

Binalarda Radyasyon Zırhlamasına Yönelik Tasarım: Lineer Hızlandırıcı Mekânları İçin Öneriler

Seval Yeşim BAŞ^{*1}, Semra ARSLAN SELÇUK²

¹ Ticaret Bakanlığı, 06800, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

(Alınış / Received: 16.03.2021, Kabul / Accepted: 27.05.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 25.04.2023)

Anahtar Kelimeler

Radyasyondan Korunma
Radyasyon Zırhlaması
Lineer Hızlandırıcı
Mimari Tasarım

Öz: Lineer hızlandırıcı cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekânların radyasyon zırhlaması bağlamında doğru ve etkin şekilde tasarımı, radyasyonun insan sağlığına olan zararlarından korunabilmek için son derece önemlidir. Bu çalışmada, söz konusu mekânların radyasyon zırhlamasına yönelik mimari tasarım unsurlarının "mekânsal tasarım, yapı malzemeleri ve detaylar" bağlamında incelenmesi amaçlanmıştır. Araştırma kapsamında; ilgili mekanların tasarımı için söz konusu faktörlerin bütünlük olarak dikkate alınıp değerlendirilmesi gerektiği görülmüştür. Tasarım sürecinde ekonomik olarak çözülebilecek yapısal sistemlerle, yüksek zırhlama potansiyelini bir araya getirebilen seçeneklerin tercih edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda, yüksek enerjili radyasyon üreten LINAC cihazının yer aldığı mekânların mimari tasarım sürecinde; radyasyondan korunmaya yönelik önlemler ile optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretebilmenin mümkün olabileceği gösterilmiştir.

Design for Radiation Shielding in Buildings: Recommendations for Linear Accelerator Spaces

Keywords

Radiation Protection
Radiation Shielding
Linear Accelerator
Architectural Design

Abstract: The correct and effective design of the spaces where radiotherapy applications are made with the linear accelerator device in the context of radiation shielding is extremely important to be protected from the harms of radiation to human health. In this study, it is aimed to examine the architectural design elements for radiation shielding of the spaces in the context of "spatial design, building materials and details". In the scope of the research, it has been seen that these factors should be considered and evaluated in an integrated manner for the design of the relevant spaces. It has been concluded that the options combining the high shielding potential with the structural systems which can be solved economically should be preferred in the design process. In this context, in the architectural design process of the spaces where the LINAC device producing high-energy radiation is located; It has been shown that it is possible to produce designs within the framework of optimal and shielding integrity with measures for radiation protection.

1. Giriş

Bilim ve teknolojinin yüksek bir hızla geliştiği günümüzde, tıp ve endüstri başta olmak üzere tarım, araştırma ve eğitim uygulamaları, enerji üretimi gibi birçok alanda radyasyon uygulamalarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Doğal kaynaklardan maruz kalınan radyasyona ek olarak, gün geçtikçe daha da

artan bir hızda yapay kaynaklardan da radyasyona maruz kalınmakta, gerekli tedbirler alınmadığı takdirde ise insan sağlığını ciddi ölçüde tehdit edecek durumlar ortaya çıkabilmektedir. İyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerine karşı gereken önlemlerin alınması, radyasyonla çalışanların, halkın ve çevrenin radyasyonun zararlı etkilerinden korunabilmesi ALARA (*As Low As Reasonably*

*İlgili yazar: syesimbash@hotmail.com

Achievable) ilkesi çerçevesinde; “mümkün olan en düşük dozun alınmasının başarılması” ile mümkün olabilmektedir [1].

Amacı, maruz kalınan radyasyon dozunu izin verilen değerler çerçevesinde sınırlamak olan radyasyondan korunmada [2] “zaman”, “mesafe” ve “zırhlama” olarak üç temel kural önemli yer tutar. Bu kapsamda; radyasyon kaynağı ile kişi arasına koruyucu niteliğe sahip “engel” konularak, maruz kalınan radyasyon dozunu kabul edilen değerler çerçevesinde sınırlamak amacıyla uygulanan “zırhlama” radyasyondan korunma yöntemleri kapsamında önemli bir yere sahiptir [3].

Binalarda radyasyon zırhlaması farklı enerji aralığında farklı radyasyon uygulamaları için yapılmaktadır. Tıbbi uygulamalar kapsamında radyasyonun yaygın şekilde kullanıldığı alanlardan biri olarak radyoterapi ise; dünya genelinde sayısı gün geçtikçe artan kanser hastalarının yaklaşık yarısı için tedavi sürecinde başvurulmuş [4], tümörün bulunduğu veya riskli olan bölgeye yüksek enerjili radyasyon verilerek, sağlıklı hücrelere ise olabildiğince zarar verilmeden kanserli hücrelerin tahrip edilmesinin amaçlandığı, yüksek teknoloji ve bilgisayar destekli cihazların kullanıldığı tedavi yöntemidir [5]. Kanser hastalıklarının artmasıyla birlikte radyoterapi uygulamalarına olan ihtiyaç da gün geçtikçe artmakta, bu ihtiyacı karşılayacak yapı gereksinimi de aynı paralellikte artış göstermektedir. Bununla birlikte, teknolojinin gelişmesiyle tasarım süreçleri de karmaşık hale gelmekte ve bu uygulamaların yapılacağı mekânların bütün ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte tasarlanması çeşitli unsurların bir arada değerlendirilmesini gerektirmektedir. Radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların tasarımı genel olarak; cihazın tipi, tedavinin türü, kullanılan özel ekipman gibi faktörlere bağlı olarak şekillenmekte [2] ve “radyasyondan korunma” söz konusu alanlar için önemli bir tasarım parametresini oluşturmaktadır. Radyasyondan korunma için uygulanan “radyasyon zırhlaması”na yönelik tasarım, ilgili disiplinler (mimar, inşaat mühendisi, makine mühendisi, elektrik mühendisi, radyasyondan korunma uzmanı vb.) arası koordinasyon çerçevesinde yürütülmeyi gerektirmektedir.

Radyoterapi uygulamalarında yaygın şekilde kullanılan cihazların başında gelen lineer hızlandırıcılar (*linear accelerator*- LINAC) yüksek enerjili X-ışını ve elektron demeti üretebilen cihazlardır [5]. Radyasyondan korunmanın önemli bir tasarım parametresi olduğu LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için, özellikle zırhlamanın çok yüksek maliyetli olduğu yüksek enerji aralığında dikkatli ve doğru planlama kayda değer tasarrufla sonuçlanabilmektedir. Bina inşaatı tamamlandıktan sonra yapılacak tadilat ve ilave imalatların yüksek maliyetli olması sebebiyle, yapısal zırhlamanın uygun şekilde tasarlanarak inşaat

sürecinde de doğru şekilde uygulanması önem teşkil etmektedir [2].

