



**BİNALARDA RADYASYON ZIRHLAMASINA YÖNELİK YAPISAL
DETAYLARIN ANALİZİ: LİNEER HIZLANDIRICI MEKANLARI İÇİN
ÖNERİLER**

Seval Yeşim BAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2019

Seval Yeşim BAŞ tarafından hazırlanan “BİNALARDA RADYASYON ZIRHLAMASINA YÖNELİK YAPISAL DETAYLARIN ANALİZİ: LİNEER HIZLANDIRICI MEKANLARI İÇİN ÖNERİLER” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Mimarlık Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK

Mimarlık Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Sare SAHİL

Mimarlık Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Gülsu ULUKAVAK HARPUTLUGİL

Mimarlık Ana Bilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 01/11/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Seval Yeşim BAŞ

01/11/2019

BİNALARDA RADYASYON ZIRHLAMASINA YÖNELİK YAPISAL DETAYLARIN ANALİZİ: LİNEER HIZLANDIRICI MEKANLARI İÇİN ÖNERİLER

(Yüksek Lisans Tezi)

Seval Yeşim BAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2019

ÖZET

Günümüzde, kullanımı giderek yaygınlaşan radyasyon uygulamalarından; tıp ve endüstri başta olmak üzere birçok alanda faydalanılmaktadır. Doğal radyasyon kaynaklarının yanı sıra bu uygulamalar çerçevesinde yapay kaynaklardan da radyasyona maruz kalınmakta ve gerekli tedbirler alınmadığı takdirde ise insan sağlığını ciddi ölçüde tehdit edecek durumlar ortaya çıkabilmektedir. Radyasyon kaynağı ile kişi arasında 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. Radyoterapi uygulamaları kapsamında kanser hastalarının tedavisi için yaygın olarak kullanılan lineer hızlandırıcılar yüksek enerjili X-ışını ve elektron demeti üretebilen cihazlardır. Bu cihazların kullanıldığı mekanların radyasyon zırhlaması bağlamında doğru ve etkin şekilde tasarımı, radyasyonun insan sağlığına olan zararlarından korunabilmek için önem teşkil etmektedir. “LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların tasarım sürecinde; mali, hammadde, enerji gibi kaynakları daha etkin ve verimli kullanmaya yönelik tasarım unsurları ve radyasyondan korunmaya yönelik önlemler ile optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretebilmek mümkündür” hipotezi ile yürütülen bu tez çalışmasında, konuya yönelik tasarım sürecinde dikkat edilmesi gereken hususlarla ilgili ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların önerileri ve değerlendirmeleri doğrultusunda bir araştırma yürütülmüştür. Her mekan için ilgili faktörlerin bütünlük olarak değerlendirilmesi ile tasarım yapılması gerekliliğinin ortaya konulduğu tezin sonucunda; konu ile ilgili çalışma yapacak olan mimarlar için bilgilendirici, yol gösterici ve projelendirmenin ön evrelerine ışık tutacak nitelikte bir çalışma oluşturulmuştur.

Bilim Kodu : 80115

Anahtar Kelimeler : Radyasyon, radyasyon zırhlaması, yapısal detay, lineer hızlandırıcı

Sayfa Adedi : 91

Danışman : Doç. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK

ANALYSIS OF STRUCTURAL DETAILING FOR RADIATION SHIELDING IN
BUILDINGS: RECOMMENDATIONS FOR SPACES WITH LINEAR ACCELERATOR

(M. Sc. Thesis)

Seval Yeşim BAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2019

ABSTRACT

Nowadays, radiation applications which are increasingly in use, are utilized in many fields, especially in medicine and industry. In addition to natural radiation sources, individuals are exposed to radiation caused by man-made sources within these applications and if the necessary precautions are not taken, situations that seriously threaten human health may occur. Shielding between the radiation source and the person in order to limit the radiation exposure within the accepted values has an important place within the scope of radiation protection methods. Linear accelerators, commonly used for the treatment of cancer patients in radiotherapy applications are devices produce high energy X-ray and electron beam. Accurate and effective design of the places where these devices are used in terms of radiation shielding is important in order to be protected against the damages of radiation to human health. This thesis, which is carried out with the hypothesis “it is possible to produce designs which are optimal and within the framework of shielding integrity with design elements aiming to use resources such as financial, raw material, energy more effectively and efficiently and radiation protection measures in the design process of the places where radiotherapy applications are performed with LINAC device,” a research has been conducted in line with the suggestions and evaluations of national and international institutions and organizations regarding the issues to be considered during the design process. The thesis in which the necessity of designing within the framework of evaluating all the related factors for each space has been put forward, as a result, an informative, guiding and a study to shed light on the early stages of design have been created for the architects who will work on the subject.

Science Code : 80115

Key Words : Radiation, radiation shielding, structural detail, linear accelerator

Page Number : 91

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, cesaretlendiren kıymetli danışmanım Doç. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, hayatımın her anında yanımda olup, fikir ve yardımlarıyla bana destek olan kardeşlerim Ebru YOLCU ve Sevil Merve BAŞER'e, varlıkları ile bana güç veren, maddi manevi emek ve desteklerini esirgemeyen annem Ayten BAŞ ve babam Halil BAŞ'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE	7
2.1. Radyasyon Üzerine Bir Arka Plan Çalışması	7
2.1.1. Radyasyonla ilgili kavramlar ve terimler.....	7
2.1.2. Radyasyon kaynakları	9
2.1.3. Radyasyon çeşitleri	11
2.1.4. Radyasyonun kullanım alanları.....	13
2.1.5. Radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkileri	15
2.1.6. Radyasyondan korunma	17
2.2. Radyasyon Zırhlaması	19
2.2.1. Radyasyon zırhlaması ile ilgili tanımlar ve parametreler	20
2.2.2. Radyasyon zırhlaması gerektiren uygulama ve cihazlar.....	23
2.2.3. Zırh malzemesi olarak kullanılan yapı malzemeleri.....	26
2.2.4. Radyasyon zırhlamasına yönelik mimari projelerde dikkat edilmesi gereken genel hususlar	34

Sayfa

3. LİNEER HIZLANDIRICI MEKANLARI İÇİN RADYASYON ZIRHLAMASINA YÖNELİK TASARIM UNSURLARI	39
3.1. Mekanlar Tasarım	39
3.2. Malzemeler	48
3.3. Detaylar	50
3.3.1. Duvar	50
3.3.2. Döşeme	56
3.3.3. Kapı	60
4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	65
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Radyasyon ölçü birimleri	8
Çizelge 2.2. Radyasyon kaynaklarına ilişkin oransal tahminler	11
Çizelge 2.3. İyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri	12
Çizelge 2.4. Doz sınırları	19
Çizelge 2.5. Alanlara göre meşguliyet faktörleri	22
Çizelge 2.6. Zırhlama için kullanılan bazı yapı malzemeleri ve özellikleri	34
Çizelge 4.1. Mekansal tasarım alternatiflerine ilişkin bir değerlendirme	66
Çizelge 4.2. Zırhlama için kullanılan yapı malzemeleri için bir değerlendirme	67
Çizelge 4.3. Yapı elemanlarına ilişkin detay analizleri	70
Çizelge 4.4. LINAC mekanlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları için bir değerlendirme	74
Çizelge 5.1. LINAC mekanlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları için bir değerlendirme	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Alfa, beta ve gama radyasyonları	13
Şekil 2.2. Radyasyondan korunmanın temel prensipleri	18
Şekil 2.3. Radyasyon ve bariyerlere ilişkin bir şema	21
Şekil 2.4. Birincil ve ikincil bariyerlere ilişkin şematik bir plan	21
Şekil 2.5. LINAC cihazları	24
Şekil 2.6. LINAC cihazı.....	24
Şekil 2.7. Radyasyon çeşitlerinin malzemelere giricilikleri	26
Şekil 3.1. Zırhlama gerektiren mekanların birbirine bitişik olarak tasarlandığı bir örnek	42
Şekil 3.2. Mekana doğrudan erişim (a), mekana farklı uzunluklardaki şaşırtma koridorlarıyla erişim (b), (c), (d)	43
Şekil 3.3. Şaşırtma koridorlu tipik bir tasarım	44
Şekil 3.4. Şaşırtma koridoru olan (solda) ve olmayan (sağda) mekan tasarımları	45
Şekil 3.5. LINAC odası için şematik bir plan	46
Şekil 3.6. LINAC odası için şematik kesitler: A-A kesiti (solda), B-B kesiti (sağda) ..	46
Şekil 3.7. Beton blokların derzler çakışmayacak şekilde yerleştirilmesi için örnek bir tasarım	51
Şekil 3.8. Kanalda yapılan dirsek için şematik bir detay	52
Şekil 3.9. Kanalların belli bir açıyla duvardan geçişi için şematik bir detay	52
Şekil 3.10. Duvarın her iki tarafında zırhlama malzemesi ile sarılmış kanal için şematik bir detay	53
Şekil 3.11. Kanal geçişi için oluşturulmuş beton şaşırtma bölmesi için şematik bir detay	54
Şekil 3.12. Emiş menfezi için şematik bir detay	55
Şekil 3.13. Dozimetri kablo kanalı için şematik bir detay	55

Şekil	Sayfa
Şekil 3.14. Standart lazer montaj şekli (duvara gömülü şekilde)	56
Şekil 3.15. Lentoların şaşırtma koridorundaki konumu.....	56
Şekil 3.16. HVAC kanallarının lentodan geçişi için şematik bir detay	57
Şekil 3.17. HVAC kanallarının lentodan geçişi için şematik bir detay	57
Şekil 3.18. Kanalların tavandan şaşırtmalı geçişi için şematik bir detay	58
Şekil 3.19. Kanalların tavandan açılı geçişi için şematik bir detay	58
Şekil 3.20. Şaşırtma koridoru bulunmayan mekanlarda zırhlanmış kapılar için şematik bir zemin detayı	59
Şekil 3.21. Farklı zırhlama gereksinimine sahip kapıların kullanıldığı iki farklı mekânsal tasarım	61
Şekil 3.22. Kapıda yetersiz zırhlama	62
Şekil 3.23. Zırhlanmış kapılar için şematik bir detay	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kurşun tuğla uygulaması	28
Resim 2.2. Prekast modüler beton bloklar	30
Resim 2.3. Modüler beton bloklar	31
Resim 3.1. Elekta firmasının LINAC cihazı için tasarlanmış bir mekan	47
Resim 3.2. Varian firmasının LINAC cihazı için tasarlanmış bir mekan	47
Resim 3.3. Lentolu bir şaşırtma koridoru	57
Resim 3.4. Menteşeli kapı	63
Resim 3.5. Çift kanatlı kayar kapı (solda), Tek kanatlı kayar kapı (sağda).....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
BaSO₄	Baryum sülfat
Bq	Becquerel
C	Coulomb
cm	Santimetre
cm²	Santimetrekare
cm³	Santimetreküp
Co	Kobalt
d	Mesafe
eV	Elektron Volt
g	Gram
Gy	Gray
He	Helyum
HVL	Yarı kalınlık değeri
k	Zayıflatma (geçiş) faktörü
kg	Kilogram
kV	Kilovolt
m	Metre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
MeV	Milyon (Mega) Elektron Volt
mm	Milimetre
mSv	Millisievert
MV	Milyon (Mega) Volt
O₃	Ozon
P	Tasarım dozu
Sv	Sievert
T	Meşguliyet faktörü

Simgeler**Açıklamalar**

$t_{1/2}$	Yarılanma süresi
TVL	Onda bir kalınlık değeri
U	Kullanma faktörü
W	İşyükü
α	Alfa parçacığı
β	Beta parçacığı
γ	Gama ışını
Γ	Gama sabiti

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
BPE	Borated polyethylene
CT	Computed Tomography
HVAC	Heating Ventilating and Air Conditioning
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commision on Radiological Protection
IGRT	Image-Guided Radiation Therapy
IMRT	Intensity-Modulated Radiation Therapy
IPEM	Institute of Physics and Engineering in Medicine
LINAC	Linear Accelerator
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
NDK	Nükleer Düzenleme Kurumu
PET	Positron Emission Tomography
SI	Uluslararası Birimler Sistemi
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TS	Türk Standartları

Kısaltmalar**Açıklamalar****UNSCEAR**

United Nations Scientific Committee on the Effects of
Atomic Radiation

VMAT

Volumetric Modulated Arc Therapy

1. GİRİŞ

Hızla gelişen bilim ve teknoloji, yaşantımız için birçok avantajı ve kolaylığı beraberinde getirmekle birlikte, özellikle bazı alanlarda kaçınılmaz problemlere de yol açabilmektedir. Bu gelişmelerden biri olan radyasyon uygulamalarının da, tıp ve endüstri başta olmak üzere tarım, araştırma ve eğitim uygulamaları, enerji üretimi gibi birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Böylelikle, devamlı olarak maruz kalınan doğal radyasyona ek olarak, yapay kaynaklardan da radyasyona maruz kalmak kaçınılmaz hale gelmektedir.

