu fiziksel temas oluşturduğunu ve bu nedenle riskin kaynağında eliminasyonunun sağlanamadığını göstermektedir. Bu çalışmanın amacı, tıbbi görüntüleme ünitelerinde ortaya çıkan fiziksel risk faktörlerini mimari ve operasyonel düzeyde tamamen ortadan kaldırmayı hedefleyen “Uzay Modeli”ni geliştirmektir. Model; yatay vakumlu taşıma sistemi, kapsül tipi transfer birimi, çok katmanlı zırh yapısı, modüler kabin sistemi ve uzaktan komuta temelli işlem yönetimini içeren bütünlük bir yapı olarak tasarlanmıştır. Çalışmada ilgili literatür kapsamlı olarak incelenmiş, fiziksel risk bileşenlerinin etkileşimleri değerlendirilmiş ve modelin teknik uygulanabilirliği mühendislik parametreleri üzerinden açıklanmıştır. Elde edilen bulgular, çalışan-cihaz temasının tamamen kesilmesi durumunda iyonize radyasyon ve elektromanyetik alan maruziyetinin teorik olarak sifıra yakın düzeye indirilebildiğini göstermektedir. Ayrıca model, ergonomik yükü azaltmakta ve operasyonel iş akışını standartlaştırarak güvenlik düzeyini artırmaktadır. Bu kapsamda Uzay Modeli, mevcut risk azaltma odaklı yaklaşımlardan farklı olarak riskin kaynağında ortadan kaldırıldığı yeni bir mimari paradigmaya işaret etmektedir.

## Space Model for the Elimination of Physical Risk Factors in Medical Imaging Units

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

Received: 04.02.2026  
Accepted: 16.04.2026

#### Keywords

Medical imaging,  
Physical risk factors,  
Radiation safety,  
Ergonomic design.

#### \* Corresponding

#### Author

ismail.bentli@inonu.edu.  
tr

Medical imaging units play a central role in diagnostic accuracy; however, they expose healthcare workers to multiple physical hazards such as ionizing radiation, magnetic fields, noise, thermal stress, and ergonomic load. Previous research demonstrates that conventional architectural layouts require direct worker–equipment interaction, preventing the elimination of hazards at their source. The aim of this study is to develop the “Space Model,” a fully isolated architectural and operational system designed to eliminate physical risk factors in medical imaging environments. The model integrates a horizontal vacuum transport system, capsule-type patient transfer module, multi-layer shielding structure, modular imaging cabin, and remote-controlled operational workflow. A comprehensive literature review was conducted, and the interaction mechanisms of physical risk factors were analyzed. Technical feasibility was evaluated using engineering-based performance parameters. Findings indicate that complete physical separation between workers and imaging devices can theoretically reduce exposure to ionizing radiation and electromagnetic fields to near-zero levels. Moreover, the model minimizes ergonomic burden and enhances workflow standardization, thereby increasing overall safety. In this context, the Space Model represents a novel architectural paradigm that differs from traditional risk-reduction strategies by enabling true hazard elimination at the source.

## GİRİŞ

Tıbbi Görüntüleme Teknolojileri (TGT), modern sağlık hizmetlerinin ana bileşenlerinden biridir ve tanı ve tedavi süreçlerine rehberlik etmede kritik bir rol oynamaktadır (1). Bilgisayarlı Tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MR), floroskopi ve geleneksel X-ışını, yüksek tanılabilirlik sunan ancak sağlık çalışanları için çok boyutlu fiziksel riskler de oluşturan gelişmiş görüntüleme yöntemleridir (2). Literatür, radyoloji çalışanlarının uzun yıllar boyunca iyonlaştırıcı radyasyon, güçlü manyetik alanlar, gürültü, termal stres ve ergonomik zorlanma gibi farklı tehlikelere düşük dozlarda ancak sürekli ve genellikle akut olmayan bir şekilde maruz kaldığını göstermektedir (3, 4).

Uluslararası radyolojik koruma kuruluşları, radyoloji çalışanlarını mesleki maruziyet açısından en yüksek risk gruplarından biri olarak sınıflandırmaktadır (5, 6). Mevcut koruyucu önlemler (kurşun önlük, dozimetre, mesafe-zaman yönetimi, bariyerler) riskin tamamen ortadan kaldırılmasını sağlamamakta, yalnızca azaltılmasına olanak tanımaktadır (7). Geleneksel radyoloji odası mimarisi, çalışanın cihazla aynı ortamı paylaşmasını zorunlu kılmakta; özellikle hasta konumlandırma, işlem hazırlığı ve görüntüleme sırasında, fiziksel olarak tehlike kaynağıyla doğrudan temas halinde bırakılmaktadır (8). Bu yapısal yakınlık, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) hiyerarşisinde en etkili strateji olan eliminasyon (ortadan kaldırma) ilkesinin uygulanmasını engellemekte ve riski iş pratiğinin kaçınılmaz bir kuralı haline getirmektedir (9, 10).

MR ünitelerinde iyonlaştırıcı radyasyon bulunmamasına rağmen, yüksek manyetik alan gücü, implant hareketi, metalik nesnelerin çekimi, manyetik indüksiyon ve şiddetli akustik gürültü gibi risk faktörlerini beraberinde getirmektedir. Bu durum, radyoloji ünitelerinin tek bir risk alanından ziyade, aynı anda var olan birden fazla fiziksel tehlike bileşeninden meydana geldiğini göstermektedir (11, 12).

Geleneksel literatürün çoğu radyolojik riskleri ölçmeye ve azaltmaya odaklanmaktadır; ancak riski kaynağında tamamen ortadan kaldırmayı amaçlayan mimari veya mühendislik tabanlı bir yaklaşım bulunmamaktadır. Bu çalışma, tam izolasyon prensibiyle çalışan Uzay Modeli'ne dayanarak, çalışanlar ile risk kaynakları arasındaki fiziksel teması ortadan kaldırmayı ve böylece İSG hiyerarşisinde en üst düzeyde yer alan ortadan kaldırma (eliminasyon) prensibini mimari düzeyde uygulamaya koymayı amaçlamaktadır (13, 14). Bu bölümde, tıbbi görüntüleme ünitelerinde çalışanların maruz kaldığı fiziksel risk faktörleri ile mimari tasarımın maruziyet üzerindeki belirleyici rolü, güncel bilimsel literatür ışığında ele alınmaktadır.