Bu araştırma kapsamında; LINAC cihazının kullanıldığı mekanların mimari tasarım sürecinde radyasyon zırhlamasına yönelik dikkat edilmesi gereken hususlar, konuyla ilgili öneme sahip bazı ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların radyoterapi uygulamaları ve radyasyondan korunma için yayımladıkları raporlar ve değerlendirmeler çerçevesinde ele alınmıştır. Nitel araştırma yönteminin kullanıldığı çalışma kapsamında “radyasyon” olarak “iyonlaştırıcı radyasyon” kastedilmiştir. Araştırmada; binalarda radyasyon zırhlamasına yönelik mimari tasarım unsurlarının mekânsal tasarım, yapı malzemeleri ve detaylar bağlamında incelenmesi ve konu ile ilgili çalışma yapan/yapacak olan mimarlar için bilgilendirici, yol gösterici, proje çalışmalarına ışık tutacak nitelikte bir çalışma üretilmesi amaçlanmıştır. “Lineer hızlandırıcı mekanlarının tasarım sürecinde; enerjiyi, mali, hammadde gibi kaynakları daha etkin ve verimli kullanmaya yönelik tasarım unsurları ve radyasyondan korunmaya yönelik önlemler ile optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretebilmek mümkündür” savı ile yola çıkılmış ve konunun tasarım parametreleri çerçevesinde doğru şekilde değerlendirmesine yönelik bir yaklaşım oluşturulması hedeflenmiştir. Ülkemizde sağlık yapıları kapsamındaki mekânların mimari tasarım kriterleriyle ilgili yapılmış çalışmalar literatürde bulunmakla birlikte, mimari tasarımın radyasyon zırhlaması bağlamında ele alındığı yeterli çalışma bulunmaması açısından da alan için önemli bir katkı olarak düşünülmüştür.

2. Materyal ve Metot

Binalarda radyasyon zırhlaması, farklı enerji aralığında farklı radyasyon uygulamaları için yapılmakta olup, araştırmayı sınırlandırmak amacıyla, radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım, yüksek enerjili radyasyon üreten LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar bağlamında ele alınmış, bu çerçevede ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların önerileri ve değerlendirmeleri doğrultusunda bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda temel olarak; Radyasyondan Korunma ve Radyasyon Ölçümleri Ulusal Konseyi (National Council on Radiation Protection and Measurements) (NCRP) tarafından yayımlanan “Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities” (NCRP Report No. 151) başlıklı yayın, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının (International Atomic Energy Agency) (IAEA) “Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities” (Safety Reports Series No. 47) ve “Radiotherapy Facilities: Master Planning and Concept Design Considerations” (IAEA Human Health Reports No. 10) başlıklı yayınları, Tıpta Fizik ve Mühendislik Enstitüsü (Institute of Physics and

Engineering in Medicine) (IPEM) tarafından yayımlanan “Design and Shielding of Radiotherapy Treatment Facilities” (IPEM Report 75) başlıklı yayın ve ülkemiz Sağlık Bakanlığının “LINAC (Doğrusal Hızlandırıcı)’nın Mimari ve Temel Altyapı Gereksinimleri” başlıklı yayını ile konu kapsamında ilgili değerlendirme ve güncel verilerin yer aldığı internet kaynaklarının da, çalışmayı tamamlamak için yeterli olacağı düşünülmüştür.

Makalede öncelikle radyasyondan korunma ve radyasyon zırhlaması ile ilgili bir arka plan çalışması oluşturulmuştur. Daha sonra belirtilen ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların öneri ve değerlendirmeleri mimari bir bakış açısıyla; mekânsal tasarım, malzemeler ve detaylar olarak farklı tasarım bileşenleri altında ele alınmış ve lineer hızlandırıcı mekânlarının mimari tasarım sürecinde değerlendirilmesi gereken radyasyon zırhlamasına yönelik hususlar ve detaylar ortaya konulmuştur.

3. Bulgular

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekânlar için mimari tasarım unsurları; mekânsal tasarım, yapı malzemeleri ve detaylar olarak farklı başlıklar altında değerlendirilmiştir.

3.1. Mekânsal Tasarım

Radyoterapi ünitesi ile ilgili yer seçimi mimari tasarım kapsamındaki önemli bir unsur olmakla birlikte, fonksiyonel ve strüktürel gerekliliklerin yanı sıra, operasyonel verimlilik, maliyet, esneklik kurgusu (gelecekte genişleme imkânı veya artan iş yükü vb.) gibi faktörler ışığında bir konumlandırma yapılmalıdır [2].

Radyasyondan korunmak için tasarımında kalın zırhlara gereksinim oluşan lineer hızlandırıcı mekânları için konumlandırma, zırh kalınlıklarını ve dolayısıyla bina maliyetini doğrudan etkileyen bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır [6]. Bu açıdan değerlendirildiğinde; dış duvarlara ilişkin zırhlama maliyetini en aza indirmek amacıyla söz konusu mekânların en ekonomik strateji olarak genellikle “yer altında” inşa edildiği söylenebilir. Ancak, bu durumda zırhlama maliyetindeki azalmanın kazı, su yalıtımı gibi altyapı giderlerinin yanı sıra, mekânlara sirkülasyonu sağlayacak inşaat alanının maliyetiyle de karşılaştırılarak bir maliyet analizi yapılması gerekir [2].

Esneklik kurgusu dâhilinde değerlendirildiğinde ise; yer altında bir konumlandırmada genişleme, kazı ve altyapıyla ilgili gereklilikler oluşturacağından gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçların ilk planlamada dikkate alınması gereklidir. Döşemenin zırhlama gerekliliğini ortadan kaldıran zemin katta yerleşim ise gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçlar doğrultusunda genişlemeye en ekonomik şekilde

imkân veren tasarımıdır. Söz konusu mekânları toprak zemin yerine başka bir mekân üstünde konumlandırmak ise, esneklik kurgusu açısından dezavantaj yaratmakla birlikte [2] döşeme için ayrı bir zırhlama gereksinimi oluşturmakta ve strüktürel anlamda da binaya ciddi yük getirmektedir [7].