Radyasyonun zararlı etkilerinden korunabilmek için gerek kendimizi gerekse gelecek nesilleri kapsayacak çerçevede gerekli önlemlerin alınması, radyasyonla çalışanların, halkın ve çevrenin radyasyonun zararlı etkilerine karşı korunabilmesi önemlidir. Bu bağlamda ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) ilkesi çerçevesinde; “mümkün olan en düşük dozun alınmasının başarılması” (Zeyrek, 2013) radyasyon uygulamaları için temel gerekliliklerden birini oluşturmaktadır. 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. Nükleer enerjinin özellikle tıbbi ve endüstri alanlarındaki kullanımı, radyasyondan korunabilmek için yapılacak biyolojik zırhların uygun şekilde tasarlanması ve inşa edilmesine bağlıdır (Samarin, 2013).

Tıbbi uygulamalar çerçevesinde hastalıkların tanı ve tedavisinde yaygın şekilde kullanılan radyasyonun kullanım alanlarından biri olan radyoterapi uygulamaları, dünya genelinde sayısı gün geçtikçe artan kanser hastalarının¹ yaklaşık yarısı için tedavi sürecinde başvurulmuş bir yöntemdir (IAEA, 2006: 1). Radyoterapi uygulamalarında yaygın şekilde kullanılan cihazların başında gelen lineer hızlandırıcılar (*linear accelerator*) (LINAC) ise, sayısı 2018 yılı sonu itibarıyla ülkemizde 242 adete ulaştığı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından bildirilen (URL-4), yüksek enerjili X-ışını ve elektron demeti üretebilen cihazlardır. Bu cihazlarla yüksek enerjili uygulamaların yapıldığı mekanların radyasyon zırhlaması bağlamında doğru ve etkin şekilde tasarımı, radyasyonun insan sağlığına olan zararlarından korunabilmek için önem arz etmektedir.

¹ 2018 yılı itibarıyla sayısı yaklaşık 18 milyon olarak tahmin edilen kanser hastalarının sayısının, 2040 yılında yaklaşık olarak 30 milyona ulaşacağı Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından tahmin edilmektedir (URL-2).

“İyonlaştırıcı radyasyon” yerine “radyasyon” kelimesinin kullanıldığı bu tez çalışması kapsamında; LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamaları yapılan mekanların radyasyon zırhlamasına yönelik yapısal detayları ele alınmış, konuya yönelik tasarım sürecinde dikkat edilmesi gereken hususlarla ilgili değerlendirme ve öneriler çerçevesinde bir çalışma yürütülmüştür.

Araştırmanın amacı

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurlarının öneri ve değerlendirmeler çerçevesinde ele alındığı bu tez çalışmasında; konu ile ilgili çalışma yapan/yapacak olan mimarlar için bilgilendirici, yol gösterici, proje çalışmalarına ışık tutacak nitelikte bir çalışma üretilmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi

Kanser hastalıklarının artmasıyla birlikte radyoterapi uygulamalarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmakta, bu ihtiyacı karşılayacak yapı gereksinimi de aynı paralellikte artış göstermektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte tasarım süreçleri de karmaşık hale gelmekte ve bu uygulamaların yapılacağı mekanların bütün ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte tasarlanması çeşitli unsurların bir arada değerlendirilmesini gerektirmektedir. Söz konusu uygulamaların yapıldığı mekanların fonksiyonel ve biçimsel olma niteliklerinin yanı sıra “radyasyondan korunma” ölçütlerini sağlayabilmesi tasarımın başarılı olarak nitelendirilebilmesi için son derece önemlidir. Bu çalışma, tasarımcıya terminoloji ile ilgili bilgi sağlaması, radyasyondan korunma probleminin temelini anlayıp tasarıma yansıma noktasında çözüm önerileri geliştirmesine yardımcı olması gibi açılardan konu kapsamındaki mimari projelere ışık tutacak nitelikte özgün ve önemli bir çalışma olarak nitelendirilebilir. Ayrıca, ülkemizde sağlık yapıları kapsamındaki mekanların mimari tasarım kriterleriyle ilgili yapılmış çalışmalar literatürde bulunmakla birlikte, mimari tasarımın radyasyon zırhlaması bağlamında ele alındığı herhangi bir çalışma bulunmaması açısından da alan için önemli bir katkı olarak düşünülebilir.

Araştırma sorusu

Tez çalışmasının ana araştırma sorusu, “LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların tasarım sürecinde birtakım tasarım unsurlarıyla optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretilebilir mi?” şeklinde kurgulanmıştır.

Bu ana araştırma sorusunun cevabına ulaşmak için ayrıca şu alt sorular da araştırılmıştır:

- Radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları kapsamındaki bileşenler nelerdir?
- LINAC mekanlarının tasarım süreci için radyasyon zırhlamasının önemi nedir?
- LINAC mekanlarının tasarımında radyasyon zırhlaması için kullanılan yapı malzemeleri nelerdir?

Araştırmanın hipotezi

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların tasarım sürecinde; mali, hammadde, enerji gibi kaynakları daha etkin ve verimli kullanmaya yönelik tasarım unsurları ve radyasyondan korunmaya yönelik önlemler ile optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretebilmek mümkündür.

Araştırmanın sınırlılıkları ve varsayımlar

Binalarda radyasyon zırhlaması, farklı enerji aralığında farklı radyasyon uygulamaları için yapılmakta olup, araştırmayı sınırlandırmak amacıyla, radyasyon zırhlamasına yönelik yapısal detaylar, 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 araştırma kapsamında radyasyon zırhlamasına yönelik yapısal detaylar temel olarak, konuyla ilgili öneme sahip bazı ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların radyoterapi uygulamalarına yönelik tasarım ve radyasyondan korunma için yayımladıkları raporlar ve değerlendirmeler ile sınırlı tutulmuştur. Bu kapsamda temel olarak; Radyasyondan Korunma

ve Radyasyon Ölçümleri Ulusal Konseyi² (*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 Ajansının³ (*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 Bakanlığı’nın “LINAC (Doğrusal Hızlandırıcı)’nın Mimari ve Temel Altyapı Gereksinimleri” başlıklı yayınları ile konu kapsamında ilgili değerlendirme ve güncel verilerin yer aldığı internet kaynaklarının da, çalışmayı tamamlamak için yeterli olacağı düşünülmüştür.

Araştırmanın yöntemi

Nitel yöntemlerin benimsendiği bu tez çalışmasında birinci bölüm kapsamında; problem durumundan bahsedilerek araştırmanın önemi, araştırma sorusu, araştırmanın amacı gibi hususlara değinilmiştir.

İkinci bölüm kapsamında; radyasyon ile ilgili bir arka plan çalışması oluşturularak, radyasyon ve radyasyon zırhlamasına ilişkin literatür taraması yapılmış, konunun daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla teknik ve kavramsal çerçeve oluşturulmuştur. Üçüncü bölümde; araştırmanın sınırlılıkları kapsamında 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 mekanlarının mimari tasarım sürecinde değerlendirilmesi gereken radyasyon zırhlamasına yönelik hususlar ve detaylar ortaya konulmuştur.

² İyonlaştırıcı radyasyonla ilgili tüm bilimsel ve teknik verileri inceleyerek analiz etmek ve radyasyon güvenliği konusunda önerilerde bulunmaktan sorumlu Amerika Birleşik Devletleri (ABD) kuruluşudur (Lombardi, 1999: 35).

³ Diğer uluslararası organizasyonlarla işbirliği yapmak suretiyle güvenlik standartları oluşturulmasında yasal işleve sahip olan ve standartların üye ülkelerde uygulanmasına çeşitli yöntemlerle destek olan uluslararası bir kuruluştur (TAEK, 2009: 23).

İlgili kaynakların verileri doğrultusunda elde edilen bulgular dördüncü bölüm kapsamında; mekânsal tasarımı etkileyen unsurlar ve zırhlamada kullanılan yapı malzemeleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. Zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi için tasarımları, disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde değerlendirme süreci gerektiren duvar, döşeme elemanları ve kapılarla ilgili dikkat edilmesi gereken genel hususlara yer verilmiş, tez kapsamında elde edilen detay çizimleri derlenerek, bir tablo aracılığıyla sunulmuştur. Ayrıca, ilgili firmaların yetkili kişileriyle yapılan görüşmeler doğrultusunda elde edilen bilgilere yer verilmiş ve radyasyon zırhlamasına yönelik doğru ve etkin tasarım için öneri ve değerlendirmeler örnek tasarımlar üstünden bir tablo ile ortaya konulmuştur.

Sonuç ve öneriler bölümünde ise; LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların radyasyon zırhlamasına yönelik doğru ve etkin tasarımı için tez kapsamında elde edilen sonuçlar tartışılmış, konu kapsamında öneri ve değerlendirmelerde bulunularak tez çalışması tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde tezin kuramsal çerçevesini oluşturan tanımlar ve kavramlar üzerine bir yazın taraması sunulmuştur. Radyasyon üzerine bir arka plan çalışması hazırlanarak, radyasyon zırlamasına yönelik kavramlar ile zırlama gerektiren uygulamalar, zırlamada kullanılan malzemelere yer verilmiş, ayrıca mimari projelerde dikkat edilmesi gereken genel hususlara yer verilerek tez çalışması için gerekli teknik ve kavramsal çerçeve oluşturulmuştur.

2.1. Radyasyon Üzerine Bir Arka Plan Çalışması

Bu bölümde radyasyon kapsamındaki bileşenlerle ilgili tanımlara ve terminolojiye yer verilerek konu hakkında bir arka plan çalışması oluşturulmuştur.

2.1.1. Radyasyonla ilgili kavramlar ve terimler

Radyasyon ile ilgili olarak açıklanması gereken kavramlardan biri olan “radyoaktivite” doğal ve yapay olmak üzere iki farklı şekilde meydana gelir. Doğada bulunan kararsız elementlerin, dışarıdan müdahale olmaksızın fazla enerjilerini çekirdeklerinden dışarı salmaları olayına “doğal radyoaktivite”, doğadaki kararlı halde bulunan izotopların yapay yollarla kararsız hale getirilmeleri sonucu radyoaktif hale gelen çekirdeğin parçalanması olayına da “yapay radyoaktivite” adı verilir (TAEK, 2002: 2).

Bir çekirdeğin kararlılığına, yani nötron sayısının proton sayısına oranına bağlı olarak ortaya çıkan radyoaktivite, kararlılık kuşağı dışındaki ve 83’ten fazla proton sayısına sahip olan kararsız çekirdeklerde kendini gösterir (Chang ve Goldsby, 2014/2018: 733, 738). Bu kararsız çekirdeklerin ısıma yaparak daha kararlı hale dönüşmelerine “radyoaktif bozunma”, ısımayı yapan maddelere ise “radyoaktif madde” adı verilir (Ergül, 2009: 242). “Bir radyonüklidin aktivitesinin, başlangıçtaki değerinin yarısına düşmesi için geçen süre” olarak tanımlanan ve $t_{1/2}$ sembolü ile ifade edilen “yarılanma süresi” ve “belirli bir miktar radyoaktif maddede kendiliğinden gerçekleşen dönüşümlerin hızı” olarak ifade edilen “aktivite” kavramları radyoaktivite ile ilgili diğer önemli kavramlardır (TAEK, 2009: 6).

Radyasyon ise, radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için kendiliğinden veya çevreden aldıkları enerji ile dışarı saldıkları parçacık veya elektromanyetik dalga şeklinde

taşınan fazla enerji olarak tanımlanabilir (TAEK, 2002: 4). Kısaca, “uzayda ilerleyen parçacıklar veya dalgalar biçimindeki enerji” olarak tanımlanabilen “radyasyon” a maruz kalma durumunu ifade etmek için sıklıkla “ışınlanma” terimi kullanılır (TAEK, 2009: 73, 75).