### Bilimsel Yayın Taraması

Bu bölümde, tıbbi görüntüleme ünitelerinde çalışanların maruz kaldığı risklerle ilgili mevcut bilimsel literatür incelenmekte ve risk azaltma stratejilerinin ötesine geçmenin gerekli olduğu vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, çalışanlar için güvenliği artırmaya yönelik ortadan kaldırmaya (eliminasyona) dayalı mimari gereksinimlerin dikkate alınması önem kazanmaktadır. Bu gereksinimler, sağlık çalışanlarının maruz kaldığı potansiyel tehlikeleri azaltmak ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak amacıyla kritik öneme sahiptir (10, 15, 16).

### İyonize Radyasyonun Kümülatif Etkisi

Güncel çalışmalar, tıbbi görüntüleme çalışanlarının düşük dozlarda fakat sürekli iyonize radyasyona maruz kaldığını ve bu birikimin zamanla geri dönüşü olmayan biyolojik hasarlara neden olabileceğini göstermektedir. Nitekim son yıllarda yapılan araştırmalar bu riskin açıkça arttığını bildirmektedir (17, 18, 19). BT, floroskopi ve konvansiyonel radyografi cihazları özellikle saçılma radyasyonu nedeniyle çalışanların sürekli risk altında olmasına neden olmaktadır (20, 21, 22). Literatür, düşük doz radyasyon maruziyetinin bile DNA hasarı, hücre mutasyonları ve uzun dönem kanser riskini artırabileceğini vurgulamaktadır (2). Uluslararası raporlar sağlık çalışanlarının yıllık doz limitlerine yakın değerlerde çalıştığını ve meslek yaşamı boyunca biriken dozun kritik önem taşıdığını belirtmektedir (1, 23).

Girişimsel radyoloji çalışanlarında, belirli eşik değerlerini aşan radyasyon maruziyetinin deterministik cilt hasarlarına yol açabildiği klinik vaka ve gözlemsel çalışmalarla ortaya konulmuştur (24, 25). Bu bulgular, radyasyonun yalnızca azaltılması değil kaynağında ortadan kaldırılması gerekliliğini bilimsel olarak güçlendirmektedir. Bu durum, mevcut koruma yaklaşımlarının yeterli olmadığını ve çalışan ile kaynak arasındaki fiziksel temasın mimari düzeyde kesilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

### **Manyetik Alanların Fiziksel Etkileri ve Güvenlik Sorunları**

MR üniteleri iyonize radyasyon içermemesine rağmen statik manyetik alan, değişken gradyan alanları ve radyo frekans (RF) enerjisi nedeniyle ferromanyetik materyallerin hızla çekilmesi, implant ısınması, metalik cisimlerin yer değiştirmesi ve RF kaynaklı ısı yükü gibi risklerle çalışanlar açısından çoklu fiziksel risk profili oluşturmaktadır (26, 27, 28).

### **Akustik Gürültü ve Termal Stres**

MR cihazlarındaki hızlı gradyan değişimleri, çalışan ve hastaların 100 dB'nin üzerinde gürültüye maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu seviyedeki akustik stres, işitme yorgunluğu, baş ağrısı ve psikofizyolojik rahatsızlıklara yol açabilmektedir. MR ortamındaki akustik etkiler, nörofizyolojik ve ergonomik düzeyde de değerlendirilmektedir (29, 30, 31). Ayrıca bu maruziyetin düzenli takibi ve kontrolü gerekli görülmektedir (3).

### **Ergonomik Zorlanmalar ve Kas-İskelet Sistemi Riskleri**

Ağır hasta taşıma, manuel pozisyonlandırma, eğilme-dönme hareketleri radyoloji çalışanlarında kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının en önemli nedenleri arasındadır. Radyoloji çalışanları sağlık meslekleri içinde sırt yaralanması ve kas-iskelet zorlanması açısından en yüksek risk gruplarından birini oluşturmaktadır (32). Uzun süreli statik duruşlar ve tekrarlayan hareketlerin özellikle bel-boyun bölgesinde kronik zorlanmaya yol açtığını göstermektedir (4, 33).

### **Mimari Tasarımın Maruziyete Etkisi**

Geleneksel radyoloji odası mimarisi, çalışanların görüntüleme cihazı ile aynı fiziksel alanı paylaşmasını zorunlu kılan bir yerleşim düzenine sahiptir. Bu yapı, özellikle hastanın pozisyonlanması, çekim hazırlığı ve görüntüleme aşamalarında çalışanların risk kaynağına doğrudan yaklaşmasına neden olmakta ve böylece iyonize radyasyon, saçılma dozu ve diğer fiziksel tehlikelerle temasın artmasına yol açmaktadır. Literatür çalışmaları, oda yerleşimi ve yapısal tasarımın saçılma radyasyonu düzeylerini ve personel maruziyetini doğrudan etkilediğini göstermektedir (34, 35, 36).

Oda geometrisi, kontrol odasının konumu, bariyerlerin yerleşimi, duvar zırhı kalınlığı ve cihaz-çalışan mesafesi gibi mimari değişkenler, radyoloji çalışanlarının maruziyetini belirleyen temel faktörlerdir. Literatür çalışmaları, oda düzeni ve koruyucu bariyerler optimize edilmediği takdirde hem birincil hem de saçılma radyasyon bileşenlerine gereğinden fazla maruz kalındığını göstermektedir (35, 37, 38).

Bununla birlikte mimari tasarım yalnızca ergonomik bir düzenleme değil, aynı zamanda İSG hiyerarşisindeki eliminasyon, ikame, mühendislik kontrolleri basamaklarının uygulanabilirliğini doğrudan belirleyen yapısal bir faktördür. Literatürde "Prevention through Design (PtD)" yaklaşımı, tehlikelerin kaynağında ortadan kaldırılmasını veya mühendislik kontrolleri yoluyla minimize edilmesini, yani riskin daha oluşmadan tasarım aşamasında yönetilmesini önermektedir (39, 40, 41). Bu bağlamda çalışan-çihaz temasını ortadan kaldıran veya minimuma indiren her türlü mimari müdahale, klasik kişisel koruyucu donanım temelli yaklaşımlardan farklı olarak tehlikenin kaynağında kontrol ilkesine tam olarak karşılık gelmektedir.

Ayrıca radyoloji odalarında çalışanların hareket rotası, hasta transfer yönü, cihaz etrafındaki geçiş alanları ve iş akışının odadaki dağılımı, maruziyet süresi ve yoğunluğu üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Çalışanların risk kaynağına istemsizce yaklaşmasına neden olan dolaşım hataları, ergonomik sıkışmalar veya kontrol odasına erişim kısıtları, mimari tasarımın doğrudan güvenlik çıktısı yaratabileceğini göstermektedir (42).