Lineer hızlandırıcı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekânların tasarımı için önemli bir diğer husus; söz konusu mekânların diğer mekânlarla olan ilişkisinin meşgüliyet faktörleri gözetilerek doğru şekilde kurgulanması bağlamında bariyerlerin kalınlık gereksinimlerine ilişkin optimizasyondur. Örneğin; zırhlama yapılacak mekâna bitişik diğer mekânların koridor, mekanik tesisat odası gibi çok yoğun kullanıma sahip olmayan alanlar olarak planlanması, zırhlama gereksinimlerini azaltan etkili bir stratejidir [2]. Ünite tek katlı bir yapıda konumlanmışsa çatıya erişim kısıtlanırken, üst katta kullanılan başka mekânlar var ise yine, depo veya mekanik tesisat cihazları (Chiller cihazları, havalandırma cihazları gibi) için kullanılacak alanların tasarlanması zırhlama gereksinimleri açısından daha optimal bir çözüm yolu sunmaktadır [4]. Fonksiyonel gerekliliklerin izin verdiği ölçüde, cihaz yönünün yüksek meşgüliyetli alanlar dikkate alınarak belirlenmesi, daha fazla kalınlık gerektiren birincil bariyerlerin zırhlama gereksinimlerinin azaltılabilmesi açısından tasarımda göz önünde bulundurulması tavsiye edilen hususlardandır [6]. Söz konusu mekânların birincil bariyerlerinin tasarımı için ayrıca, gelecekte tekniklerin olası değişimlerinin meşgüliyet faktörünü ve/veya iş yükünü artırabileceğinin göz önünde bulundurulması önerilmektedir [2].

Yapıda zırhlama gerektiren birden çok LINAC odasının varlığında, zırh duvarlarının ortak kullanılmasını sağlamak amacıyla, mekânları birbirine bitişik şekilde tasarlamak, alandan tasarruf sağlanmasının yanı sıra, gereken zırh malzemesi miktarının azaltılması sonucunda da yapı maliyetinin optimize edilmesi açısından tercih edilmektedir [6]. Tüm cihazlar için ortak gerekliliklerden biri olan ve her cihaz için ayrı bir mekân olarak tasarlanması gereken kontrol alanı [6] ilgili personelin cihazı kontrol ettikleri, tedavi odası girişine yakın noktada konumlandırılması gereken [4] hasta ile görsel ve sesli iletişimin sağlandığı alandır. Radyasyon zırhını olabildiğince düşük kalınlıklarda tutabilmek ve ilgili personelin izin verilen sınırlar çerçevesinde doz alımını sağlamak amacıyla bu alanın ikincil bariyerin arkasında konumlandırılması tavsiye edilmektedir [2].

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekânlar için önemli bir tasarım kriteri; şaşırtma koridoru tasarlanması ya da alan kısıtlaması olan durumlarda zırhlanmış, ağır bir kapı (*direct-shielded door*) ile doğrudan erişim sağlanmasıdır [2]. Tablo 1 ile LINAC mekânları için farklı tasarım alternatifleri ve bu tasarımlara ilişkin değerlendirmeler sunulmuştur.

Tablo 1. LINAC mekânları tasarım alternatiflerine ilişkin değerlendirmeler (NCRP [2] ve IAEA [4] kaynaklarından faydalanılarak oluşturulmuştur)

Şaşırtma koridoru ile erişim	Ağır, zırhlanmış bir kapı ile doğrudan erişim
<p>-Şaşırtma koridorunun uzunluğu doğrultusunda kapının zırhlama gereksinimi azalır.</p> <p>-Kapının zırhlama gereksinimini önemli oranda azaltmasıyla daha ekonomik olan tasarımdır.</p> <p>-Mekanik ve elektrik tesisat elemanları için zırhlama bütünlüğü bozulmadan geçebilecekleri bir yol oluşturur.</p> <p>-Alan gereksinimini artırır.</p> <p>-Personel ve hastaların sirkülasyonu açısından zorluk yaratır.</p>	<p>-Alan kısıtlaması olan durumlar için uygun bir tasarımdır.</p> <p>-Hasta ve personelin sirkülasyonu nispeten kolaydır.</p> <p>-Kapı bitiştirdeki ikincil bariyerlerle aynı zırhlama gereksinimine sahiptir, özellikle yüksek enerjili cihazların kullanıldığı mekânlarda kapının ağırlığı ve maliyeti çok yüksektir.</p> <p>-Kapının ağırlığı sebebiyle manuel olarak hareket ettirmek zordur, acil durumlar için gerekli güvenlik tedbirleri alınmalıdır.</p> <p>-Tasarımı özel hususların dikkatle değerlendirilmesini gerektirir, kapı çevresinden radyasyon sızıntısı olmaması için gereken önlemler alınmalıdır.</p>
 <p>[7]</p>	 <p>[7]</p>

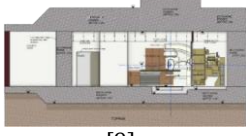
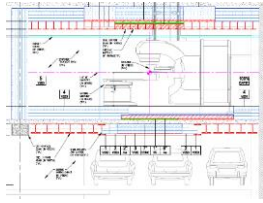
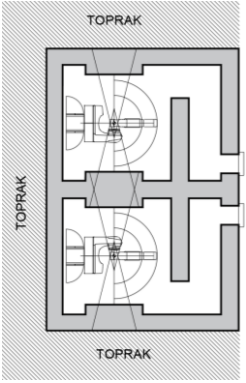
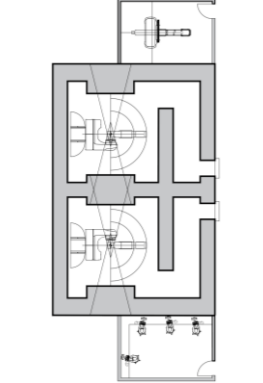
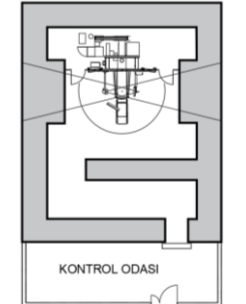
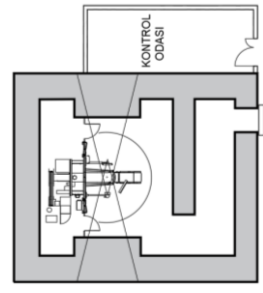
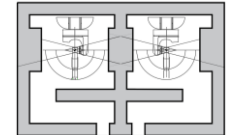
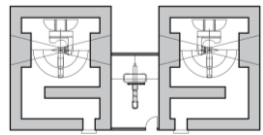
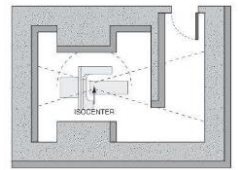
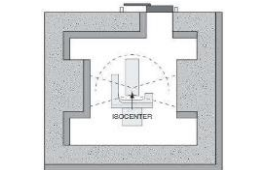
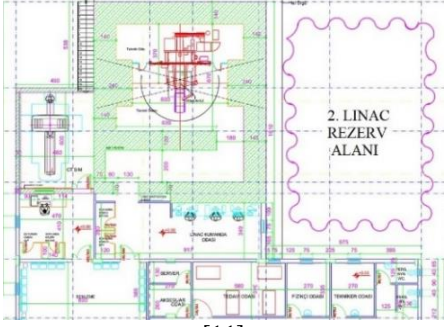
IAEA'e göre; şaşırtma koridoru bulunan mekânlarda kapı zırhlaması ile ilgili gereksinimi azaltmak için; şaşırtma koridorunun uzunluğunu artırmak, koridorun iç açıklık alanını azaltmak, koridora büküm eklemek gibi alternatifler değerlendirilebilir. Bununla birlikte, şaşırtma koridorunun yeterli uzunlukta olduğu veya yeterli büküme sahip olduğu durumlarda zırhlanmış bir kapıya gereksinim ortadan kalkabilse de yine de, özellikle tedavi esnasında girişin kontrol altında tutulabilmesi için kapı gibi fiziki bir engel ve/veya hareket detektörleri gibi güvenlik tedbirlerine başvurulmalıdır [4].