Radyasyonla ilgili tanımlamalarda sıkça kullanılan bir terim olan “radyasyon dozu” nu ifade eden farklı kavramlar bulunmakla birlikte; “radyasyon ile dokunun birim kütlesine aktarılan enerji” “soğrulmuş doz”, “farklı tip radyasyonların hasarlarını dikkate alan ağırlıklı soğrulmuş doz” “eşdeğer doz”, “farklı dokuların hasarlarını dikkate alan ağırlıklı eşdeğer doz” “etkin doz”, “bir radyasyon kaynağı nedeniyle bir grup insanın maruz kaldığı toplam etkin doz” ise “kollektif etkin doz” olarak adlandırılır (TAEK, 2009: 11).

Radyasyonla ilgili değerlendirmelerin ve sınırların anlaşılabilmesi için önemli unsurlardan biri de radyasyon birimleri olup ‘Uluslararası Birimler Sistemi’ (SI) tüm dünyada ortak olarak kullanılmaktadır (Kumaş, 2009b: 32). Çizelge 2.1 ile ışınlama dozu, aktivite, soğrulmuş doz ve eşdeğer doz terimleri için kullanılan ölçü birimleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Radyasyon ölçü birimleri (Kumaş, 2009b: 33)

Terim	Birim
İşinlama dozu	Coulomb/Kilogram (C/kg)
Aktivite	Becquerel (Bq)
Soğrulmuş doz	Gray (Gy)
Eşdeğer doz	Sievert (Sv)

Ayrıca, Elektron Volt olarak ifade edilen radyasyon enerji birimi için; “bir elektronun, 1 volt değerindeki bir pilin (-) kutbundan (+) kutbuna doğru giderken kazandığı enerji miktarı 1 eV” olarak bir tanımlama yapmak mümkündür (Kumaş, 2009b: 35).

Yukarıda belirtilen tanımlar, radyasyon olgusunu daha iyi anlayabilmek için bilinmesi gereken terim ve kavramlar olup, bu bağlamda anlaşılması gereken diğer bir konu da radyasyon kaynaklarını oluşturan bileşenlerdir.

2.1.2. Radyasyon kaynakları

Radyasyonu tanımlamak için kullanılan parametrelerden biri olan “radyasyon kaynakları”, iki temel başlık altında sınıflandırılabilir:

- Doğal radyasyon kaynakları
- Yapay radyasyon kaynakları

Yeryüzünde yaşayan canlılar, sürekli ve kaçınılmaz olarak doğal kaynakların sebep olduğu radyasyona maruz kalmakta, alınan bu radyasyon miktarı birçok insan için, toplamda maruz kalınan radyasyonun en önemli parçasını oluşturmaktadır. Doğal radyasyon kaynaklarını oluşturan iki temel bileşen; dünya atmosferine uzaydan ulaşan yüksek enerjili kozmik ışın parçacıkları ve yer kabuğu kaynaklı, insan vücudu da dâhil çevremizde her yerde bulunmakta olan radyonüklidlerdir. Havada, gıdada ve suda bulunan Kurşun-210 ve Polonyum-210 vücudumuzda iç ışınlanmaya sebep olurken, özellikle vücudumuza beslenme yoluyla giren Potasyum-40, iç ışınlanma kaynaklarının sebep olduğu yıllık ortalama dozun yaklaşık yarısını oluşturmaktadır (TAEK, 2009: 32).

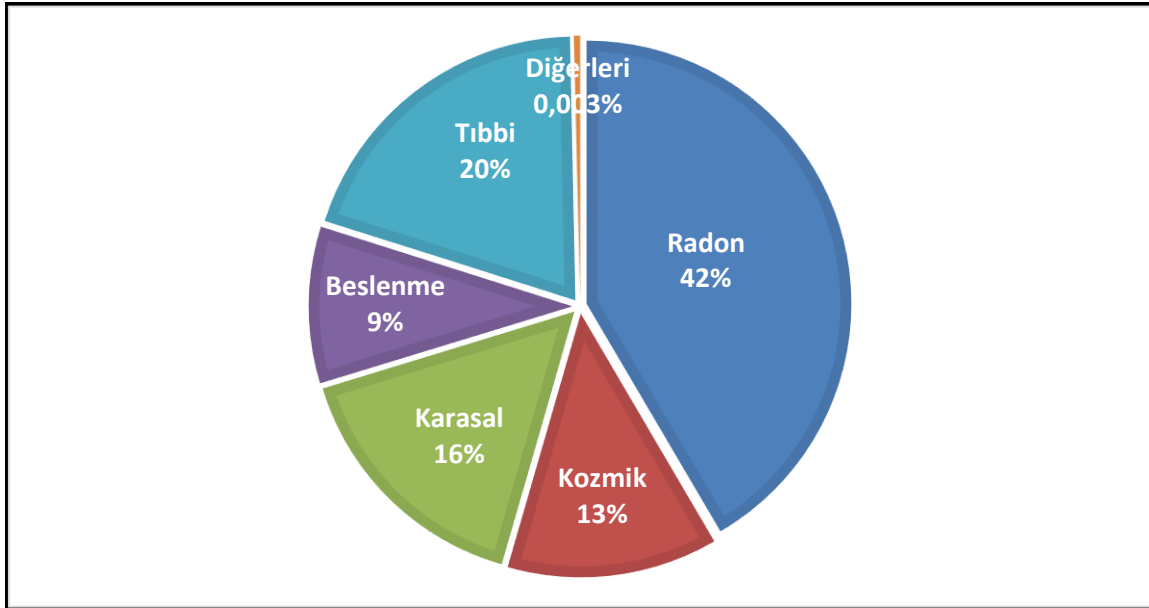
Yer kabuğu kaynaklı radyonüklidlerden yayılan gama ışınları ise, dıştan ışınlanmaya sebep olan en önemli etken olup, Potasyum-40, Uranyum-238 ve Toryum-232 serileri bu ışınlanmaya sebep olan radyonüklidlerin başında gelmektedir (UNSCEAR, 2010: 223, 233). Özellikle tatsız, kokusuz, renksiz bir asal gaz olup atmosferde her yerde bulunan Radon-222 ile kısa ömürlü bozunma ürünlerinin sebep olduğu ışınlanma doğal radyasyon kaynakları içinde radyasyon maruziyetine sebep olan en büyük etkendir (UNSCEAR, 2009: 201-203). Binalardaki ana kaynakları; bina altında bulunan toprak ve kayalar, yapı malzemeleri, doğalgaz ve su olan, zemindeki kırık ve çatlaklardan, yapıda bulunan bağlantı noktaları, duvar çatlakları ve zeminin yapısındaki boşluklardan binalara sızan radon, gerekli önlemlerin alınmadığı ve özellikle kapalı alanlarda havalandırmanın kısıtlı yapıldığı durumlarda yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmektedir (URL-1). Bu bağlamda, insan sağlığını ciddi şekilde tehdit edebilen ve hatta akciğer kanserine sebep olabilen radonun, mevcut ve yeni üretilecek binalarda etkisini azaltmak ya da yok etmek için tasarımcı tarafından, farklı koşullara ait farklı çözüm önerileri getirilmesi ve gerekli önlemler alınarak tasarımcı, üretici ve kullanıcı çerçevesinde, radonun sağlık riski oluşturma potansiyelinin engellenmesi önem taşımaktadır (APAK, 2014: 89).

Özellikle son yüzyılda artan ihtiyaçlar ve yüksek yaşam standartları doğrultusunda, hızla gelişen teknolojiyi kullanarak yapay yollarla üretilen radyasyon kaynaklarından, birçok alanda yürütülen faaliyet ve uygulamalar çerçevesinde faydalanılmaktadır (TAEK, 2002: 10). Ancak, bazı radyasyon kaynaklarını içeren faaliyet, uygulama ve olaylar esnasında radyoaktif maddelerin çevreye salımı ile ciddi oranlarda radyasyon maruziyeti oluşabilmektedir. Bu kaynaklar arasında, küresel ölçekte halkı radyasyona maruz bırakan en büyük etki 1945 ve 1980 yılları arasında nükleer silahların atmosferde test edilmesi esnasında meydana gelmiştir. Nükleer silahların atmosferde ve yer altında testleri ile ortaya çıkan nükleer serpintiler ve nükleer silah malzemesi üretiminin yol açtığı radyonüklid salımı, önemli miktarlarda maruziyete sebep olmuş radyasyon kaynaklarıdır (UNSCEAR, 2000: 5, 158-177).

Nükleer güç üretimi, radyoizotop üretimi ve kullanımı, araştırma reaktörleri ve radyonüklidlerin çevreye salımına yol açan kazalar (Çernobil gibi) (UNSCEAR, 2000: 180, 191-192) ve ayrıca bilim ve teknoloji uygulamalarında, tıp alanında, çeşitli tüketici ürünlerinde (Atakan, 2014: 21) tarım ve endüstri alanlarında kullanılan kaynaklar diğer yapay radyasyon kaynaklarını oluşturmaktadır.

Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesinin (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) (UNSCEAR) dünya genelinde toplum bireylerini radyasyona maruz bırakan kaynaklara ilişkin ortalama doz değer tahminleri ışığında hazırlanan Çizelge 2.2'den de görülebileceği üzere tıbbi ışınlamalar yapay radyasyon kaynakları içerisinde, radon kaynaklı ışınlamalar ise doğal radyasyon kaynakları içerisindeki en büyük payı oluşturmaktadır.

Çizelge 2.2. Radyasyon kaynaklarına ilişkin oransal tahminler (UNSCEAR, 2010: 404)



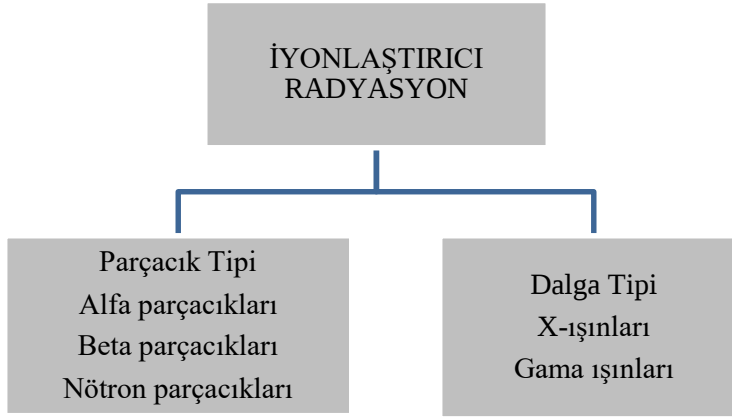
Yukarıda da bahsedildiği üzere, radyasyon kaynakları doğal ve yapay olarak iki temel bileşen ve bunlar altında da farklı alt bileşenlerden oluşan ve radyasyonu tanımlamak için kullanılan parametrelerden biridir. Radyasyonu tanımlamak için kullanılan önemli parametrelerden bir diğeri ise radyasyon türlerini oluşturan bileşenlerdir.

2.1.3. Radyasyon çeşitleri

Radyasyon türleri için bir sınıflandırma yapıldığında; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden çok küçük parçacıkları ifade eden “parçacık radyasyonu” ve belli bir enerjiye sahip, kütsüz radyasyon çeşidini ifade eden “dalga tipi radyasyon”, radyasyonun iki temel sınıfı olarak karşımıza çıkar. Madde üzerinde oluşturduğu etkiler esas alınarak ise, “iyonlaştırıcı radyasyon” ve “iyonlaştırıcı olmayan radyasyon” olmak üzere iki bileşenli bir sınırlandırma yapılabilir (TAEK, 2002: 4). “İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, frekansları ve dolayısıyla enerjileri daha düşük olan ve vücuda etkileri molekül düzeyinde kalarak iyonlar oluşturamayan elektromanyetik dalgalardan oluşur” (Atakan, 2014: 4-5). Kızılötesi ışık, radyant ısı, morötesi ışık, görünür ışık, radyo dalgaları ve mikro dalgalar iyonlaştırıcı olmayan radyasyon sınıfına girer (TAEK, 2009: 1). “Çarptığı maddede yüklü parçacıklar (iyonlar) oluşturabilen radyasyon” anlamına gelen iyonlaştırıcı radyasyonun ise; alfa parçacıkları, beta parçacıkları, X-ışınları, gama ışınları ve nötronlar olmak üzere başlıca beş çeşidi bulunmaktadır (TAEK, 2002: 4). Çizelge 2.3’ten de görülebileceği üzere, parçacık ve

dalga tipi olmak üzere iki sınıftan oluşan iyonlaştırıcı radyasyonun ele alındığı bu tez çalışması genelinde “radyasyon” olarak “iyonlaştırıcı radyasyon” kastedilmektedir.