Bununla birlikte mimari tasarım, yalnızca mevcut risklerin azaltılmasına katkı sağlayan bir ergonomik iyileştirme değil, aynı zamanda çalışan ve cihazın fiziksel temasını ortadan kaldırarak eliminasyon temelli bir güvenlik yaklaşımını mümkün kılan temel bir bileşendir. “Prevention Through Design (PtD)” yaklaşımı, tehlikelerin kaynağında ortadan kaldırılmasının en etkili koruma basamağı olduğunu ve bunun işyeri/tesis tasarımıyla gerçekleştirilebildiğini açıkça ortaya koymaktadır (14, 43). Radyoloji ünitelerinde yapısal düzenlemelerin bu çerçevede ele alınması, çalışmada önerilen tam izolasyon esaslı “Uzay Modeli’ne” geçiş için gerekli bilimsel temeli oluşturmaktadır.

### **Otomasyon, Uzaktan Pozisyonlama ve Robotik Sistemler.**

Robotik sistemler, çalışanın cihazla temasını azaltan önemli bir mühendislik yaklaşımıdır. Cihaz hareketlerinin uzaktan kontrol edilmesi, hastanın konumlandırılması, ve otomatik pozisyonlama gibi uygulamalar çalışan maruziyetini azaltmaktadır (44). Güncel literatür robotik otomasyonun sadece pozisyonlamayı değil, güvenlik, iş akışı yönetimi ve uzaktan operasyon kapasitesini de geliştirdiğini göstermektedir (45).

### **İSG Hiyerarşisi ve Eliminasyon Yaklaşımının Gerekliliği**

İSG hiyerarşisinin en üst basamağı olan eliminasyon, tehlikenin kaynağında tamamen yok edilmesini ifade eder. Ancak geleneksel radyoloji uygulamalarında bu ilke yapı ve süreç zorunlulukları nedeniyle uygulanmamaktadır. Literatürde geleneksel koruma yöntemlerinin risk azaltıcı olmakla birlikte riskin sıfırlanmasını sağlayamadığı vurgulanmaktadır (15). Güncel çalışmalar, risklerin sistematik sınıflandırılması ve eliminasyon odaklı yeniden tasarımın sürdürülebilir güvenlik yönetiminin temel bileşeni olduğunu göstermektedir (10, 13, 14, 46).

Bu bağlamda literatür, tıbbi görüntüleme ünitelerinde risk azaltma yerine risk eliminasyonunu hedefleyen yeni bir mimari model gereksinimine işaret etmektedir (14). Bu çalışma uzaktan komuta, izolasyon, robotik süreç yönetimi, çok katmanlı zırh sistemi ile çalışan ve maruziyetini sıfırlamayı hedefleyen “Uzay Modeli’ni” önermektedir.

## **MATERYAL VE METOT**

### **Araştırma Tasarımı**

Bu çalışma, tıbbi görüntüleme ünitelerinde çalışanların maruz kaldığı fiziksel risklerin geleneksel mimari yapıda neden tamamen ortadan kaldırılamadığını incelemek ve bu riskleri kaynağında yok etmeyi hedefleyen tam izolasyon temelli yeni bir mimari sistem geliştirmek amacıyla yürütülmüş nitel, kuramsal ve model odaklı bir araştırmadır. Çalışma deneysel veri üretmeyen; tasarım, kavramsal modelleme ve matematiksel analiz bileşenlerini içeren bir metodolojik çerçeveye sahiptir.

### **Literatür Taraması**

Araştırmanın ilk aşamasında 2000–2025 yılları arasında yayımlanan toplam 49 bilimsel kaynak incelenmiştir. Bu kapsamda iyonize radyasyon güvenliği, manyetik alan maruziyeti, termal stres ve gürültü gibi fiziksel riskler ile ergonomik yüklenme süreçleri; ayrıca yüksek güvenliğin tesislerde uygulanan izolasyon prensipleri ve uzaktan kontrol–otomasyon sistemlerine ilişkin literatürler öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Bu inceleme, mevcut mimari yaklaşımın çalışanı

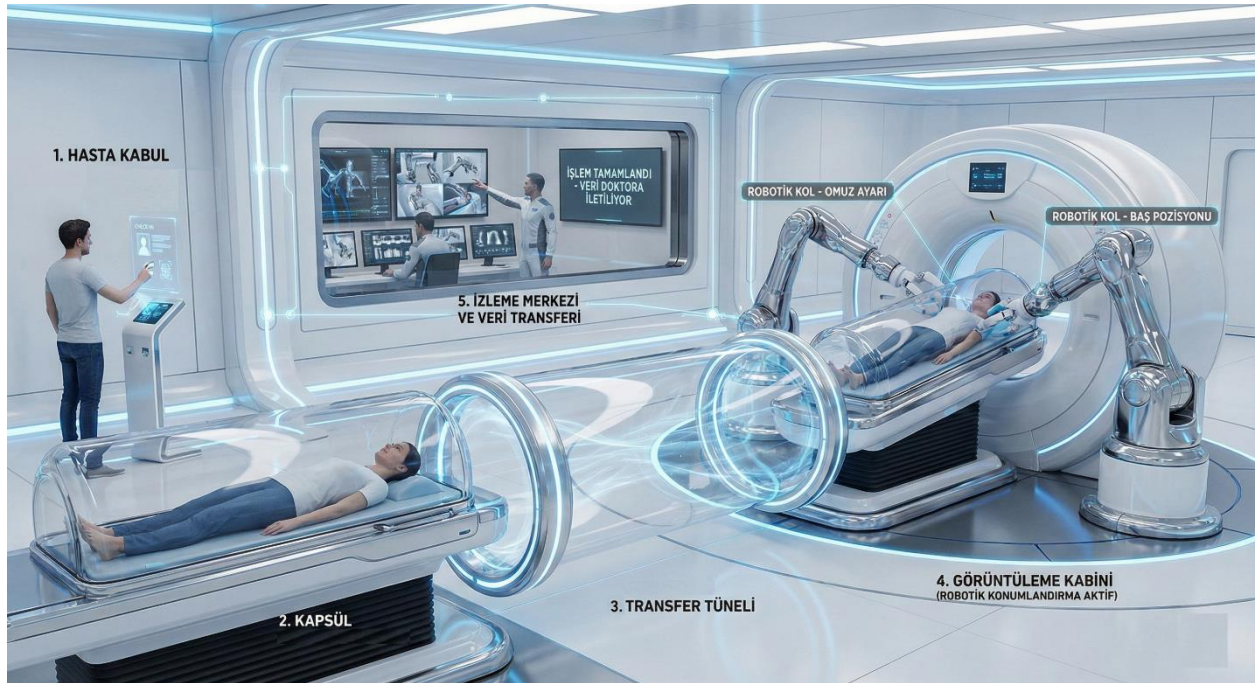
kaynaktan uzaklaştırma veya maruziyeti azaltma prensipleriyle sınırlı kaldığını, buna karşın riskin tamamen ortadan kaldırılmasının ancak tam izolasyona dayalı yeni bir model ile mümkün olabileceğini ortaya koymaktadır.