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekânlar, radyasyon ışınının merkezi izomerkez olarak adlandırılan noktadan geçecek şekilde tasarlanır ve izomerkezin mekandaki konumu, tüm tasarım için bir referans noktası oluşturmaktadır [8]. Söz konusu mekânlar; kullanımla ilgili bütün ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte, elektrik ve mekanikle ilgili gereklilikler ve üretici firmaya bağlı gereksinimler çerçevesinde yeterli mekân boyutlarını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır [4].

LINAC mekânlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları bağlamında örnek tasarımlar üzerinden yapılan değerlendirmeler Tablo 2'de yer almaktadır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, gerek radyasyondan korunma gereklilikleri çerçevesinde, gerekse de tasarımı malzeme ve maliyet bağlamında optimize etmeye yönelik çeşitli faktörler, mekânsal tasarım kapsamında dikkat edilmesi gereken unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Söz konusu mekânların tasarımını söz konusu bağlamda şekillendiren unsurlardan bir diğeri ise zırhlama için kullanılacak yapı malzemeleridir.

Tablo 2. LINAC mekânlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları için bir değerlendirme

	Tavsiye edilen	Tavsiye edilmeyen	Açıklama
Toprak zemin üstünde konumlandırma	 [9]	 [7]	Mekânı toprak zemin yerine başka bir mekân üstünde konumlandırmak, zemin için de zırhlama gereksinimi oluşturmasının yanı sıra binaya strüktürel anlamda da ciddi yük getirmesi sebebiyle tavsiye edilmemektedir.
Yer altında konumlandırma			Yer altında konumlandırma yapılarak, bireylerin zırh duvarlarıyla doğrudan temasının engellenmesinin yanı sıra, toprağın, zırh kalınlıklarını ilgili faktörlere göre azaltabilen bir malzeme olarak kullanılması tercih edilmektedir. Zemin katta konumlandırma yapılmışsa yeterli mesafeden bir bölücü elemanla çevrilip birincil bariyerlerle doğrudan temasın engellenmesi önerilmektedir. LINAC odaları yanında meşguliyet faktörü yüksek alanlar tasarlanması ise zırhlama gereksinimini artırmasının yanı sıra, personel ve halkın alacağı radyasyon dozunun belli değerlerde tutulması bağlamında risk oluşturmaktadır.
Kontrol odasının ikincil bariyer arkasında tasarlanması			Gerek zırhlama gereksiniminin azaltılabilmesi, gerekse kontrol odasında çalışan personelin alacağı radyasyon dozunun izin verilen değerler çerçevesinde sınırlandırılabilmesi için kontrol odasının birincil bariyer yerine ikincil bariyer arkasında tasarlanması tavsiye edilmektedir.
Mekânların birbirine bitişik tasarlanması			Zırh duvarlarının ortak kullanımını sağlamak amacıyla mekânların birbirine bitişik olarak tasarlanması önerilmektedir.
Mekânda şaşırtma koridoru tasarlanması	 [10]	 [10]	Mekân girişine ulaşan ikincil radyasyon miktarı ve kapının zırhlama gereksiniminin azaltılabilmesi için mekânın şaşırtma koridoru ile tasarlanması önerilmektedir.
Konumlandırma esneklik	 [11]		Zemin katta konumlandırılan mekânlarda, gelecekte yapılması planlanan ikinci bir LINAC odası için, daha düşük zırh kalınlığına ihtiyaç duyularak, mevcut zırh duvarının ortak kullanılabilmesi amacıyla, rezerv alanının zırhlanmış mekânın bitişiğinde oluşturulması önerilmektedir.

3.2. Yapı Malzemeleri

Radyasyon zırhlaması yapılacak alanlarda malzeme seçimi tasarım için önemli bir unsur olup, zırh malzemelerinin etkin ve verimli kullanımı ve optimum tasarım stratejilerinin geliştirilmesi ilgili disiplinler arası bir iletişim ve işbirliği gerektirmektedir [2].

Radyasyon zırhlaması için kullanılacak malzemeler; malzemenin kimyasal bileşimi ve radyasyon zayıflatma katsayısı ile radyasyonun enerjisi ve türü gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmektedir [12]. Zırhlama için uygun malzemeyi seçerek doğru tasarım yapmak ve ayrıca zırhın mekanik bütünlüğü ile çatlaklara, korozyona ve aşınmaya karşı direncini sağlamak radyasyon zırhının sahip olması gereken niteliklerdendir [13].

Hem foton hem de nötron zırhlamasının dikkate alınmasının gerektiği yüksek enerjili hızlandırıcıların kullanıldığı mekânlar için yapı malzemesi bağlamında bir değerlendirme yapıldığında; nötron zırhlamasının hidrojen içerikli malzemeler gerektirirken, X-ışını demetlerinin ise, kütle ve yüksek atom numarasına ihtiyaç duyduğu söylenebilir. Normal beton, ağır beton, kurşun, çelik, polietilen, parafin, toprak gibi malzemeler LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekânlarda farklı şekillerde zırhlama için kullanılan malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır [2].