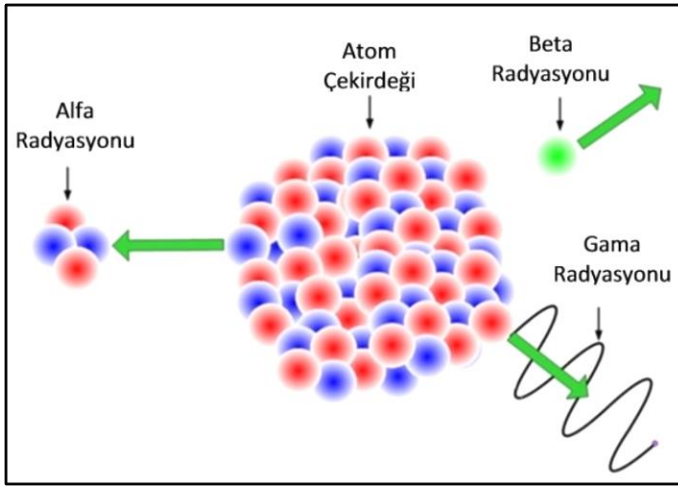
Çizelge 2.3. İyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri



İyonlaştırıcı radyasyonun “parçacık tipine” göre bir sınıflandırması yapıldığında, Çizelge 2.3’ten de görülebileceği üzere alfa ve beta parçacıkları ile dolaylı iyonlaştırıcı nötron parçacıkları karşımıza çıkar. İki proton ve iki nötrondan oluşan helyum (${}^4_2\text{He}$) çekirdeği olan ve “ α ” işareti ile sembolize edilen “alfa parçacıkları”, sahip oldukları büyük elektrik yükleri sebebiyle, maddeler içinden geçerken yoğun bir iyonlaşma meydana getirip, bu yüzden enerjilerini çok hızlı şekilde kaybederler. Parçacık tipi radyasyon çeşitlerinden bir diğeri ise, pozitif yüklü elektronlar (pozitron) (β^+) ile negatif yüklü elektronlar (β^-) olan “beta parçacıkları”dır. İyonizasyon yetenekleri alfa parçacıklarına göre daha zayıf olan beta parçacıklarının madde içine nüfuz etme kabiliyeti, alfa parçacıklarına göre çok daha fazladır (TAEK, 2002: 4-5). Aynı sınıflandırma içinde yer alan “nötronlar” ise, nükleer fisyon ve nükleer füzyon olayları esnasında ortaya çıkan parçacıklardır. Kozmik ışınların bir bileşeni olmakla birlikte genellikle yapay olarak üretilen nötronlar, elektriksel olarak yüksüz olmalarından dolayı yüksek giricilik özelliğine sahiptir (TAEK, 2009: 7-8). İyonlaşmaya doğrudan değil dolaylı olarak etki eden nötronlar (Kumaş, 2009b: 12) radyasyon türleri arasında insan sağlığı açısından en tehlikeli parçacıklardır (Akkurt ve El-Khayatt, 2013).

İyonlaştırıcı radyasyonun “dalga tipine” göre bir sınıflandırması yapıldığında ise, yine Çizelge 2.3’ten görülebileceği üzere karşımıza “X-ışınları” ile “gama ışınları” çıkar. Dalga tipi radyasyonun bir bileşeni olan X-ışınları yapay olarak “havası boşaltılmış bir tüp içinde yüksek hızlı elektronların metal bir hedefe çarptırılmasıyla elde edilmektedir” (URL-4). Röntgen ışını olarak da adlandırılan bu ışınlar, atomdan koparılan elektronun yerine daha

yüksek seviyelerden elektronların atlamasıyla ortaya çıkan enerji fazlalığı ile oluşmaktadır. Aynı sınıflandırma içindeki diğer bir elektromanyetik radyasyon çeşidi ise “ γ ” ile sembolize edilen gama ışınlarıdır. Şekil 2.1’den de görülebileceği üzere bir dalga tipi radyasyon çeşidi olan gama ışınları, alfa ve beta parçacığı yayan çekirdeğin, kararlı duruma geçebilmek için fazla olan enerjisi ile yaydığı radyasyondur. Bu ışınların penetrasyon yeteneği alfa ve beta ışınlarına göre çok daha yüksek iken, iyonizasyon yeteneği ise daha düşüktür (TAEK, 2002: 5-6).



Şekil 2.1. Alfa, beta ve gama radyasyonları (URL-3)

Yukarıda genel özellikleriyle birlikte tanımlanan parçacık ve dalga tipi iyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri bahsedildiği üzere farklı özelliklere sahip olmakla birlikte, bu özellikler çerçevesinde radyasyondan çeşitli alanlarda faydalanılmaktadır.

2.1.4. Radyasyonun kullanım alanları

İyonlaştırıcı radyasyonun keşfedilip hayatımıza girmesi 100 yıldan fazla zaman öncesine dayanmaktadır. Wilhelm Roentgen, 1895 yılında X-ışınlarını; Henri Becquerel, 1896 yılında doğal radyoaktiviteyi; Frederic Joliot ve Irene Curie Joliot ise 1934 yılında yapay radyoaktiviteyi keşfetmişlerdir. Bu buluşlar özellikle, radyasyonun tıp alanındaki kullanımı ile ilgili gelişmelerin başlangıç noktasını teşkil etmektedir (Lombardi, 1999: 35).

Günümüzde, keşfedildiği andan itibaren hızlı şekilde gelişen ve yaşantımızda birçok alanda kendine yer edinmiş olan radyasyonun kullanım alanlarına göre bir sınıflandırması

yapıldığında; tıp, endüstri, tarım alanları ile güvenlik amaçlı uygulamaların yanı sıra, enerji kaynağı ve tüketici ürünleri sayılabilir. En yoğun şekilde kullanıldığı uygulama alanı olarak tıbbi uygulamalarda radyasyondan, görüntü elde edebilme özelliği ile “tanı”, radyasyonun hücre veya tümörleri yok edebilme özelliği ile de “tedavi” başta olmak üzere çeşitli uygulamalar kapsamında faydalanılmaktadır (TAEK, 2002: 12).

Radyasyonun tıp alanındaki uygulama alanlarıyla ilgili; radyoloji, radyoterapi ve nükleer tıp olmak üzere üç bileşenli bir sınıflandırma yapılabilir. “Radyoloji” olarak adlandırılan yöntem, vücudun belirli bir organı ya da bölgesine X-ışınları verilerek hastalıkların teşhisinde yaygın şekilde kullanılan ve gün geçtikçe geliştirilen tıbbi uygulama alanıdır (TAEK, 2002: 12). Radyasyonun tıp alanındaki diğer uygulaması, kanser hastalıklarının tedavisinde kullanılan, vücut dokularında ortaya çıkmış kötü huylu tümörlerin X-ışınları, yüksek enerjili gama ışınları veya hızlandırılmış atom çekirdeklerine maruz bırakılmak suretiyle yok edilmesi esasına dayanan “radyoterapi” uygulamalarıdır (Atakan, 2014: 23). Hastalıkların tanı ve tedavisinin radyofarmasötik kullanılarak farklı yöntemlerle yapıldığı “nükleer tıp” radyasyonun tıbbi uygulama alanlarından bir diğeridir. Ayrıca, diş hekimliğinde radyasyondan, radyoloji uygulamaları kapsamında faydalanılmaktadır (URL-4).

Birçok avantajlı yönüyle radyasyon, endüstri alanında da kendine geniş bir kullanım alanı edinmiştir. Endüstriyel ürünlerin (boru, buhar kazanı gibi) gama ışınları ile X-ışınlarından faydalanılarak radyografi uygulamaları çerçevesinde hata tespitlerinin yapılması, pek çok sanayi ürününün (plastik, demir, çelik, çimento, kâğıt gibi) üretim aşamasında nem, yoğunluk ve seviye ölçümlerinin yapılması, tek kullanımlık tıbbi malzemelerin sterilizasyonu gibi uygulamalarda da radyasyondan faydalanılmaktadır. Ayrıca, barajlarda su kaçaklarının tespiti, akarsularda debi ölçümü, yer altı sularının hareket takibi radyasyonun endüstride kullanıldığı diğer alanlardandır (TAEK, 2002: 14-15).

Radyasyonun kullanıldığı diğer bir alan da tarım uygulamalarıdır. Radyoaktif ışınlarla mutasyona uğratılıp daha verimli ve dayanıklı hale gelen tohumlar, raf ömürleri uzatılarak uzun süre saklanabilme imkânı verilen gıda maddeleri, hububata zarar veren haşerelerin kısırlaştırılması gibi uygulamalar, radyasyonun bu alandaki kullanımına örnek olarak gösterilebilir (Kumaş, 2009a: 31). Bagaj, araç, çanta ve paketlerin içinde bulunan materyallerin görüntülenmesi için gümrük, liman, havaalanı, alışveriş merkezleri gibi

yerlerde kullanılan X-ışını kaynakları, sınır kapılarında kaçakçılığın engellenebilmesi için yük taşıma araçlarının içinin görüntülenmesi amacıyla kullanılan lineer hızlandırıcılar ve Kobalt-60 (Co-60) kaynakları da radyasyonun güvenlik amaçlı kullanımına yönelik örneklerdir (URL-4).

Nükleer enerji ayrıca, enerji üretimi sağlamak için uzun yıllardır kullanılmakta olan bir kaynak olup, nükleer güç santralleri ile özellikle bazı ülkelerde önemli miktarlarda enerji üretimi sağlanmaktadır (TAEK, 2002: 16).

Radyasyonun kullanıldığı bir diğer alan ise tüketici ürünleridir. Bu kapsamda; radyoaktif madde içeren duman dedektörleri, gazlı trityum lambaları, radyolüminesans boya/madde içeren ürünler, floresan lambalar, anti-statik fırçalar, uranyum ve toryum içeren çeşitli ürünler radyoaktif madde içeren tüketici ürünlerine verilebilecek örneklerdendir (URL-6).

Yukarıda belirtilen uygulama ve ürünlere ek olarak; çeşitli araştırma ve eğitim uygulamaları, veterinerlik uygulamaları gibi alanlarda da radyasyondan faydalanılmaktadır (URL-5). Ayrıca, tahribatsız, hızlı, doğru ve güvenilir şekilde kültür varlıklarının tanımlanıp tarihlendirilerek, yapıldıkları teknolojiler ve yapıldıkları dönemin sosyo-ekonomik koşulları hakkında bilgi edinilmesini sağlaması yönleriyle nükleer analiz teknikleri dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu teknikler vasıtasıyla, arkeolojik eserlerin yapımında kullanılan malzemeler tanımlanarak, hammadde, üretim teknolojisi, önceden yapılmış olan değişiklikler, restorasyonlar ve sahtecilik belirlenebilmekte, çevre etkilerinin tespit edilmesi ve yaş tayini gibi işlemler yapılabilmektedir (TAEK, 2011:1-2).

Yukarıda bahsedildiği gibi radyasyonun farklı uygulamalar çerçevesinde farklı kullanım alanları bulunmakta olup, gerekli tedbirler alınmadığı takdirde ise insan sağlığını ciddi ölçüde tehdit edecek durumlar ortaya çıkabilmektedir.

2.1.5. Radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkileri

Radyasyonun bir canlıda biyolojik etki oluşturabilmesi, radyasyon enerjisinin hücre ve dokular tarafından soğrulmasına ve dokularda dağılmasına bağlı olarak gerçekleşmekte olup, radyasyonun organizma üzerinde oluşturduğu etkiler; fiziksel, kimyasal ve biyolojik

olarak üç kademeli olarak ortaya çıkmaktadır (Özalpan, 2001; Steel, 1997'den aktaran Coşkun, 2011).

Radyasyonun organizmada oluşturabileceği hasarın derecesi veya hasar meydana gelme olasılığının bağlı olduğu etkenler Atakan'a (2014: 25) göre; dozun büyüklüğü, dozun süresi, iyonlaştırıcı radyasyonun cinsi, hedef dokunun cinsi veya duyarlılığı ve ışınlanan canlının yaşı olarak sıralanabilir.