### Kuramsal Model Geliştirme

Model geliştirme süreci, uzay üssü tipolojisi, modüler mimari yaklaşım, kapalı devre sistemler ve otonom operasyon teknolojilerinden yararlanarak kurgulanmıştır. Buradaki amaç, çalışan ile cihaz arasındaki fiziksel bağı tamamen kesen tam izolasyon prensibini sağlamaktır. Geliştirilen sistem aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

### Uzaktan Kontrol Merkezi

Bu merkez, görüntüleme sürecinin tamamının personel tarafından güvenli bir alandan yönetilmesini sağlayan operasyon birimidir. Birimde operasyon konsolu, robotik pozisyonlandırma paneli ve görüntüleme komut sistemi yer almaktadır. Personel hiçbir aşamada görüntüleme kabineye girmez; tüm süreç tamamen uzaktan yönetilir (Şekil 1).



Şekil 1. Uzaktan Kontrol Merkezi Şeması (Görsel, yapay zekâ kullanılarak bu çalışma için üretilmiştir).

### Modüler Görüntüleme Kabinleri

Sistem, BT, MR, floroskopi, röntgen ve mamografi gibi modaliteler için ayrı ayrı tasarlanmış, çok katmanlı zırhla korunmuş izole kabinlerden oluşmaktadır. Her kabin, kendi fiziksel gereksinimlerine göre optimize edilmiş bağımsız bir modüldür. Bu yapı hem tam izolasyon sağlamakta hem de arıza veya yenileme durumunda yalnızca ilgili kabinin devre dışı bırakılmasına imkân tanımaktadır.

### Kapsül Tipi Hasta Taşıma Ünitesi

Hasta, kapalı ve basınç kontrollü bir kapsül içinde modüler görüntüleme kabine taşınmaktadır. Kapsül; tek kullanımlık film kaplama, manyetik ray üzerinde kontrollü hareket, acil durdurma mekanizması ve iki yönlü iletişim sistemi gibi unsurlarla donatılmıştır. Bu tasarım, hasta-personel temasını tamamen ortadan kaldırarak risk eliminasyonuna katkı sağlamaktadır.

## Yatay Vakumlu Transfer Tüneli

Kapsül ünitesi kabine, sürtünmesiz hareket sağlayan yatay vakum tüneli içinde taşınmaktadır. Vakum etkisiyle kapsül tamamen temassız ve yüksek stabilite ile ilerlemektedir. Tünel sistemi acil durumlarda ters yönde çalışarak hastanın hızlı tahliyesini de mümkün kılmaktadır. Bu yapı, izolasyonun sürekliliğini sağlayan temel lojistik bileşendir.

## Çok Katmanlı Zırh Sistemi

Görüntüleme kabinlerinin dış duvarları, iyonize radyasyonu ve yüksek frekanslı elektromanyetik alanları tamamen kesmek amacıyla çok katmanlı bir mühendislik yapısına sahiptir (Şekil 2). Bu yapı aşağıdaki tabakalardan oluşur:

1. Grafen Nano Kaplama – radyasyon absorpsiyonu
2. Kurşun Çekirdek Bariyer – yüksek enerjili foton engelleme
3. İyon Yönlendirici Yüzey – yüklü parçacık akışını saptırma
4. EM Absorbe Tabakası – MR elektromanyetik alanını kesme
5. Dış Koruyucu Yüzey – mekanik dayanıklılık



Şekil 2. Beş Katmanlı Duvar ve Zırh Sistemi Şeması (Görsel, yapay zeka kullanılarak bu çalışma için üretilmiştir).

Bu bileşenler modele ait temel mekanik ve mimari yapıyı tanımlamaktadır. Ancak bu araştırma prototip tasarımı değil kavramsal modelleme çalışmasıdır.

## Analitik Karşılaştırma Yaklaşımı

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analitik karşılaştırma, deneysel ölçümler veya nicel veri analizleri içermeyen, literatür temelli kavramsal bir değerlendirme niteliğindedir. Bununla birlikte, izleyen bölümde sunulan fiziksel yasalar, çalışmada deneysel bir analiz yürütüldüğü anlamına gelmemekte; yalnızca önerilen mimarinin risk eliminasyonu potansiyelini kuramsal

düzye de açıklamak amacıyla kullanılan temel fizik prensiplerini temsil etmektedir. Bu nedenle matematiksel ifadeler modelin teorik işleyişini destekleyici bir çerçeve sunmakta, nicel karşılaştırma amacı taşımamaktadır.

### Matematiksel Risk Analizi

Modelin risk eliminasyonu sağlayıp sağlamadığı üç temel fizik prensibi üzerinden değerlendirilmiştir.

### Ters Kare Yasası (İyonize Radyasyon)

$$D = \frac{D_0}{r^2} \quad (1)$$

$D$ : Belirli bir mesafedeki iyonize radyasyon dozudur (maruziyet miktarı, Sievert).

$D_0$ : Radyasyon kaynağındaki veya referans noktadaki başlangıç doz (Sievert) miktarıdır.

$r$ : Radyasyon kaynağı ile ölçüm noktası arasındaki mesafedir (uzaklıktır, m).

$r^2$ : Dozun mesafenin karesiyle ( $m^2$ ) ters orantılı olarak azaldığını belirtir.

Çalışan ile cihaz arasındaki mesafenin mimari olarak “sonsuzlaştırılması” (tam ayrışma) maruziyeti teorik olarak sıfıra yaklaştırır.

### Manyetik Alan Zayıflaması (MR)

Manyetik Rezonans (MR) cihazlarının ürettiği statik manyetik alanın şiddeti, kaynaktan uzaklaşıldıkça hızla azalır. İyonize radyasyonun (Ters Kare Yasası) aksine, MR alanının zayıflaması mesafenin küpüyle ters orantılı olarak gerçekleşir (Dipol Yaklaşımı). Bu zayıflama, çalışan ile cihaz arasındaki mekânsal ayrışmanın, maruziyeti sıfırlamada ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

$$B \propto \frac{1}{r^3} \text{ veya } B(r) \approx B_0 \left(\frac{L}{r}\right)^3 \quad (2)$$

$B$ : Belirli bir uzaklıktaki manyetik alan şiddetidir (Tesla).