Kurşuna göre kıyaslandığında, zırhlama için daha az etkili bir malzeme olmasına karşın beton [14], nispeten yüksek hidrojen içeriğiyle özellikle nötronların ortaya çıktığı yüksek enerjili (>10 MV) radyasyon uygulamalarının yapıldığı mekânlarda sıklıkla kullanılan bir malzemedir [4]. Beton, hem X-ışınları hem de nötronlar için zırhlama özelliğinin yanı sıra, iyi yapısal özelliklere sahip ve yaygın kullanımından dolayı nispeten ekonomik bir malzemedir. Betonu söz konusu mekânlarda kullanmanın düşük maliyetli olmasının bir sebebi de duvar ve döşeme elemanlarının fazla detay içermemelerinden dolayı kalıp maliyetinin nispeten düşük olmasıdır [2]. Çok kalın beton zırh elemanları gerektirebilen LINAC odalarının yapım aşamasında dikkat edilmesi gereken çeşitli hususlar bulunmakla

birlikte; radyasyon sızıntısına sebep olabilecek boşluk, çatlak gibi istenmeyen durumların betonda oluşmaması önemlidir.

Bir sağlık yapısında LINAC cihazı ile tedavi yapılan mekânların zırhlanması için ayrılması gereken alan düşünüldüğünde, zırh tasarımı bağlamında çok kalın olabilen duvar kalınlıklarının optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır [15]. Normal beton kullanılarak gereksinim dâhilinde inşa edilen kalın duvarlarla yeterli radyasyon koruması sağlanabilirken, özellikle alan sıkıntısı olan, radyasyonun yoğunluğu ve enerjisinin yüksek olduğu ve bu sebeple duvar kalınlığı ile ilgili gereksinimin fazla olduğu durumlarda, zırhlama için ağır beton alternatif bir çözüm sunmaktadır [16]. Fotonların zayıflatılması için beton yoğunluğunun, bileşimine yüksek yoğunluklu çeşitli agregalar (barit, hematit, manyetit, limonit vb.) eklenerek artırıldığı ağır beton; alan kısıtlaması olan durumlarda duvar kalınlıklarını azaltmak amacıyla tercih edilebilen uygun malzemelerden birisidir. Ülkemizde de erişim imkânı bulunan barit agregası kullanılarak üretilen ağır betonlarda malzeme yoğunluğu ile radyasyon zırhlama özelliği aynı doğrultuda artmaktadır. Kılınçarslan vd.'e (2011) göre; barit agregalı ağır betonlar kullanılarak normal betona kıyasla daha ince kesitli zırh duvarları elde edilmesi, doğal malzemelerden ve enerjiden tasarruf edilmesini sağlayarak daha sağlıklı ve ekolojik yapıların ortaya çıkması yönüyle de avantaj sağlamaktadır [12].

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mahallerde kullanılabilecek yapı malzemeleri için genel bir değerlendirme Tablo 3 ile sunulmuştur.

Yukarıda da belirtildiği gibi, uygun zırh malzemesi seçimi çeşitli faktörler çerçevesinde değerlendirilmek suretiyle tasarıma etki eden faktörlerdendir. LINAC mekânlarında radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları kapsamında değerlendirilmesi gereken önemli hususlardan bir diğeri de radyasyonun zararlı etkilerinden korunabilmek için tasarımında özel dikkat gerektiren yapı elemanlarına ilişkin detaylardır.

Tablo 3. LINAC mekânlarının yapımında zırhlama için kullanılan malzemeler için bir değerlendirme (NCRP [2] ve IAEA [4] kaynaklarından faydalanılarak oluşturulmuştur)

Malzeme-Özellik	Avantaj	Dezavantaj
<p>Normal beton</p> <p>-Zırh malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. -Zırhlama için minimum 2,35 g/cm³ yoğunlukta beton kullanılmaktadır.</p>	<p>-Hem X ışınları hem de nötronların zırhlaması için kullanımı uygun bir malzemedir. -Üstün yapısal özelliklere sahiptir. -Genellikle en ucuz zırh malzemesidir. -Üretim ve uygulaması kolaydır.</p>	<p>-Malzemenin yoğunluğu sebebiyle yeterli korumayı sağlayabilmek için gereksinim duyulan zırh kalınlıkları fazladır, kalın duvarlar yapıda alan kaybına yol açar. -Yoğunluk kontrolü ve boşluk, çatlak oluşumu gibi unsurlar için uygulama esnasında özel dikkat gerektirir.</p>
<p>Ağır beton</p> <p>-Özgül ağırlığı yüksek farklı agrega bileşenleri ile üretilebilir. Barit, ağır beton üretimi için sıklıkla tercih edilen agregadır.</p>	<p>-Hem X ışınları hem de nötronların zırhlaması için kullanımı uygun bir malzemedir. -Yoğunluk değeri arttıkça X ışınlarını zırhlama özelliği de aynı doğrultuda artar. -Normal betona kıyasla daha az malzeme kullanımıyla zırhlama gereksinimi karşılanabilir. -Daha ince zırh kalınlıkları alan kısıtlaması olan durumlar için avantaj sağlar.</p>	<p>-Homojenliğin sağlanması normal betona göre daha zordur [18]. -Normal betona göre maliyeti yüksektir ve nakliyatı zordur. -Yoğunluk kontrolü ve boşluk, çatlak oluşumu gibi unsurlar için uygulama esnasında özel dikkat gerektirir. -Genel olarak malzemeyi uygulama tecrübesi azdır.</p>
<p>Beton blok</p> <p>-Farklı yoğunluklarda üretim imkânı bulunmaktadır.</p>	<p>-Modüler uygulama imkânı sağlar. -Yüksek yoğunluklu bloklar, alan kısıtlaması olan durumlar için uygundur. -Nispeten kolay (uygulamada kalıp gerektirmez, minimum donatı) ve hızlı (hava şartlarından etkilenmez, kürlenme gereksinimi yoktur) uygulama sürecine imkân verir [17].</p>	<p>-Zırhlama bütünlüğünün korunabilmesi için özel önlemler alınması gerekir (derzlerin yatayda ve düşeyde şaşırtmalı olarak uygulanması, harçlı uygulamalarda malzemeyle aynı yoğunlukta harç kullanılması vb.). -Normal betona göre maliyeti yüksektir ve nakliyatı zordur.</p>
<p>Kurşun</p> <p>-Yüksek yoğunluğa (11,35 g/cm³) ve atom numarasına (82) sahiptir. -Farklı ebat ve kalınlıklarda ilave zırh malzemesi olarak ve kapılarda gereksinim dâhilinde kullanılmaktadır.</p>	<p>-Fotonları zırhlama özelliği çok yüksek bir malzemedir. -Üretimi kolaydır. -Yüksek işlenebilirlik özelliğine sahiptir.</p>	<p>-Nötronları zırhlamada etkili bir malzeme değildir, yüksek enerjili uygulamalarda özellikle, dikkatli kullanılması ve gerekli önlemlerin alınması gerekir. -Yumuşak bir malzemedir, uygulamada ikinci bir yapısal desteğe ihtiyaç duyar. -Toksisitesi yüksektir, kullanımı durumunda birtakım önlemlerin alınması gereklidir.</p>
<p>Çelik</p> <p>-Yoğunluğu (7,8 g/cm³) ve X ışınları için zırhlama özelliği kurşun ve beton arasında bir değere sahiptir. -Farklı ebat ve kalınlıklarda ilave zırh malzemesi olarak ve kapılarda gereksinim dâhilinde kullanılmaktadır.</p>	<p>-Alan kısıtlaması olan durumlarda kullanılabilen, fotonları zırhlamak için, kurşun kadar olmasa da, iyi bir zırh malzemesidir. -İyi bir yapısal malzemedir. -Kurşun gibi toksik bir malzeme değildir.</p>	<p>-Nötronları zırhlamada etkili bir malzeme değildir, özellikle yüksek enerjili uygulamalarda dikkatli kullanılması gerekir.</p>
<p>Polietilen ve parafin</p> <p>-Parafin ve polietilen aynı hidrojen yüzdesine (%14,3) sahip malzemelerdir. -Polietilen saf olarak veya ağırlıkça %5 bor içeriğiyle gereksinim doğrultusunda (özellikle kapılarda) yaygın olarak kullanılmaktadır.</p>	<p>-Polietilen nötronları zırhlama özelliği çok yüksek bir malzemedir. -Polietilen, üretimi kolay ve parafine göre daha sağlam bir malzemedir.</p>	<p>-Polietilen nispeten pahalı bir malzemedir. -Parafin yanıcı bir malzemedir, kalıcı zırhlar için kullanımı uygun değildir.</p>
<p>Toprak</p> <p>-Yer altında konumlandırılan mekânlar için kullanılabilir.</p>	<p>-İlgili faktörlere bağlı olarak zırh kalınlıklarının azaltılabildiğini sağlar (toprak malzemenin çok iyi şekilde sıkıştırılmasına ve mekânın yerin ne kadar altında olduğuna bağlıdır)</p>	<p>-Boşluk oranları ve bileşenleri bağlamında homojen yapıda olmadığı için iyi tanımlanabilir bir malzeme değildir.</p>