Ortaya çıkma olasılıkları esas alınarak, “deterministik” ve “stokastik” olarak iki başlık altında sınıflandırılabilen radyasyonun organizma üzerindeki etki tiplerinden deterministik etkiler; alınan dozun belirli bir eşik düzeyini aşması sonucu meydana gelmektedir. Ani olarak alınan yüksek dozlarla ölümcül olabilen, vücudun belirli bölgelerinin çok yüksek dozlarla ışınlanması sonucu ciltte yanıklar veya kısırlık gibi etkilere yol açabilen deterministik etkiler, ışınlanmadan uzun süre sonra da vücudun bazı kısımları ve organlarını etkileyen hasarlar (katarakt, cilt hasarı gibi) olarak da ortaya çıkabilmektedir (TAEK, 2009: 15). Stokastik etkiler ise, uzun zaman aralığında maruz kalınan düşük seviyeli ışınlanmalar sonucu ortaya çıkmasında belli bir eşik değer gerektirmeyen ve neticesinde genetik mutasyonların sayısında artış, kanser ve insan yaşamının kısalma riski oluşabilen etkilerdir (Lombardi, 1999: 42). En önemlisi kanser olan bu etkilerin ortaya çıkma zamanı ve şiddeti alınan dozdan bağımsız olmakla birlikte, sonuçta oluşan etkilerin radyasyon kaynaklı olup olmadığı klinik olarak tespit edilememektedir (TAEK, 2009: 16).

Radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkileri için bir diğer sınıflandırma biyolojik olarak; gelecek nesillerde ortaya çıkabilecek etkileri tanımlayan kalıtsal (genetik) etkiler ve bedensel (somatik) etkiler olarak yapılabilir. Somatik etkiler kapsamında, istem dışı olarak organizmanın tamamı ya da belirli bir bölgesinin kısa bir zaman aralığında yüksek dozlarda radyasyona maruz kalmasıyla, birkaç gün ya da hafta içinde çeşitli hasarlar ve hatta ölüme yol açabilen “erken etkiler” (akut ışınlanma belirtileri) görülebilir. Ayrıca, uzun bir zaman aralığı boyunca (yıllarca) düşük radyasyon dozları, kısa aralıklarla uzun süre boyunca alındığı için organizmanın tam olarak kendini iyileştirmeye vakit bulamaması neticesinde yıllar sonra bile bazı hasarlar ortaya çıkmasına, yaşam süresinde kısalma ve sonraki nesillerde kalıtsal bozukluk oluşabilmesine yol açan etkiler “gecikmiş etkiler” (kronik ışınlanma belirtileri) olarak adlandırılır (Kumaş, 2009b: 16-19).

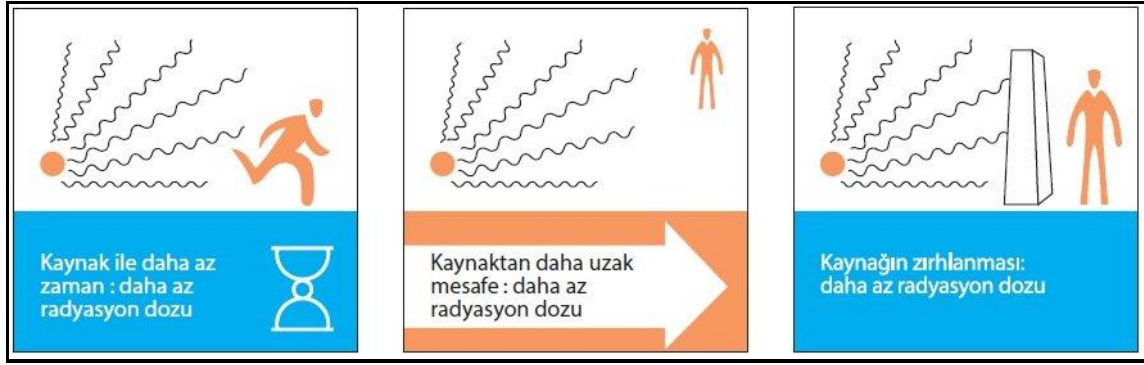
Yukarıda bahsedildiği gibi, insan sağlığı açısından ciddi risk oluşturma potansiyeline sahip olan radyasyonun zararlı etkilerinden korunabilmek için, radyasyondan korunma yollarının bilinmesi ve bu bağlamda gerekli tedbirlerin alınması önem arz etmektedir.

2.1.6. Radyasyondan korunma

Bütün insanlar hayatları boyunca doğal ve yapay kaynakların sebep olduğu iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadır. Maruziyete sebep olan süreçler ise, olaylar ve durumlar ağı olarak düşünüldüğünde, ağın her bölümünün başlangıç noktasını kaynağın oluşturduğu, radyasyon veya radyoaktif maddenin daha sonra, bireylerin radyasyona maruz kalmasına sebep olan çevresel veya diğer yollardan geçmesi sonucu doz alımının gerçekleştiği ifade edilebilir. Bu bağlamda, radyasyondan korunma yolları genellikle, maruziyete yol açan kaynak ile bireyler tarafından alınan dozlar arasındaki bağlantı çerçevesinde uygulanmaktadır (ICRP, 2007: 81).

Amacı, halkın ve çalışanların maruz kaldıkları radyasyon dozunu izin verilen değerler çerçevesinde sınırlamak olan radyasyondan korunmada (NCRP, 2005: 1) Şekil 2.2'den görülebileceği üzere, “zaman”, “mesafe” ve “zırhlama” olarak üç temel kural önemli yer tutar.

- Zaman kuralı: Radyasyon kaynağının yakınında geçirilen süre mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Kaynak yakınında geçirilen süre doğrultusunda alınan radyasyon dozu miktarı artmaktadır (Kumaş, 2009b: 39).
- Mesafe kuralı: Radyasyon kaynağından olabildiğince uzak durulmalıdır. Kaynağa olan mesafe azaldıkça maruz kalınan radyasyon dozu artmaktadır. Ters kare kanunu geçerli olup, maruz kalınan doz miktarı ile mesafenin karesi ters orantılıdır (Lombardi, 1999: 86).
- Zırhlama kuralı: Radyasyon kaynağı ile birey arasına uygun bir engel konulmak suretiyle maruz kalınan radyasyon miktarının azaltılmasıdır (Kumaş, 2009b: 40).



Şekil 2.2. Radyasyondan korunmanın temel prensipleri (URL-9)

Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (*International Commission on Radiological Protection*) (ICRP) radyasyon maruziyetine yol açan bütün eylem ve uygulamalar için; uygulamanın gerekçelendirilmesi, korunmanın optimizasyonu ve kişisel doz sınırlarının uygulanması olarak üç temel gereksinimi esas alan bir korunma sistemini tavsiye etmektedir (TAEK, 2009: 23-24).

Çeşitli ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından tavsiye edilen standartlar, üyelerinin değişmesi ve radyasyonun etkilerine yönelik verilerin sürekli güncellenmesiyle birlikte revize edilmekte olup, radyasyondan korunmanın yukarıda bahsedilen üç temel ilkesi ise değişmez olarak kabul edilmektedir. Bu ilkeler, Lamarsh ve Baratta'ya (2001/2015: 507) göre şu şekilde tanımlanmaktadır:

- Bütün radyasyon ışınlamaları potansiyel olarak zararlı olabileceği için, telafi edici bir fayda elde edilmediği sürece hiçbir kasti ışınlama haklı görülmez.
- Tüm radyasyon ışınlamaları “makul olarak gerçekleştirilebilecek ölçüde düşük” (ALARA) tutulmalıdır.
- Kişilerin aldığı radyasyon dozları tavsiye edilen belli değerlerin üzerine çıkmamalıdır.

Radyasyonla çalışanların, toplum üyelerinin ve çevrenin radyasyonun zararlı etkilerinden korunması, konu ile ilgili sistemin kurularak sürekliliğinin sağlanması ile gerçekleştirilebilir. Bu bağlamda, “radyoaktivite/doz ile ilgili niceliklerin ve birimlerin bilinmesi, gerekli ölçümlerin yapılabilmesi ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilebilmesi” elzemdir (Zeyrek, 2013). Planlanmış ışınlamalarda radyasyona maruz kalma durumunda; radyasyonla çalışanların ve halkın alabileceği dozların Çizelge 2.4'te gösterilen sınır değerleri aşmaması gerekliliği, ülkemizde 29 Mayıs 2018 tarihli ve 30435 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan

“Nükleer Tesislerde Radyasyondan Korunma Yönetmeliği” ile belirtilmiştir. Doğal radyasyon ve tıbbi ışınlanmalar nedeniyle alınan dozların, Çizelge 2.4’te belirtilen doz sınırlarına dâhil edilmeyeceğinin belirtildiği söz konusu yönetmelikte ayrıca; “18 yaşından küçükler radyasyona maruz kalmaya neden olabilecek bir görevde çalıştırılmaz” ve “harici çalışanlar da dâhil olmak üzere radyasyonla çalışanlar, hamilelik ve emzirme dönemlerinde durumlarını Kuruluşa bildirmelerinden itibaren radyasyona maruz kalma riski taşıyan işlerde görevlendirilemez” hususları ifade edilmektedir (URL-10).

Çizelge 2.4. Doz sınırları (URL-10’da yer alan veriler doğrultusunda oluşturulmuştur)

Doz sınırları	Radyasyonla çalışanlar	Halk
Yıllık etkin doz (ardışık 5 yılın ortalaması)	20 mSv	1 mSv
Yıllık etkin doz (tek yıl)	50 mSv (ardışık 5 yılın ortalaması 20 mSv’yi geçmemek kaydıyla)	1 mSv (ardışık 5 yılın ortalaması 1 mSv’yi geçmemek ve gerekçelendirme yapmak kaydıyla daha yüksek sınırlara izin verilebilmektedir)
El, kol, ayak ve cilt ⁴ için yıllık eşdeğer doz	500 mSv	50 mSv
Göz merceği için yıllık eşdeğer doz	50 mSv (ardışık 5 yılın ortalaması 20 mSv’yi geçmemek kaydıyla)	15 mSv

Radyasyondan korunmak için uygulanabilecek yöntemleri bilmek ve gerektiği şekilde uygulamak, hayatımızın vazgeçilmez parçası haline gelen yapay radyasyon kaynaklarından alınacak dozu kabul edilebilir seviyelerde tutabilmek için gereklidir. Bu yöntemler arasında zırhlama, radyasyonun zararlı etkilerinden korunabilmek adına radyasyondan korunmada önemli bir yere sahiptir.

2.2. Radyasyon Zırhlaması

Bu bölümde radyasyon zırhlaması ile ilgili tanımlara, terminolojiye, radyasyon zırhlaması gerektiren cihaz ve uygulamalara, radyasyon zırhlaması için kullanılan yapı malzemelerine ve mimari projelerde dikkat edilmesi gereken genel hususlara yer verilmiştir.

⁴ “Cildin radyasyon dozuna maruz kalan herhangi bir alanının 1 cm² üzerinden alınan ortalama eşdeğer dozu, cilt eşdeğer dozu olarak kabul edilir” (URL-10).

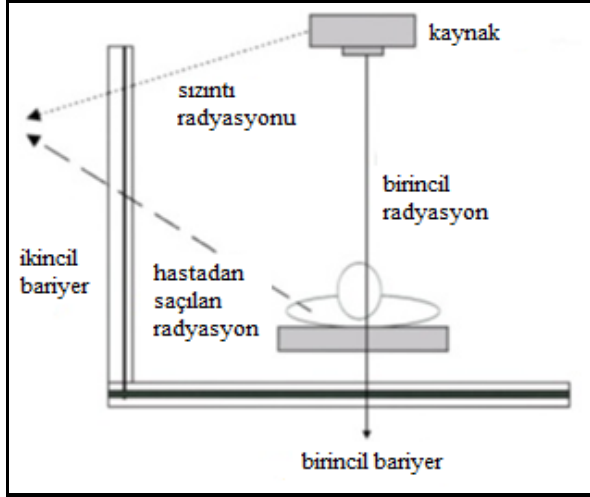
2.2.1. Radyasyon zırhlaması ile ilgili tanımlar ve parametreler

Kaynak ve alıcı arasına yerleştirilen çeşitli malzemelerle alıcıya geçen radyasyon miktarına müdahale edilebilmesini sağlayan zırhlar; özellikleri, tasarımları, kullanımları ve etkinlikleri bağlamında özel şartları belirlemektedir (Martin, 2006/2013: 367). Zırhlama, zırh malzemesinin maliyet, ulaşılabilirlik, imalat kolaylığı ile zırhın boyut, ağırlık gibi özellikleri arasında kurulacak bir denge çerçevesinde tasarlanmaktadır (URL-13).