$B_0$ : Başlangıç Alan Şiddeti (Tesla),

$r$ : Manyetik alan kaynağı ile ölçüm noktası arasındaki Mesafedir (uzaklıktır, metre),

$r^3$ : Alan şiddetinin mesafenin küpüyle ( $m^3$ ) ters orantılı olarak azaldığını belirtir,

$L$ : Karakteristik Boyut (m).

MR çevresel alan profili mesafe arttıkça mesafenin küpünün tersiyle orantılı olarak azalır; bu nedenle çalışan kabin dışına çıkarıldığında  $B \approx 0$  kabul edilebilir.

### Termal Direnç Formülü:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{duvar}} \quad (3)$$

$Q$ : Isı Akış Hızı (Isıl Yük, Watt),

$R_{duvar}$ : Duvarın Termal Direnci (Kelvin/Watt),

$\Delta T$ : Maddenin sıcaklık değişimidir (Kelvin).

Düşük iletkenlik katsayısına sahip çok katmanlı duvar yapısı termal geçişi minimuma indirmektedir.

### Süreç Akışı Simülasyonu

Modelin operasyonel uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla hasta kabulünden görüntüleme işleminin tamamlanmasına kadar uzanan tüm iş akışı için bir süreç simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon; hastanın kabul edilmesi, kapsül içine yerleştirilmesi, vakum tüneli boyunca sürtünmesiz şekilde transferi, modüler kabine otomatik giriş, robotik sistem tarafından pozisyonlandırma, uzaktan görüntüleme işlemi, verilerin dijital olarak aktarılması ve işlem sonrasında hastanın çıkış modülüne yönlendirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Tüm süreç boyunca herhangi bir aşamada personel ile cihaz veya hasta aynı fiziksel ortamı paylaşmamaktadır.

### Görsel Materyaller ve Telif Hakları

Makalede kullanılan şekil ve görsellerin tamamı, çalışmanın kavramsal modelini görselleştirmek amacıyla üretken yapay zekâ teknolojisi kullanılarak yazarlar tarafından bu çalışma için özel olarak oluşturulmuştur. Görsellerin telif hakkı ihlali bulunmamaktadır ve kullanım izinleri yazarlara aittir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, hastanelerde yer alan tıbbi görüntüleme ünitelerinde çalışan sağlığını tehdit eden çok boyutlu fiziksel risk faktörleri (iyonize radyasyon, manyetik alan, gürültü, termal stres ve ergonomik zorlanmalar) kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş ve bu risklerin kaynağında tamamen elimine edilmesini hedefleyen bir mimari çözüm olarak “Uzay Modeli” geliştirilmiştir.

Literatür bulguları, mevcut mimari düzenlemelerin ve geleneksel koruma önlemlerinin (kişisel koruyucu donanımlar, mesafe-zaman yönetimi) riskleri yalnızca azaltmakla sınırlı kaldığını ve İSG hiyerarşisinin en üst basamağı olan eliminasyon ilkesini yapısal zorunluluklar nedeniyle uygulanamaz kıldığını göstermiştir. Özellikle çalışanların hastanın pozisyonlanması ve çekim hazırlığı gibi zorunlu adımlarda cihazla aynı ortamı paylaşması, maruziyetin temel kaynağıdır.

### Uzay Modeli ile Risk Eliminasyonu

Geliştirilen Uzay Modeli, tam izolasyon prensibi üzerine kurulmuştur ve çalışan-cihaz arasındaki zorunlu fiziksel teması tamamen ortadan kaldırmayı hedeflemektedir.

Radyasyon ve Manyetik Alan Riski: Matematiksel analizler (Ters Kare Yasası ve Dipol Yaklaşımı), çalışan ile radyasyon veya manyetik alan kaynağı arasındaki mesafenin mimari olarak sonsuzlaştırılması (tam ayrışma) durumunda, iyonize radyasyon dozunun ve manyetik alan şiddetinin teorik olarak sifıra yakın düzeye indiğini göstermiştir.

Çok Katmanlı Zırh Sistemi: Modüler görüntüleme kabinlerinin dış duvarları, grafen nano kaplama, kurşun çekirdek bariyer, iyon yönlendirici yüzey ve elektromanyetik absorbe tabakası gibi beş katmandan oluşan bir zırh yapısıyla tasarlanmıştır. Bu entegre yapı, hem iyonize radyasyonun hem de MR kaynaklı manyetik alan sızıntılarının dış ortama geçişini etkin bir şekilde engellemektedir.

Ergonomik ve Temas Riskleri: Kapsül tipi hasta taşıma ünitesi ve yatay vakumlu transfer tüneli sistemi, hastanın kabulünden görüntüleme işlemi sonuna kadar personel ile hasta/cihaz arasındaki fiziksel teması tamamen kesmektedir. Robotik pozisyonlandırma sistemi, manuel pozisyonlandırma kaynaklı kas-iskelet zorlanmasını ve buna bağlı ergonomik yükü ortadan kaldırmaktadır.

Aşağıda Tablo 1, geleneksel mimari ile Uzay Modeli'nin temel güvenlik ve operasyonel kriterler açısından karşılaştırmasını sunmaktadır:

**Tablo 1. Geleneksel Mimari ile Uzay Modeli'nin Karşılaştırılması**

Kriter	Geleneksel Mimari	Uzay Modeli
Çalışan-Cihaz Mesafesi	Aynı mekân	Ayrı mekân (Tam İzolasyon)
Radyasyon Maruziyeti	Vardır	Yoktur
Manyetik Alan Riski	Vardır	Yoktur
Ergonomik Zorlanma	Yüksek	Yok
İş Akışı	Operatör Odaklı	Otonom-Uzaktan
Güvenlik Düzeyi	Sınırlı	Maksimum

### Modelin Etki Bileşenleri

Model, riskleri yalnızca azaltmak yerine kaynağında eliminasyon ilkesine göre tasarlanmıştır. Modelin iş akışı simülasyonunda, tüm sürecin uzaktan kontrol merkezi üzerinden yönetilmesi, kapsül içi transfer, vakum tüneli ve modüler kabinler gibi bileşenler ile hiçbir aşamada personel ile cihaz veya hasta aynı fiziksel ortamı paylaşmamaktadır. Aşağıdaki Tablo 2 Uzay Modeli'nin fiziksel risk kategorilerindeki kontrol düzeyini özetlemektedir:

**Tablo 2. Uzay Modeli'nin Risk Eliminasyon Performansı**

Risk Türü	Kaynak	Etki Şiddeti	Kontrol Düzeyi (Geleneksel)	Kontrol Düzeyi (Uzay Modeli)
İyonize Radyasyon	X-Ray / BT cihazı	Yüksek	Azaltma (PPE)	Eliminasyon
Manyetik Alan	MR cihazı	Orta-Yüksek	Azaltma	Eliminasyon
Termal Stres	MR odası, BT tüpü	Orta	Azaltma	Büyük Oranda Azaltma
Gürültü	MR cihazı	Orta	Azaltma	Büyük Oranda Azaltma
Ergonomik Yük	Hasta kaldırma- pozisyonlama	Yüksek	Azaltma	Eliminasyon

Sonuç olarak Uzay Modeli, geleneksel radyoloji mimarisine kıyasla çalışan sağlığı açısından maruziyetin sıfırlanması, temasın kaldırılması, ergonomik yükün azaltılması, operasyonun tam otomasyonla yürütülmesi ve iş hijyeni prensiplerinin eksiksiz karşılanması gibi çok boyutlu faydalar sağlamaktadır. Bu çalışma, literatürde ilk kez çalışan-cihaz ayırımına dayalı beş katmanlı zırh mimarisini bütüncül bir sistem olarak tanımlamaktadır.

Durum tespiti, tıbbi görüntüleme ünitelerinde çalışan sağlığının mevcut mimari ve operasyonel düzen içinde tam olarak korunamadığını gösteren güncel araştırmalarla uyumludur (47, 48). Literatürde iyonize radyasyon, manyetik alan etkisi, termal stres ve ergonomik yük gibi çoklu risk faktörlerinin çalışan üzerinde ciddi sağlık etkileri oluşturduğu uzun süredir bilinmektedir (49). Ancak mevcut mimari sistemlerin temel problemi, çalışan ile cihaz arasında zorunlu bir fiziksel yakınlık oluşturmasıdır. Bu durum risk azaltmayı mümkün kılarsa da eliminasyonun önünde yapısal bir engel oluşturmaktadır.

Çalışmada geliştirilen tam izolasyon temelli model, bu yapısal engeli ortadan kaldırarak çalışanı risk kaynağından tamamen ayırmaktadır. Model, literatürde daha önce yalnızca teorik

çerçevede tartışılan robotik pozisyonlama, uzaktan kontrol, kapalı devre operasyon ve modüler mimari yaklaşımlarını bir araya getirerek çalışan maruziyetini sıfırlayan bütüncül bir çözüm sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, mevcut risk azaltma yaklaşımından farklı olarak doğrudan risk eliminasyonuna odaklanmakta ve literatürde eksik kalan bir paradigma değişikliğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, uzay üssü mimarisine benzer kapalı sistem mantığının sağlık hizmetlerine uyarlanabilir olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım, yalnızca radyasyon maruziyetinin değil; manyetik alan, gürültü, ergonomik zorlanma ve biyolojik bulaş risklerinin de ortadan kaldırılmasını mümkün kılmaktadır. Böylece çalışan sağlığının korunması, kişisel koruyucu donanım ve sınırlı koruma mekanizmalarına bağımlı olmaktan çıkarak mimari bir çözüm haline getirilmektedir.

Geleneksel mimari, risk yönetiminde yalnızca kontrol ve sınırlandırma basamaklarında kalırken, “Uzay Modeli” İş Hijyeni hiyerarşisindeki en üst düzey olan Eliminasyon ilkesini mimari ve mühendislik yoluyla sağlamaktadır. Geleneksel mimari, risk yönetiminde yalnızca kontrol ve sınırlandırma basamaklarında kalırken, belirtilen Model İş Hijyeni disiplinine göre en güçlü koruma mekanizmalarını; kaynağın izolasyonu, temasın kesilmesi, maruziyet mesafesinin artırılması ve kapalı sistem oluşturulması ilkelerinin tamamını aynı anda karşılayarak İSG gerekliliklerine tam ve bütüncül bir uyum sağlamaktadır.

Uzay Modeli'nin uygulanabilirliği PESTEL analizi ile çok boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Tablo 3'te Uzay Modeli'nin politik, ekonomik, sosyal, teknolojik, çevresel ve yasal açılardan değerlendirilmesi gösterilmektedir. Politik açıdan, tam izolasyon mimarisi ulusal sağlık politikalarındaki güvenlik öncelikleri ve İSG standartları ile uyumludur. Ekonomik olarak, ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da uzun vadede çalışan sağlığı kaynaklı tazminat ve iş gücü kayıplarını azaltarak tasarruf sağlamaktadır. Sosyal boyutta, temassız operasyon modeli çalışan güvenliğini ve motivasyonunu artırırken, teknolojik açıdan uzay ve savunma sanayi teknolojilerinin (otonom sistemler, robotik kontrol) sağlık alanına entegrasyonunu sağlamaktadır. Çevresel olarak, çok katmanlı zırh sistemi radyasyon ve elektromanyetik kirliliği minimize etmekte, yasal çerçevede ise risk eliminasyonu yaklaşımı İSG mevzuatındaki riskin kaynağında yok edilmesi ilkesini eksiksiz karşılamaktadır.

**Tablo 3. Uzay Modeli için PESTEL analizi**

Boyut	Etki unsuru	Değerlendirme
P–Politik (Political)	Sağlık politikalarında güvenlik önceliği	Tam izolasyon mimarisi, ulusal İSG standartlarına uyum sağlar.
E–Ekonomik (Economic)	Yatırım maliyeti ve işletme tasarrufu	İlk yatırım yüksek olsa da uzun vadede maruziyet kaynaklı maliyetleri azaltır.
S–Sosyal (Social)	Çalışan güvenliği ve motivasyon	Temassız operasyon modeli çalışan memnuniyetini artırır.
T–Teknolojik (Technological)	Otonom sistemler, robotik kontrol	Uzay teknolojilerinin sağlık alanına uyarlanabilirliği yüksektir.
E–Çevresel (Environmental)	Radyasyon sızıntısı, elektromanyetik kirlilik	Çok katmanlı zırh sistemi çevresel etkileri minimize eder.
L–Yasal (Legal)	İSG mevzuatı ile uyum	Risk eliminasyonu, yönetmeliklerdeki “minimum risk” ilkesini eksiksiz karşılar.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, tıbbi görüntüleme ünitelerinde çalışan sağlığını korumak amacıyla geliştirilen Uzay Modeli'nin, geleneksel mimariye kıyasla üstün güvenlik performansı sunduğunu ortaya koymuştur. Geleneksel mimari, risk yönetiminde yalnızca kontrol ve sınırlandırma basamaklarında kalırken; önerilen model, kaynağın izolasyonu, temasın kesilmesi, maruziyet mesafesinin artırılması ve kapalı sistem oluşturulması ilkelerinin tamamını aynı anda karşılamaktadır. Böylece İş Sağlığı ve Güvenliği hiyerarşisinin en üst basamağı olan eliminasyon ilkesi, mimari ve mühendislik çözümleriyle hayata geçirilmiştir.