3.3. Detaylar

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi; duvar, döşeme (tavan ve zemin) ve kapı olmak üzere farklı yapı elemanları bağlamında doğru detayların tasarlanması ve uygulanması ile mümkün olabilmektedir. Disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde değerlendirme süreci gerektiren söz konusu mekânların tasarım sürecinde duvar ve döşeme detaylarına ilişkin dikkat edilmesi gereken genel hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kullanılacak ilave zırh malzemesi (kurşun, çelik gibi) kalınlığının yerine geçtiği zırh malzemesiyle eşdeğer zırhlama özelliğine sahip olması,
- Çeşitli amaçlar için kullanılan elektrik ve mekanik tesisat elemanlarının duvar ve döşeme elemanlarıyla keşiştiği noktalarda zırhlama bütünlüğünün bozulmamasına yönelik önlemlerin tasarım sürecinde değerlendirilmesi,
- Kapı ile elektrik ve mekanik tesisat elemanlarının birincil bariyerlerde değil, zırhlama gereksiniminin daha az olduğu ikincil bariyerlerde konumlandırılması/ikincil bariyerlerden geçirilmesi, kanalların her ne kadar küçük olursa olsun birincil bariyerlerden geçirilmemesi,
- Kanalların ortogonal olarak değil, belli bir açıyla veya dirsek yaparak mekân dışına geçirilmesi,
- Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme (*heating ventilating and air conditioning*-HVAC) gibi büyük kesit alanına sahip kanalların mekândan çıkışlarının şaşırtma koridoru sonundan, kapı üstünden ve olabildiğince yüksek bir noktadan yapılması [2],
- Kanaldan geçen radyasyon miktarını azaltmak için kanal kesitinin en/boy oranının yüksek olması [4] ve gereksinim dâhilinde ilave zırhlama yapılarak bu noktalarda radyasyondan korunmaya yönelik önlemlerin alınması.
- Zırhlama için kullanılacak farklı malzemelerin birleşim noktalarının zırhlamanın genel bütünlüğü bozulmayacak şekilde tasarlanıp uygulanması,
- Blok gibi malzemelerde harç kullanılması durumunda harcın zırh malzemesiyle en azından aynı yoğunluğa ve zırhlama kapasitesine sahip olması ve derzlerin çakışmayacak şekilde, şaşırtmalı olarak uygulanması,
- Zeminden giden elektrik ve mekanik tesisat elemanları için gereken önlemlerin alınması, zırhlama gereksinimleri doğrultusunda çapı 2,5 cm'den daha büyük elemanların, eksilen betonun telafisi için kurşunla sarılması [2],
- Büyük çaptaki kanalların içine yerleştirilen su ve elektrik borularının zırh duvarlarından geçmemeleri, mekândan çıkarken şaşırtma koridorunu takip etmeleri ya da zırh duvarlarının altında bir yol izlemeleri [4].

Ayrıca, LINAC mekânlarında havalandırma sistemiyle ilgili dikkat edilmesi gereken bir husus, radyasyon zırhlamasıyla doğrudan ilişkili olmamakla birlikte,

hızlandırıcı tarafından oluşturulan ozonun (O₃) yarattığı tehlike durumundan korunabilmek için ozon konsantrasyonunun belirli seviyelerin üzerine çıkmamasına ilişkindir [2]. Hava değişim oranının saatte minimum 10 kez olarak önerildiği söz konusu mekânlarda cihazın çalışmasıyla oluşan ozon ile iyonize gazların merkezi havalandırma sistemine karışmasının engellenmesi için ayrı bir sistem tasarımı yapılmalı, gereksinim doğrultusunda emiş menfezleri bu gazların tahliyesi için zemin seviyesine indirilmelidir. Tasarlanacak mekanik havalandırma sistemi ile tedavi odası içerisindeki atmosferin ısı şartlandırma, nem kontrolü ve oluşacak zehirli gazların tahliyesi bağlamında istenilen şartları sağlama amaçlanmaktadır [9].