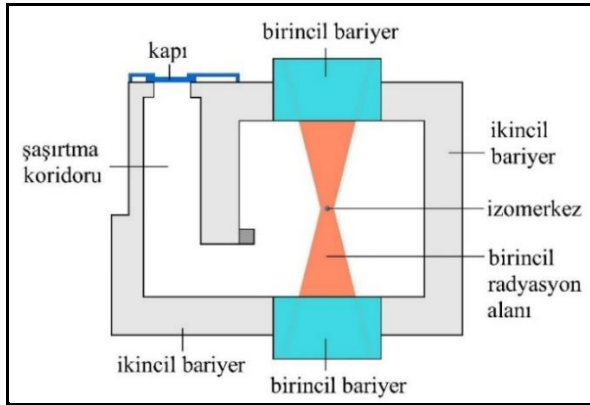
TAEK tarafından yayımlanan “Tıbbi Radyoloji Uygulamalarının Yapıldığı Odaların Tasarımında Dikkat Edilecek Hususlara ve Zırhlama Koşullarına İlişkin Kılavuz” a göre; zırhlama tasarımı “cihazın kullanım amacı ve teknik özellikleri, oda içindeki yerleşim durumu, haftalık tahmini iş yükü ve cihazın bulunduğu odanın duvar, tavan ve zemin yapı malzemesinin cinsi, kalınlığı ve yoğunluğu ile bitişik alanların kullanım amacı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir” (URL- 14). Çeşitli parametrelerin bir araya gelmesiyle hesaplanan değerler sonucunda ortaya çıkan zırhlamada; kaynağın ve kaynağın bulunduğu mekanın özellikleri, zırh malzemelerinin özellikleri ile zırh tipi gibi unsurları etkileyen çeşitli parametreler bulunmakla birlikte (Kılınçarslan, Başyigit, Molla ve Sancar, 2011) bu parametrelerden birinin dâhi değişmesi veya hatalı olarak bulunması, radyasyona karşı oluşturulan zırhın yetersiz kalmasına ve dolayısıyla radyasyondan korunmanın gereken şekilde sağlanamamasına yol açmaktadır (Kaçar, 2006: 53-54).

Radyasyon zırhlaması için anlaşılması gereken en önemli kavramlardan biri olan birincil radyasyon, hasta tedavisi için kullanılan cihazdan doğrudan yayılan radyasyonu tanımlarken, ikincil radyasyonu ise, saçılan ve sızıntı radyasyonları ifade etmektedir (NCRP, 2005: 11). Önemli bir diğer tanım olan “birincil engel” (birincil bariyer); “radyasyon demetinin doğrudan yönlendirildiği engel”, “ikincil engel” (ikincil bariyer) ise “radyasyon demetinin doğrudan yönlendirilmediği, ancak sızıntı ve saçılan radyasyonun yönlenebileceği engel” olarak tanımlanır (URL-16). Bir radyoterapi ünitesi için örneğin; ikincil bariyere göre daha kalın olup, birincil radyasyonu durdurmak için tasarlanan birincil bariyer; duvar, döşeme (tavan ve zemin) veya radyasyonu durdurmaya yarayacak başka elemanlardan oluşur. İkincil bariyer ise, Şekil 2.3’ten de görülebileceği gibi “sızıntı radyasyon, hastadan saçılan radyasyon, duvardan saçılan radyasyon ve cihaz kafası veya oda içerisindeki saçılmalarla üretilen ikincil radyasyonlara” karşı cihaz odasının dışındaki

bireyleri yeterli oranda korumak için tasarlanır (NCRP, 2005: 11, 32). Birincil ve ikincil bariyerlere ilişkin şematik bir plan Şekil 2.4 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Radyasyon ve bariyerlere ilişkin bir şema (NCRP, 2005: 11)



Şekil 2.4. Birincil ve ikincil bariyerlere ilişkin şematik bir plan⁵

“Radyasyon kaynaklarının kullanılacağı, imal edileceği veya bulundurulacağı radyasyon uygulamalarının yürütüldüğü yapılar ve radyasyon tesisleri için mimari projelerin radyasyon güvenliği yönünden uygunluğunun değerlendirilmesinde” kullanılan zırhlama hesaplamaları parametreleri TAEK tarafından yayımlanan “Zırhlama Hesaplamaları Kılavuzu” çerçevesinde şu şekilde açıklanmaktadır:

- Tasarım dozu⁶ (P): “zırhlama hesaplamalarında esas alınan doz sınırı”

⁵ Sağlık Bakanlığı (2018:12) verilerinden faydalanılarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

⁶ Radyasyon alanları (radyasyondan korunmaya ilişkin önlemlerin alındığı ve giriş çıkışların kontrol altında tutulduğu alanlar) ile toplum üyesi kişilerin bulunabilecekleri alanlara göre tasarım dozları belirlenmektedir (URL-16).

- Mesafe (d): “birincil ve ikincil ışınlamaların hesaplanmasında radyasyon kaynağının bulunduğu konumdan itibaren zırhlaması yapılacak alana olan uzaklığı”
- Meşguliyet faktörü (T): “engelin arkasındaki alanın meşgul edilme oranı” (Çizelge 2.5 ile alanların meşguliyet faktörleri sunulmuştur)
- İşyükü (W): “radyasyon kaynağından haftalık ışınlama süresince bir metre mesafede maruz kalınan ışınlama miktarı”
- Kullanma faktörü (U): “birincil radyasyon demetinin ilgilenilen engele yönlendirilme oranı”
- Yarı kalınlık değeri (HVL): “radyasyon demeti şiddetini yarı değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlığı”
- Onda bir kalınlık değeri (TVL): “radyasyon demeti şiddetini onda bir değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlığı”
- Gama sabiti (Γ): “birim aktivitenin birim mesafedeki doz hızı”
- Zayıflatma (geçiş) faktörü (k): “hesaplanan iş yükünün tasarım dozu miktarına düşürülme oranı”
- Zırh malzemesi yoğunluğu (URL-16).

Çizelge 2.5. Alanlara göre meşguliyet faktörleri (URL-16)

Meşguliyet Faktörü	Alanlar
T= 1 (Tam meşguliyet)	Kumanda ünitesi/paravan/sıcak hücre, ofis, rapor odası, danışma/hasta kayıt alanı, laboratuvar, poliklinik, doktor/hemşire/muayene/yataklı tedavi odası, teşhis/tedavi cihazı bulunan oda, ameliyathane, yoğun bakım ünitesi, çocuk oyun alanı*, mesken*, işyeri/dükkan*, PET enjeksiyon odası, derslik, boş oda, kafe/restoran, şaşırtma koridoru
T= 1 / 2 (Yarım meşguliyet)	Nükleer tıp enjeksiyon odası, efor odası, mutfak**, çamaşırhane**, hasta gözlem odası**
T= 1 / 5 (Kısmi meşguliyet)	Bekleme yapılan salon/koridor, konferans/eğitim salonu, personel dinlenme odası, araştırma/kalite kontrol/sıcak oda/radyofarmasi laboratuvarı, yataklı tedavi hasta odası
T= 1 / 8 (Kısmi meşguliyet)	Kontrollü alandaki koridorlara açılan kapılar
T=1 / 20 (Aralıklı meşguliyet)	Tuvalet, depo**, havalandırma boşluğu, baca çıkışı, asansör, hasta karşılama/geçiş koridoru, morg, bahçe/avlu, teknik oda, bina içi merdiven, hasta soyunma kabini, arşiv**, otopark**
T=1 / 40 (Nadir meşguliyet)	Radyoaktif atık odası, trafığe açık cadde/sokak/yol, yangın merdiveni, çatı/teras

* Radyoterapi uygulamalarında mevzuat gereği izin verilmez.

** Tam meşgul edilmesi durumunda T=1 alınır.

Yukarıda radyasyon zırhlamasıyla ilgili tanımlara ve zırhlama hesaplamalarına esas parametrelere yer verilmiş olup, ilgili faktörlerin tümünün değerlendirilmesiyle radyasyon uygulamalarının yapıldığı alanlarda radyasyondan korunma ilkelerinden zırhlamanın etkin ve doğru şekilde uygulanması mümkün olmaktadır.

2.2.2. Radyasyon zırhlaması gerektiren uygulama ve cihazlar

Radyasyon kaynağı bulunduran; sağlık yapıları, endüstriyel tesisler, nükleer araştırma ve güç reaktörleri, hızlandırıcı tesisleri gibi yapılarda radyasyonun zararlı etkilerinden korunabilmek için zırhlama ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde de çeşitli uygulamalar çerçevesinde radyasyon geniş bir kullanım alanına sahip olmakla birlikte, zırhlama gerektiren alanlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Radyoterapi uygulamalarının yapıldığı ve/veya simülasyon cihazlarının bulunduğu odalar,
- Tıbbi radyoloji uygulamalarının yapıldığı odalar,
- Nükleer tıp uygulamalarının yapıldığı üniteler (teşhis ve ayakta tedavi),
- Radyoaktif madde ile yataklı tedavi yapılan üniteler,
- Endüstriyel uygulamaların yapıldığı kapalı alanlar,
- Hızlandırıcı tesisleri,
- Radyoizotop üretim veya radyofarmasötik hazırlama tesisleri (URL-17).

Radyasyonun en yoğun şekilde kullanıldığı uygulamalardan biri olan tıbbi radyoloji uygulamaları kapsamında grafi⁷ ve skopi⁸ cihazları yaygın olarak kullanılmakta olup, anjiyografi cihazı, bilgisayarlı tomografi (*Computed Tomography*) (CT) cihazı, mamografi cihazı, kemik yoğunluğu ölçümü cihazları radyoloji uygulamalarında kullanılan cihazlardır (URL-4). Hastalıkların teşhisinde yaygın şekilde kullanılmakta olan radyoloji yöntemi ayrıca, diş hekimliği uygulamalarında teşhisin yanı sıra, tedavi esnası ve sonrasında kontrol amaçlı olarak kullanılmaktadır. Periapikal, panoramik diş röntgen cihazları ile dijital volumetrik tomografi cihazı söz konusu uygulamalar çerçevesinde kullanılan cihazlardandır (URL-18). Ayrıca, tek tüplü röntgen, tomografi, C kollu skopi gibi cihazlar aracılığıyla diğer bir alan olarak veterinerlikte radyoloji uygulamaları yapılmaktadır (URL-19).

⁷ Hastadan geçen ışınların radyografik film üzerine düşürülerek görüntü elde edilmesi (URL-4)

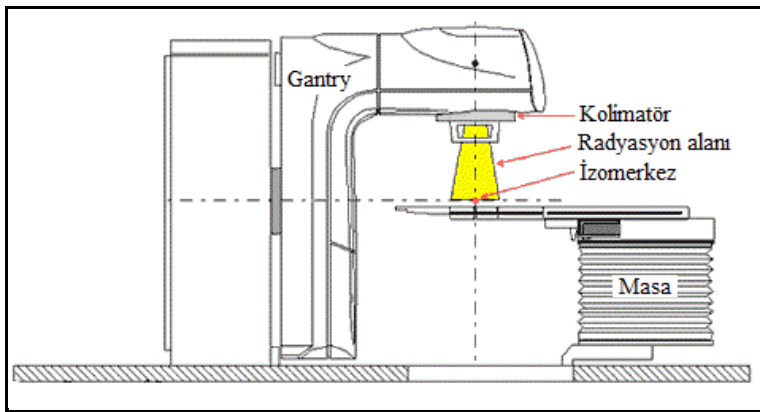
⁸ Hastadan geçen ışınların görüntü şiddetlendirici vasıtasıyla bir monitöre aktarılarak görüntü elde edilmesi (URL-4)

Radyasyonun yoğun şekilde kullanıldığı tıbbi uygulamalardan bir diğeri olan radyoterapi, tümörün bulunduğu veya riskli olan bölgeye, yüksek enerjili radyasyon verilerek, sağlıklı hücrelere ise olabildiğince zarar verilmeden kanserli hücrelerin tahrip edilmesinin amaçlandığı, kapsamında yüksek teknoloji ve bilgisayar destekli cihazların kullanıldığı tedavi yöntemidir (URL-8).