Gelecek araştırmaların, önerilen modelin mühendislik prototiplerinin geliştirilmesi, robotik sistemlerin klinik senaryolara uyarlanması, ekonomik fizibilite analizleri ve sağlık hizmetlerinde operasyonel verimlilik üzerine etkilerinin incelenmesi yönünde ilerlemesi önerilmektedir. Bu çalışma, gelecekte tamamen otonom ve risksiz görüntüleme merkezlerinin kullanılmasına yönelik bilimsel temelleri sunmaktadır.

### Etik Kurul Onayı

Bu çalışma klinik veri, insan veya hayvan katılımı ile deneysel ölçüm içermediğinden ve tamamen kuramsal mimari tasarım niteliğinde olduğundan etik kurul onayı gerektirmemektedir.

### Finansal Destek

Bu çalışmada araştırmacılar, yazarlık ve/veya yayın süreçleri için herhangi bir kurum veya kuruluştan finansal destek almamışlardır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu makalenin araştırma, yazarlık ve/veya yayınlanması ile ilgili herhangi bir potansiyel çıkar çatışması bulunmadığını beyan ederler.

### Teşekkür

Bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesi aşamalarında, sonsuz sabır, anlayış ve fedakârlık göstermeleri nedenleriyle ailelerimize teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

1. ICRP. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103). 2007. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
2. Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography—An increasing source of radiation exposure. *New England Journal of Medicine*. 2007;357(22):2277–2284. <https://doi.org/10.1056/NEJMra072149>
3. McJury M, Shellock FG. Auditory noise associated with MR procedures: A review. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2000;12(1):37–45.
4. Vieira ER, Kumar S. Working postures: A literature review. *Journal of Occupational Rehabilitation*. 2004;14(2):143–158.
5. Berrington de González A, Darby S. Risk of cancer from diagnostic X-rays: Estimates for the UK and 14 other countries. *The Lancet*. 2004;363(9406):345–351. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(04\)15433-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(04)15433-0)
6. Osei E, Nuru F, Moore MJ. Assessment of occupational radiation doses of medical radiation workers in two community hospitals. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020;192(1):41–55. <https://doi.org/10.1093/RPD/NCAA190>

7. Miller DL, Balter S, Schueler BA, Wagner LK, Strauss KJ, Vañó E. Clinical radiation management for fluoroscopically guided interventional procedures. *Radiology*. 2010;257(2):321-332. <https://doi.org/10.1148/radiol.10091269>
8. Willis CE, Slovis TL. The ALARA concept in pediatric radiology. *Pediatric Radiology*. 2004;34(S3):S192–S197. <https://doi.org/10.1007/s00247-004-1264-y>
9. Pandey BR. Rethinking occupational health and safety principles—a systems perspective. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. 2025;55(6):1362-1383. <https://doi.org/10.1080/03036758.2024.2333555>
10. Zalk DM, Nelson DI. History and evaluation of control banding: A review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2008;5(5):330–346. <https://doi.org/10.1080/15459620801997916>
11. Schenck JF. Safety of strong, static magnetic fields. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2003;19(1):1–7. <https://doi.org/10.1002/jmri.10220>
12. Ravicz ME, Melcher JR, Kiang NYS. Acoustic noise during functional magnetic resonance imaging. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000;108(4):1683-1696. <https://doi.org/10.1121/1.1310190>
13. Manuele FA. Reviewing Heinrich. *Professional Safety*. 2011;56(10):52-61. <https://www.jstor.org/stable/48691159>
14. Schulte PA, Rinehart R, Okun A, Geraci CL, Heidel DS. National Prevention through Design (PtD) initiative. *Journal of Safety Research*. 2008;39(2):115–121. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.02.021>
15. Manuele FA. *Advanced safety management: Focusing on Z10 and serious injury prevention*. USA: John Wiley Publication; 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118840900>
16. Soyal H, Ortabağ T, Hasde M. Ionizing radiation safety perception of hospital radiation exposed workers. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2024;10(4):1111-1119. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.452>
17. Elshami W, Erdemir RU, Abuzaid MM, Cavli B, Issa B, Tekin HO. Occupational radiation dose assessment for nuclear medicine workers in Turkey: A comprehensive investigation. *Journal of King Saud University-Science*. 2022;34(4):102005.
18. Ozturk, D., Sahin, Y., & Meletlioglu, E. (2023). Changes in some hematological parameters in radiology unit workers during the Covid-19 pandemic: Retrospective study. *International Journal of Radiation Research*, 21(3). <https://doi.org/10.52547/ijrr.21.3.32>
19. Keskin A, Aci R, Arı M. The effect of ionizing radiation on health professionals working in the radiology department. *Aurum Journal of Health Sciences*. 2023;5(3):129-134. <https://izlik.org/JA52SU33FH>
20. Inaba Y, Hitachi S, Watanuki M, Chida K. Occupational radiation dose to eye lenses in CT-guided interventions using MDCT-fluoroscopy. *Diagnostics*. 2021;11(4):646. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11040646>
21. Otomo K, Inaba Y, Abe K, Onodera M, Suzuki T, Sota M, Haga Y, Suzuki M, Zuguchi M, Chida K. Spatial scattering radiation to the radiological technologist during medical mobile radiography. *Bioengineering*. 2023;10(2):259. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10020259>
22. Dorman T, Drever B, Plumridge S, Gregory K, Cooper M, Roderick A, Arruzza E. Radiation dose to staff from medical X-ray scatter in the orthopaedic theatre. *European Journal of Orthopaedic Surgery Traumatology*. 2023;33(7):3059–3065. <https://doi.org/10.1007/s00590-023-03538-6>
23. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) 2000 Report to the General Assembly. New York; 2000. <https://doi.org/10.18356/136a8613-en>
24. Akan CA, Gümüş H, Akan H. Radiation exposure of patients and staff working in angiography and interventional radiology unit. *Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 2020;37(1):1-4. <https://izlik.org/JA83TB94ZD>