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi için dikkat edilmesi gereken diğer yapı elemanı da "kapı"dır. Özellikle yüksek enerjili cihazların kullanıldığı mekânlar için kapı tasarımı, operasyonel verimlilikten ödün verilmeden, gereken radyasyon korumasının sağlanabilmesi amacıyla özel dikkat gerektiren bir konudur [2]. Gereksinim doğrultusunda uygun şekilde zırhlanmış ve interlock sisteme sahip tek bir kapının olması, ilave bir nötron kapısına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır [8].

Radyasyon zırhlamasına yönelik kapı tasarımına ilişkin hususlar genel olarak şu şekilde sıralanabilir:

- Kapılar genel olarak; boyut, zırhlama ve kurulum özellikleri çerçevesinde gereksinimler ve tercihler doğrultusunda özelleşmekte [19] ve kapı zırhlaması için malzeme ve kalınlıkları, ilgili faktörlerin tümünün değerlendirilerek zırhlama hesaplamalarına yansıtılması neticesinde belirlenmektedir.
- Yüksek enerjili (>10 MV) cihazların kullanıldığı mekânlarda fotonların yanı sıra nötronlar için de zırhlama gereksinimi ortaya çıkmakta olup, genel tasarım, borlu polietileni (BPE) (ağırlıkça %5 bor içeren) iki kurşun tabakası arasında sandviç yaparak kullanılmaktadır [4].
- Mekâna doğrudan erişim sağlayan kapılar (*direct-shielded door*) bitişikteki ikincil bariyerle aynı zırhlama gereksinimine sahip olma ve çok ağır olma özellikleriyle yüksek enerjili uygulamalarda özellikle çok yüksek maliyetlidir.
- Şaşırtma koridoru bulunan mekân tasarımlarında kapı zırhlaması; radyasyonun enerjisi, şaşırtma koridorunun tasarımı, haftalık iş yükü ve ışının yönü gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir [2]. Şaşırtma koridorunun uzunluğu kapıların zırhlama gereksinimi açısından önemli bir faktör olmakla birlikte, kısa şaşırtma koridoruna sahip hızlandırıcı odalarında kapı zırhlaması için daha kalın BPE ve kurşun gereksinimi ortaya çıkmaktadır [4].
- Kapılarda kurşun imalatı düzgün şekilde yapılmalı, kurşun ve çelik malzemeler gereken standartlara sahip olmalıdır.

- Kapı çevresinden radyasyon sızıntısının önlenmesine yönelik tedbirler tasarım sürecinde değerlendirilmelidir. Kayar kapıların kullanımında ikincil radyasyonlar için, kapı ve duvar arasında minimum boşluk kalarak yeterli örtüşme sağlayacak şekilde bir tasarım yapılmalıdır [20].

Zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi için tasarımları özel dikkat gerektiren yapı elemanlarına ilişkin detaylar ve değerlendirmeleri Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. LINAC mekânlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarımı kapsamında yapı elemanlarına ilişkin detaylar

LINAC mekânlarında yapı elemanlarına ilişkin detaylar		
<p>[2]</p>	<p>[2]</p>	<p>[2]</p>
<p>Kanalların duvardan geçişinin belli bir açıyla yapılması (radyasyon doğrultusunda en az miktarda beton kaybının sağlanması)</p>	<p>Kanallara duvardan geçiş noktasında dirsek yapılması (genellikle tercih edilen uygulama)</p>	<p>Şaşırtma koridoru olan mekânlarda büyük ebatlı kanallara (HVAC gibi) dirsek yapmak mümkün değilse kanalların kürşunla ve/veya BPE ile sarılması</p>
<p>[2]</p>	<p>[8]</p>	<p>[9]</p>
<p>Şaşırtma koridoru olan mekânlarda büyük ebatlı kanalların (HVAC gibi) geçişi için beton elemanlarla mini bir şaşırtma koridoru oluşturulması (maliyeti yüksek bir uygulama) (örtüşme derecesinin mümkün olduğunca büyük olması, istenilen sonuca ulaşabilmesi için gereklidir)</p>	<p>Dozimetri kabloları için kullanılan kanalların kontrol odası ile LINAC odası arasında, radyasyon demetinin doğrultusu ile hizalanmayacak şekilde, duvardan düşeyde ve yatayda belli bir açıyla geçirilmesi</p>	<p>Bağlantı kutuları veya lazer gibi elemanların duvar içine yerleştirilmesi durumunda eksilen betonu telafi edebilmek için, zırhlama bütünlüğü bozulmayacak şekilde çelik plakalarla takviye yapılması</p>
<p>[8]</p>	<p>[8]</p>	<p>[2]</p>
<p>Şaşırtma koridoru girişine ulaşan ikincil radyasyonu azaltmak için tasarlanan lentolarda, kanal ve lento boyutlarına bağlı olarak HVAC kanallarının lentodan uygun şekilde geçirilmesi</p>	<p>Şaşırtma koridoru olmayan mekânlarda, kapı altından radyasyon sızıntısının önlenmesi için çukur zemin tasarlanması</p>	<p>İlgili faktörler doğrultusunda uygulanabilecek konsept bir zırhlanmış kapı detayı</p>

4. Tartışma ve Sonuç

Günümüzde radyasyon uygulamalarının yapıldığı alanlar, mimari tasarımın hedef niteliklerinden; işlevsellik, biçimsellik gibi olguların yanı sıra, mekânın vücut bulma amacını oluşturan radyasyon cihazı/kaynağı için özel gereksinimler dâhilinde uygun çözümlerin mimari tasarım sürecinde değerlendirilmesini gerektiren alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, insan sağlığını ciddi ölçüde tehdit edebilen etkileri göz önüne alındığında “radyasyondan korunma” önemli bir tasarım parametresi olarak tasarım sürecine çeşitli unsurlar ile dâhil olmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için uygulanan radyasyon zırhlamasına yönelik unsurların doğru şekilde tasarlanması ve uygulanması, izin verilen sınırların üstünde doz alınımının engellenmesini ve dolayısıyla radyasyonun insan sağlığına olan olumsuz etkilerinden kaçınılabileceği sağlamaktadır.

Yüksek enerjili radyasyon üreten lineer hızlandırıcı cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için de radyasyon zırhlamasına yönelik unsurlar önemli tasarım bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Söz konusu mekânlar tasarım sürecinde, yapı içinde konumlandırmadan mekanik ve elektrik tesisat elemanlarına yönelik detaylara kadar birçok faktörün değerlendirildiği çerçevede bir kurgulanma gerektirmektedir. Tasarımın erken evrelerinden itibaren değerlendirilmesi gereken tasarım unsurları; mekânsal tasarım, malzemeler ve detaylar olarak farklı bileşenler ve bunlar altında pek çok alt bileşen kapsamında tasarım sürecine dâhil olmaktadır.