Radyoterapi uygulamaları, eksternal radyoterapi (teleterapi) ve internal radyoterapi (brakiterapi) olmak üzere iki ana teknik çerçevesinde uygulanmaktadır. Co-60 radyoizotopunu ışın kaynağı olarak kullanan Co-60 cihazı ile yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalarla elektronların hızlandırılması prensibiyle çalışan, elektronların bir hedefe çarptırılarak X-ışını elde edildiği, Şekil 2.5'te örnekleri görülebilen lineer hızlandırıcılar (*linear accelerator*) (LINAC) (Şekil 2.6) eksternal radyoterapi (teleterapi) uygulamalarında en çok kullanılan cihazlardır. LINAC cihazları ile 4-25 Milyon Elektron Volt (MeV) enerjili elektronlar ile 4-25 Milyon (Mega) Volt (MV) enerjili X ışınları elde edilebilmektedir (URL-8).



Şekil 2.5. LINAC cihazları (Sağlık Bakanlığı, 2018: 1)



Şekil 2.6. LINAC cihazı (URL-11)

Radyoterapi uygulamaları kapsamında günümüzde, hastanın tedavi sonrasında da yaşam kalitesini sürdürebilmesi amacıyla, sağlıklı dokuların daha çok korunabildiği, sadece kanserli bölgenin hedef alındığı teknikler, kanserli dokuların geniş bir alanda yok edildiği tekniklerin yerini almıştır (URL-12). Bu kapsamda, yüksek hassasiyetli yoğunluk modülasyonlu radyoterapi (*Intensity-Modulated Radiation Therapy*) (IMRT), yoğunluk modülasyonlu ark terapi (*Volumetric Modulated Arc Therapy*) (VMAT) gibi uygulamalar yapılmaktadır (Sağlık Bakanlığı, 2018: 4-5). İleri radyoterapi tekniklerinin daha güvenilir şekilde uygulanmasına imkân tanıyan görüntü kılavuzluğunda radyoterapi sistemiyle de (*Image-Guided Radiation Therapy*) (IGRT), tedavi öncesinde görüntüleme ve tedavi esnasında ise tümörün takibinin yapılması sağlanmaktadır (Şenkesen, Göksel ve Küçük, 2016).

Radyoterapi uygulamaları kapsamında ayrıca çok küçük tümörleri noktasal olarak ışınlatabilen stereotaktik cerrahi uygulamaları da yapılmakta olup, gama bıçağı (*gamma-knife*) ve robot kollu lineer hızlandırıcı siber bıçaklar (*cyber-knife*) söz konusu uygulamalar kapsamında kullanılmakta olan cihazlardır (URL-4). İçerisine yerleştirilen lineer hızlandırıcı ile kanserli hücrelerin nokta atış tekniği ile hedef alındığı, 3 boyutlu üst düzey görüntüleme ve ışın tedavisi imkânı sağlayan tomoterapi cihazları (URL-21) ile tedavi öncesinde görüntüleme ve tümör lokalizasyonu için kullanılan tanısal X-ışını cihazı olan simülatörler eksternal radyoterapi uygulamaları kapsamında kullanılmaktadır (URL-7). Radyoterapinin bir diğer uygulama şekli olan brakiterapi ise, radyoaktif kaynak ya da kaynağı taşıyan aygıtların vücut yüzeyine, doku içine veya vücut boşluklarına yerleştirilmesi ile uygulanan yöntemdir (URL-8).

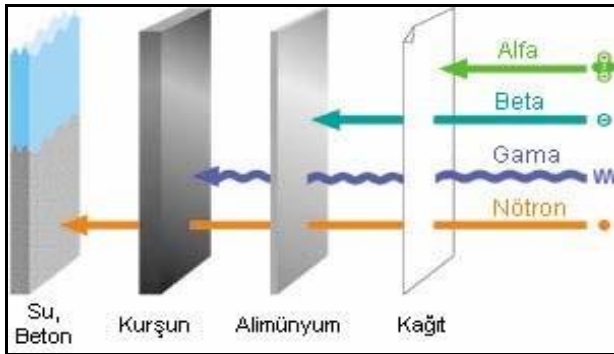
Radyasyon zırhlamasına ihtiyaç duyulan tıbbi uygulamalardan bir diğeri ise nükleer tıptır. Bu uygulama kapsamında; ilgili organa göre seçilen radyofarmasötüğün, radyoaktif bir izotopla kimyasal olarak bağlanıp hastaya verilerek, organdan çıkan ışınların algılanmasıyla çalışan görüntüleme sistemleri temel olarak; tek foton emisyon bilgisayarlı tomografisi (*Single Photon Emission Computed Tomography*) (SPECT) ile pozitron emisyonu tomografisi (*Positron Emission Tomography*) (PET) olarak sınıflandırılır (URL-4). SPECT, SPECT-CT, PET, PET-CT gibi cihazların kullanıldığı üniteler ile radyoaktif madde ile yataklı tedavi üniteleri radyasyon zırhlaması gereksinimine sahip alanlardandır (URL-16).

Endüstriyel uygulamalar kapsamında da X-ışını radyografi, X-ışını radyoskopi, endüstriyel gamagrafi gibi cihazlarla radyasyon uygulamalarının yapıldığı kapalı alanlarda zırlama ihtiyacı ortaya çıkmaktadır (URL-16).

Yukarıda da bahsedildiği gibi, radyasyon zırlaması gerektiren farklı uygulama ve cihazlar bulunmaktadır. Bu uygulamaların yapıldığı mekanlarda radyasyonun zararlı etkilerinden korunabilmek için kullanılacak yapı malzemelerinin doğru şekilde tespit edilmesi tasarım için önemli unsurlardan biridir.

2.2.3. Zırh malzemesi olarak kullanılan yapı malzemeleri

Radyasyondan korunma konusunda önemli bir işlevi yerine getiren “zırlama” için kullanılacak malzemeler; malzemenin kimyasal bileşimi ve radyasyon zayıflatma katsayısı ile radyasyonun enerjisi ve türü gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmektedir (Kılınçarslan ve diğerleri, 2011). Zırh malzemesi seçiminde radyasyonun türü önemli bir faktör olmakla birlikte, farklı radyasyon çeşitleri, farklı enerjileri ve giricilik özellikleri bağlamında uygun malzemeler ile zırhlanırlar. Parçacık ve dalga tipi radyasyon türlerinin, madde içerisine nüfuz etme özelliklerine ve enerjilerini soğurucu malzemelere yönelik bir karşılaştırma Şekil 2.7 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Radyasyon çeşitlerinin malzemelere giricilikleri (Kılınçarslan ve diğerleri, 2011)

Büyük kütleleri ve yükleri sebebiyle havada bile çok kısa (1-2 cm) menzile sahip olan, ince bir kâğıt veya cilt tarafından tamamen soğrulabilen alfa parçacıkları (TAEK, 2009: 7) Şekil 2.7’den de görülebileceği üzere, en düşük giricilik özelliğine sahip radyasyon çeşididir. Ortalama menzilleri havada birkaç metre (m), yoğun malzemelerde ise yalnızca birkaç milimetre (mm) olan küçük kütleli beta parçacıkları (Martin, 2006/2013: 368) ise plastik,

cam ya da metal tabakalar ile tamamen durdurulabilmekte ve genellikle cildin üst tabakasından öteye geçememektedir (TAEK, 2009: 7).

Alfa ve beta parçacıklarından çok daha yüksek giricilik özelliğine sahip olan X ve gama ışınları ile nötronlar ise, ilgili faktörlere göre yapılacak hesaplamalar çerçevesinde zırhlamayı gerektiren radyasyon çeşitleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektromanyetik radyasyon çeşitleri olan X-ışınları ile gama ışınları, zırhlama için yüksek yoğunluk ve atom numarasına sahip malzemelere ihtiyaç duymakla birlikte, malzeme yoğunluğunun artması bu ışınlar için daha iyi zırhlama özelliği sağlamaktadır (Kılınçarslan ve diğerleri, 2011). Bir diğer önemli radyasyon çeşidi olan nötronlar ise, yüksüz olmalarından dolayı madde içine nüfuz etme özelliği ve bu sebeple zırhlama ihtiyacı çok yüksek olan (TAEK, 2009: 8) ve zırhlama için hidrojen içeren malzemelere ihtiyaç duyan parçacık tipi radyasyon çeşididir (NCRP, 2005: 69).

Maruz kalınacak radyasyon dozunu kabul edilebilir seviyelere indirmek zırhlamada esas olmakla birlikte, bu anlamda, zırh malzemesinin yoğunluğu ve kalınlığına bağlı radyasyon zayıflatma özelliği önem taşır. Radyasyonu zayıflatmak amacıyla, yeterli kalınlıkta kullanıldığı takdirde birçok malzeme zırhlama için kullanılabilse de malzemelerde kullanılan büyük kalınlıklar, ekonomik problemlerle birlikte alan kaybına yol açar. 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 (Waly ve Bourham, 2015).

Zırh malzemelerinin etkin ve verimli kullanımı ve optimum tasarım stratejilerinin geliştirilmesi ilgili disiplinler arası bir iletişim ve işbirliği gerektirmektedir (NCRP, 2005:16). Zırhlama için kullanılan farklı malzemeler olmakla birlikte, konu ile ilgili yapılan deneysel ve kuramsal çalışmalar ile araştırmacılar tarafından, kurşun ve normal beton gibi geleneksel malzemelerin kullanımlarındaki çeşitli zorluklara karşı alternatif malzemeler sürekli olarak araştırılmaktadır.

Kurşun

Radyasyon zırhı olarak kullanılacak malzemenin yoğunluğu ve atom numarası arttıkça X ve gama ışınlarını zırhlama kabiliyeti de aynı doğrultuda artmakta olup, zırhlama için

kullanılabilecek geniş kullanım alanına sahip malzemeler içinde atom numarası en yüksek malzeme (82) kurşundur (Kılınçarslan ve diğerleri, 2011). Fotonlar için çok iyi bir zırhlama malzemesi olan kurşun, nötronlar için ise uygun bir malzeme olmaması, hatta yanlış kullanımda nötron kaynağı haline gelebilmesi sebebiyle, yüksek enerjili radyasyon uygulamalarında belirli önlemler dâhilinde kullanılması gereken bir malzemedir (NCRP, 2005: 81).

Özellikle tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olan, 11,35 gram/santimetreküp (g/cm^3) yoğunlukta olması gereken kurşun (URL-16), pek çok avantajlı yönüyle mevcut zırha ek olarak veya yeni üretilen yapılarda farklı formlarda zırhlama için tercih edilmektedir. Bu formlardan biri olarak kilitli (*interlocking*) kurşun tuğla (Resim 2.1) radyasyon zırhlaması için gereksinim dâhilinde kullanılabilen bir malzemedir (URL-24). Ayrıca, farklı ebat ve kalınlıklarda kurşun levha, kurşun kaplı alçı duvar paneli, kurşun kaplı kontrplak, kurşunlu cam ve akrilik, kurşun kaplı kapı ve pencere kasası gibi formlarla kurşun, gereksinim doğrultusunda zırhlama malzemesi olarak radyasyon uygulamalarının yapıldığı alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (URL-23).



Resim 2.1. Kurşun tuğla uygulaması (URL-24)

X ve gama ışınları için yüksek zırhlama kabiliyeti, yaygın kullanımı ve yüksek işlenebilirlik gibi avantajlı özelliklerine karşın, kurşun malzemenin kullanımında birtakım dezavantajlar da bulunmaktadır. Yumuşak bir malzeme olması sebebiyle kendi ağırlığını taşıyamayarak ikinci bir yapısal desteğe ihtiyaç duymasının yanı sıra, ağır bir metal olarak toksisitesinin yüksek olması, özellikle tıbbi alanlardaki kullanımı açısından büyük problem yaratmaktadır. Bu durum kurşunu zırhlama için kullanırken birtakım önlemler (beton içinde kullanmak, alçı panel gibi malzemelerle kaplamak gibi) alınmasını gerektirmektedir (NCRP, 2005: 71).

Yukarıda da belirtildiği gibi, fotonlar için ideal zırhlama malzemesi kurşun iken beton, nispeten yüksek hidrojen içeriğiyle özellikle nötronların ortaya çıktığı yüksek enerjili (10 MV üzeri) radyasyon uygulamalarının yapıldığı mekanlarda hem foton hem de nötron zırhlaması için kullanılan etkili bir malzemedir (IAEA, 2006: 20).