25. Jaschke W, Schmuth M, Trianni A, Bartal G. Radiation-induced skin injuries to patients: What the interventional radiologist needs to know. *Cardiovascular and Interventional Radiology*. 2017;40(8):1131–1140. <https://doi.org/10.1007/s00270-017-1674-5>
26. Mittendorff L, Young A, Sim J. A narrative review of current and emerging MRI safety issues: What every MRI technologist (radiographer) needs to know. *Journal of medical radiation sciences*. 2022;69(2):250-260. <https://doi.org/10.1002/jmrs.546>
27. Stafford RJ. The physics of magnetic resonance imaging safety. *Magnetic Resonance Imaging Clinics*. 2020;28(4):517-536.
28. Shah A, Aran S. A review of magnetic resonance (MR) safety: the essentials to patient safety. *Cureus*. 2023;15(10):e47345. <https://doi.org/10.7759/cureus.47345>
29. Akbar AF, Sayyid ZN, Roberts DC, Hua J, Paez A, Cao D, Lauer AM, Ward BK. Acoustic Noise Levels in High-field Magnetic Resonance Imaging Scanners. *OTO open*. 2023;7(3):e79. <https://doi.org/10.1002/oto2.79>
30. Glans A, Wilén J, Hansson B, Audulv Å, Lindgren L. Managing acoustic noise within MRI: a qualitative interview study among Swedish radiographers. *Radiography*. 2024;30(3):889-895. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2024.04.002>
31. Bahaloo M, Davari MH, Sobhan M, Mirmohammadi SJ, Jalalian MT, Zare Sakhvidi MJ, Mehrparvar AH. Hearing thresholds changes after MRI 1.5 T of head and neck. *Radiology research and practice*. 2019;2019(1):8756579. <https://doi.org/10.1155/2019/8756579>
32. Charney W, Hudson A. Back injury among healthcare workers: Causes, solutions, and impacts. CRC Press; 2003.
33. Alelyani M, Gameraddin M, Khushayl AMA, Altowaijri AM, Qashqari MI, Alzahrani FAA, Gareeballah A. Work-related musculoskeletal symptoms among Saudi radiologists: a cross-sectional multi-centre study. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2023;24(1):468. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06596-3>
34. Alomairy NA. Assessment of secondary radiation dose in radiology departments. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2023;16(4):100726. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100726>
35. Joseph DS, Ibeanu IG, Zakari YI, Joseph DZ. radiographic room design and layout for radiation protection in some radio-diagnostic facilities in katsina state, nigeria. *J Assoc Rad Niger*. 2017;31(1):16-23. <https://doi.org/10.82547/jrrs.vol31no1.87>
36. Fennell S, Howett D, Ryan T, Hone C, Kenny T, Cunningham N, Malone J, O'Reilly G, O'Connor U, Gallagher A, Sheahan N. The Design of Diagnostic Medical Facilities where Ionising Radiation is used. Technical Report, Ireland; 2009. <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/21349909>
37. Sutton DG, Martin CJ. Diagnostic radiology—Facility. *Practical Radiation Protection in Healthcare*. Oxford University Press; 2014. <https://doi.org/10.1118/1.1569272>
38. Saidu A, Abubakar A, Sokoto BH, Umar M, Abubakar U, Usman F, Bello G. Optimization of shielding barriers for feasible exposure to medical X-ray radiation. *Caliphate Journal of Science and Technology*. 2023;5(3):280-287. <https://dx.doi.org/10.4314/cajost.v5i3.5>
39. Ismail S, Che Ibrahim CKI, Belayutham S, Mat Isa CM, Cheung C, Manu P. Prevention through Design (PtD) educational elements in engineering, architectural and construction domain: A review. *European Journal of Engineering Education*. 2024;49(6):1265–1287. <https://doi.org/10.1080/03043797.2024.2401068>
40. Samsudin NS, Khalil N, Mohammad MZ, Md Ajis A, Hamzah H, Che Ibrahim CKI, Manu P. An ontology to represent the prevention through design (PtD) concept in integrated project delivery (IPD) in the construction industry from an architectural perspective. *Buildings*. 2023;13(5):1128. <https://doi.org/10.3390/buildings13051128>

41. İSG. 6331 Sayılı İş Sağlığı Güvenliği Kanunu, Resmî Gazete Sayısı: 28339. 2012.
42. IAEA International Atomic Energy Agency. Applying radiation safety standards in diagnostic radiology and interventional procedures using x rays. World Health Organization (WHO), Safety Reports Series No. 39; 2006. <https://inis.iaea.org/records/fl65n-c9q55>
43. Behm M. Linking construction fatalities to the design for construction safety concept. Safety Science. 2005;43(8):589–611. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.04.002>
44. Cleary K, Nguyen C. State of the art in surgical robotics: clinical applications and technology challenges. Computer Aided Surgery. 2001;6(6):312-328. <https://doi.org/10.3109/10929080109146301>
45. Yang GZ, Cambias J, Cleary K, Daimler E, Drake J, Dupont PE, Taylor RH. Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. Science robotics. 2017;2(4):eaam8638. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aam8638>
46. Haslam RA, Hide SA, Gibb AG, Gyi DE, Pavitt T, Atkinson S, Duff AR. Contributing factors in construction accidents. Applied Ergonomics. 2005;36(4):401-415. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.12.002>
47. Kaya K, Mansur F. Fiziksel Risk Faktörlerinin Tıbbi Görüntüleme Ünitelerindeki Sağlık Çalışanları Tarafından Risk Durumuna Göre Önceliklendirilmesi. İşletme Araştırmaları Dergisi. 2024;16(3):2028–2042. <https://www.cceol.com/search/article-detail?id=1344638>
48. Avcı A, Aslan Y. Görüntüleme Hizmetleri Risk Değerlendirmesi: 5x5 Matris Yöntemi. Sağlık Hizmetlerinde Kuram ve Uygulama Dergisi. 2024;4(2):117–135. [https://www.shkud.org/wp-content/uploads/2024/12/TR\\_C4\\_S2\\_4.pdf](https://www.shkud.org/wp-content/uploads/2024/12/TR_C4_S2_4.pdf)
49. Ağuş M, Akbel E. Sağlık Çalışanlarında Fiziksel Risk Etmenlerinin Değerlendirilmesi. OHS Academy İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi. 2020;3(3):230–237. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.782772>