LINAC mekânları için radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurlarının ele alındığı bu araştırma kapsamında; problemin temelini anlaşıp, tasarımı optimize etmeye yönelik unsurların ilgili faktörler çerçevesinde dikkatli şekilde ele alınması ve ilgili disiplinler ile işbirliği ve iletişim çerçevesinde bir tasarım yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Minimum maliyette etkin bir radyasyon korumasının, her tasarım için ilgili faktörlerin bütünlük olarak dikkate alınıp değerlendirilmesiyle mümkün olabileceği, tasarım sürecinde ekonomiklik ve yapısal özellikleri, yüksek zırhlama potansiyeli ile bir araya getirebilen seçeneklerin tercih edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda, yüksek enerjili radyasyon üreten LINAC cihazının yer aldığı mekanların mimari tasarım sürecinde radyasyondan korunmaya yönelik önlemler ile optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretebilmenin mümkün olabileceği değerlendirilmiştir.

Ülkemizde, inşaat imalatları ve cihaz kurulumunun tamamlanmasının ardından yerinde yapılan kontroller, radyasyon güvenliğinin gereken şekilde sağlanmasıyla ilgili nihai sonucun verilebilmesi için esastır. Söz konusu denetimlerde zor ve maliyetli olan

inşaat tadilat süreçlerine yol açacak durumlarla karşılaşılması için, yeterli zırh kalınlıkları, uygun malzeme kullanımı ve zırhlama bütünlüğünün bozulmamasına yönelik önlemlerin tasarım ve uygulama sürecinde değerlendirilmesi ve ayrıca, beton yoğunluk değeri ve beton sınıfının gereken şartları sağlanmasına ilişkin kontrollerin yapılması, radyasyon sızıntısına sebep olabilecek boşluk ve çatlak gibi istenmeyen durumların malzemede oluşmaması için gereken özen ve dikkatin gösterilmesi önem teşkil etmektedir.

Diğer taraftan, zırh kalınlıklarını azaltmaya yönelik ağır beton gibi yapı malzemeleriyle ilgili araştırmaların ulusal alanda artırılıp, uygulamada da yaygın hale gelmesi için desteklenmesinin, çok yüksek olan maliyetler ve uzun tedarik süreleri gibi dezavantajları azaltacağı düşünülmektedir. Bu sayede, zırhlama gereksinimi fazla olan yüksek enerjili radyasyon uygulamalarının yapıldığı mekanlar için optimum tasarım stratejileri geliştirilebilmesine katkı sağlanacağı öngörülmektedir.

Bu makale, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Ana Bilim Dalı'nda Doç. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK danışmanlığında gerçekleştirilen “Binalarda Radyasyon Zırhlamasına Yönelik Yapısal Detayların Analizi: Lineer Hızlandırıcı Mekânları İçin Öneriler” adlı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Zeyrek, C. T. 2013. İyonize radyasyon uygulamaları için güvenlik ve korunmaya yönelik genel kavramlar. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(3), 1-9.
- [2] National Council on Radiation Protection and Measurements. 2005. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities. NCRP Report No. 151, USA, 246s.
- [3] Kumaş, A. 2009. Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği, 1. Baskı. Palme Yayıncılık, Ankara, 187s.
- [4] International Atomic Energy Agency. 2006. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. IAEA Safety Reports Series No.47, Austria, 129s.

- [5] Milli Eğitim Bakanlığı, 2012. Radyoterapi Uygulama Planı. http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Radyoterapi%20Uygulama%20Planı.pdf (Erişim Tarihi: 24.03.2019).
- [6] International Atomic Energy Agency. 2014. Radiotherapy Facilities: Master Planning and Concept Design Considerations. IAEA Human Health Reports No.10, Austria, 31s.
- [7] Johnston, S. 2013. The Science of Radiation Shielding. <https://network.aia.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=a0516f34-41dd-46af-980f-07487f132b75> (Erişim Tarihi: 25.03.2019).
- [8] Horton, P. W., Eaton, D. J. ed. 2017. Design and Shielding of Radiotherapy Treatment Facilities. IPEM Report 75, UK, 13-8s.
- [9] Alper M. ve Mühürçü, İ. ed. 2018. LINAC (Doğrusal Hızlandırıcı)'nın Mimari ve Temel Altyapı Gereksinimleri. Sağlık Bakanlığı. Ankara, 59s.
- [10] RPP. Neutron Shielding Door Options. <https://www.radiationproducts.com/neutron-doors.htm> (Erişim Tarihi: 26.03.2019).
- [11] Radmed. Architectural Project Planning. <http://www.radmedyapi.com.tr/eng/projelendirme/mimari-projelendirme/> (Erişim Tarihi: 10.11.2019).
- [12] Kılınçarslan Ş., Başıyigit, C., Molla T., Sancar S. 2011. Radyoaktif ışınlardan korunaklı ekolojik yapılar. Politeknik Dergisi, 14(2), 93-99.
- [13] Waly, E. S. A. and Bourham M. A. 2015. Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials. Annals of Nuclear Energy, 85, 306-310.
- [14] Akkurt, I. Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S. Basyigit, C. 2010. Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate. Annals of Nuclear Energy, 37, 910-914.
- [15] Kosako, K., Oishi, K., Nakamura, T. and Kiyonagi, Y. 2014. Optimum shielding structure for the wall of medical LINAC facility. Progress in Nuclear Science and Technology, 4, 276-279.
- [16] Shams, T., Eftekhar, M. and Shirani, A. 2018. Investigation of gamma radiation attenuation in heavy concrete shields containing hematite and barite aggregates in multi-layered and mixed forms. Construction and Building Materials, 182, 35-42.
- [17] Veritas. VeriShield Rooms vs. Concrete Vaults - Save Floor Space. <http://www.veritas-medicalsolutions.com/radiation-shielding-compare.html> (Erişim Tarihi: 26.03.2019).
- [18] Akgün, Y., Durmuş, A. ve Durmuş, A. 2007. Barit agregasıyla üretilen ağır bir betonun özellikleri. İMO Dergisi, 465-474.
- [19] Nelco. Radiation Shielding Swing Door. <https://www.nelcworldwide.com/medical-shielding-products/shielded-doors/guardian-swing-door/> (Erişim Tarihi: 26.03.2019).
- [20] Radkosis, 2019. Linak Kapı Çözümleri. <http://radkosis.com/linak-kapi-cozumleri/> (Erişim Tarihi: 26.03.2019).