Beton

Radyasyona karşı koruma sağlamak amacıyla kullanılan birçok malzemeye göre üstün yapısal özellikleri ve üretimindeki malzeme çeşitliliğine ek olarak; nispeten düşük maliyeti, kolay üretimi ve istenilen form verilebilme özellikleriyle beton, çok yönlü bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Waly ve Bourham, 2015). Kurşuna göre kıyaslandığında, yoğunluğu sebebiyle zırhlama için daha az etkili bir malzeme olmasına karşın beton, birçok avantajlı yönüyle zırhlama gerektiren binalarda tercih edilen temel malzemelerden biri haline gelmiştir (Akkurt, Akyıldırım, Mavi, Kilincarslan ve Basyigit, 2010). Diğer taraftan, genellikle en ucuz zırhlama malzemesi olan betonun yoğunluğunun kurşun, çelik gibi malzemeler gibi sabit olmaması yapım aşamasında kontrol sürecini zorlaştırırken, boşluk, çatlak oluşumu gibi istenmeyen durumlar için uygulama esnasında özel dikkat gerekmektedir (IAEA, 2006: 4).

Yoğunluklarına göre bir değerlendirme yapıldığında betonu; hafif, normal ve ağır beton olarak üç başlık altında sınıflandırmak mümkündür. Radyasyon zırhı olarak kullanılabilen betonun ise, TAEK tarafından yayımlanan “Tıbbi Radyoloji Uygulamalarının Yapıldığı Odaların Tasarımında Dikkat Edilecek Hususlara ve Zırhlama Koşullarına İlişkin Kılavuz” a göre; en az $2,35 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta olması gerekmektedir (URL-14). Söz konusu yoğunluğu sağlayan 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 (Shams, Eftekhari ve Shirani, 2018).

Ağır betonların ve ağır agregaların yoğunluk değerleriyle ilgili literatürde farklı tanımlamalar bulunmakla birlikte, TS EN 206-1’e (2002) göre 2600 kilogram/metreküpten (kg/m^3) daha yüksek özgül ağırlığa sahip betonlar ağır beton olarak, özgül ağırlığı 3000 kg/m^3 ’ten daha yüksek olan agregalar ise ağır agrega olarak adlandırılmaktadır (Ouda,

2015). Ağır agregalarla üretilen bu betonlarda, agreganın türü ve miktarı betonun radyasyondan koruma özelliği için önemli bileşenler olmakla birlikte, nükleer santraller, parçacık hızlandırıcı tesisleri, sağlık yapıları gibi nükleer enerjinin yoğun olarak kullanıldığı yapılarda söz konusu betonlar yaygın olarak kullanılmaktadır (Kılınçarslan, Akkurt ve Başyiğit, 2006). Genellikle alanının kısıtlı olduğu durumlarda tercih edilen, zırh kalınlıklarını ilgili faktörlere bağlı olarak önemli miktarlarda azaltabilen ağır betonun, normal betona göre yüksek maliyeti ve kullanımdaki (yapı üreticilerinin çoğunluğunun ağır beton kullanımıyla ilgili tecrübesinin olmaması, yapısal dayanım, ağır agrega kullanımı ile ilgili endişeler) ve nakliyatla ilgili çeşitli zorluklar ağır betonun kullanımı için dezavantaj yaratmaktadır (NCRP, 2005: 70).

NCRP'ye göre, ağır betonlarla ilgili problemlerin birçoğu için prekast, kilitli (*interlocking*) ağır beton bloklar alternatif çözüm sunmaktadır. Yüksek yoğunluklarda üretilen bu blokların normal betona göre maliyeti genel olarak yüksektir (NCRP, 2005: 70). Diğer yandan, nispeten kolay (uygulamada kalıp gerektirmez, minimum donatı) ve hızlı (uygulama sürecinde hava şartlarından etkilenmez, kütleme gereksinimi yoktur) uygulama süreci olan, kullanılan yoğunluğa bağlı olarak zırh kalınlıklarını azaltabilen, modüler uygulama imkânı sunan söz konusu malzeme (URL-36) (Resim 2.2), özellikle tıbbi ve endüstriyel uygulamaların yapıldığı yapılarda kullanılabilmektedir (URL-25). Resim 2.3'te bir uygulama örneği görülebilen kilitli yüksek yoğunluklu beton bloklar ise, zırhlama gereksinimine ve yapı tasarımına bağlı olarak harçlı veya harçsız şekilde (modülerlik için) uygulama imkânı bulunan, tıbbi ve endüstriyel uygulamaların yapıldığı mekanlarda mevcut zırha ek olarak veya yeni yapılarda kullanılabilen malzemelerden biridir (URL-26).



Resim 2.2. Prekast modüler beton bloklar (URL-25)



Resim 2.3. Modüler beton bloklar (URL-26)

Agreganın beton içerisindeki yüzdesini değiştirmek yerine, beton bileşimine farklı özgül ağırlıklara sahip maddeler eklenerek, yüksek yoğunluklu, zırh kalınlıklarını azaltabilecek nitelikte beton üretebilmek için araştırmacılar tarafından, farklı alternatif malzemelere yönelik araştırmalar yapılmaktadır (Waly ve Bourham, 2015). Günümüzde de ağır beton üretimi için; hematit, manyetit, limonit (Ouda, 2015) ilmenit gibi agregaların yanı sıra, barit (baryum sülfat) (BaSO_4) gibi baryum mineralleri beton içinde agrega olarak kullanılmaktadır (NCRP, 2005: 70).

Ağır beton üretimi için en çok tercih edilen ağır agrega ülkemizde kullanımı yeteri kadar yaygın olmamakla birlikte barittir. Yüksek yoğunluğu barit agregası ile, hidrojen içeriğini karma suyu ile sağlayan ve zırhlama için uygun bir malzeme olma özelliği taşıyan barit agregalı ağır betonlar, ülkemizde de barit yataklarının mevcut olması ile nispeten ekonomik ve yapımı kolay bir malzeme olarak nitelendirilebilir (Kılınçarslan ve diğerleri, 2011). Barit agregasıyla üretilen ağır betonlar için, boşluk oranı ve çatlama riski en düşük seviyede bir beton üretimi yapabilmek için kütlece su/çimento oranının 0,40' ın altında olmasını öneren Akgün, Durmuş ve Durmuş (2007) ayrıca, kullanılan ağır agreganın betonun ayrışma riskini artırdığını, homojenliğin sağlanabilmesi için geleneksel betona kıyasla daha fazla dikkat gerektiğini, harç/agrega oranının 0,70' in üstünde tutularak, boşluk oranının azaltılmasının radyasyona karşı betonun zırhlama özelliğini artıracığını önermektedirler.

Barit oranının artmasıyla birlikte betonun foton zayıflatma katsayısının doğru orantılı olarak arttığını ancak, baritli betonun hem gama ışınlarına hem de nötronlara karşı eş zamanlı koruma sağlamak amacıyla kullanılması gerektiğinde; beton içerisindeki en iyi barit oranını %53,8, en iyi yoğunluk değerini ise $3,02 \text{ g/cm}^3$ olarak öneren Akkurt ve El-Khayatt'a (2013) göre, gama ışınlarına karşı betonu daha iyi bir zırh malzemesi haline getiren barit, nötron

radasyonu için ise uygun bir malzeme değildir. Demir, Budak, Sahin, Karabulut, Oltulu, Şerifoğlu ve Un (2010) gama radyasyonu için baritin, nötron radyasyonu için ise kolemanitin beton içinde kullanılarak betonun zırhlama potansiyelinin artırılabilceğini önermektedirler.

Son yıllarda ayrıca, malzemelerde nanoteknoloji kullanımıyla ilgili birçok araştırma yapılmakta olup, Mesbahi ve Ghiasi (2018) nano parçacıkların nötron ve fotonlar için mikro parçacıklara göre daha iyi zayıflatma özelliğine sahip olduğunu, beton bileşimine dâhil edilecek nano boyutlu malzemelerin, nötron ve fotonlara karşı koruma sağlamakta etkili olacağını önermektedirler.

Yukarıda da belirtildiği gibi, birçok avantajlı yönüyle yaygın olarak tercih edilen bir zırh malzemesi olma özelliği taşıyan ve radyasyon zırhlama potansiyelini artırmak adına agrega bileşenleri için sürekli araştırmalar yapılan betonun yanı sıra, radyasyon zırhlaması için gereksinim dâhilinde kullanılan başka malzemeler de bulunmaktadır.

Diğer malzemeler

Zırhlama için yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri olan çelik, betonla kıyaslandığında nispeten pahalı bir malzeme olmakla birlikte, kurşunla karşılaştırıldığında ise toksik bir malzeme olma özelliği taşımamaktadır. İyi bir yapısal malzeme olan çelik, nötronlara karşı etkili bir malzeme olmamakla birlikte, X ve gama ışınları için zırhlama özelliği ise genel olarak kurşun ve beton arasında bir değere sahiptir (NCRP, 2005: 71).

Aynı hidrojen yüzdesine sahip polietilen ve parafinden (%14,3) parafin, polietilene göre daha ekonomik bir malzemedir, ancak daha düşük yoğunluğa sahiptir ve yanıcı bir malzeme olması sebebiyle kalıcı zırhlarda kullanılmaktan kaçınılır. Polietilen ise, nötron zırhlama özelliği çok iyi bir malzeme olmakla birlikte nispeten pahalıdır. Üretimi kolay ve daha sağlam bir malzeme olan polietilen, saf olarak veya değişik oranlarda bor içeriğiyle nötron zırhlaması için yaygın olarak kullanılmakta olup, standart borlu polietilen (*borated polyethylene*) (BPE) ağırlıkça %5 bor içermektedir (NCRP, 2005: 71).

Bor ve kadmiyum gibi malzemeler nötron zırhlaması için etkili malzemeler olmakla birlikte (IAEA, 2006: 20) kolemanit, tinkal, üleksit gibi minerallere sahip, Türkiye'nin en önemi yeraltı cevherlerinden biri olan ve nötronları zırhlamadaki yüksek potansiyeli sebebiyle,

nükleer reaktörlerde de sıklıkla kullanılan bor cevherinin, atıklarının ve bileşiklerinin zırhlama malzemesi olarak kullanılmasıyla ilgili günümüzde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır (Oto, Gür, Kaçal, Doğan ve Arasoğlu, 2013).

Cam, birçok avantajlı yönü ve özellikle şeffaflık sağlaması özelliğiyle sağlık yapılarının gözlem gerektiren mekanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Waly, Al-Qous ve Bourham'a (2018) göre; düşük enerji aralığındaki gama ve X-ışınlarına yönelik uygulamalarda, cama eklenen kurşun ve/veya bizmut oksit katkılarının miktarlarıyla doğru orantılı olarak malzemenin yoğunluğu, dolayısıyla radyasyon zırhlama kapasitesi artmaktadır.

Kil tuğlası ve cüruf briketi vb. malzemeler de 500 kilovolt (kV) enerjiye kadar olan uygulamalarda, kurşun ve çelik ile birlikte zırhlamada kullanılabilmektedir (IAEA, 2006: 19). Sağlık yapılarında yaygın olarak kullanılan alçı duvar panelleri yüksek enerjili ışınlar için etkili olmasa da, mamografide kullanılan düşük enerjili X-ışınlarının zayıflatılmasını sağlayabilmektedir (NCRP, 2004: 17). Diğer bir malzeme olarak ahşap ise ucuz, temini ve imalatı kolay fakat düşük yoğunluğa sahip bir malzeme olup, selüloz formuyla geçici zırhlama (kapı gibi) için kullanılabilmektedir. Ayrıca toprak, iyi tanımlanabilir bir malzeme olmamakla birlikte, genel olarak yoğunluğu değişkendir. Kısmen veya tamamen yer altında konumlandırılan mekanlar için zırhlama için kullanılabilen malzemelerden biri haline gelmektedir (NCRP, 2005: 72). Ek olarak; tungsten ve uranyum gibi metaller, özellikle nükleer reaktörlerde gama zırhlaması için tercih edilen malzemelerdendir (Martin, 2006/2013: 660).

Radyasyon zırhlaması için kullanılan bazı yapı malzemelerinin özelliklerine ilişkin IAEA tarafından yapılan bir değerlendirme Çizelge 2.6 ile gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Zırhlama için kullanılan bazı yapı malzemeleri ve özellikleri (IAEA, 2006: 19)

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özellik
Beton	2350	Mineral içeriği değişkendir.
Baritli beton	3400-3500	Ağır beton için sıklıkla tercih edilir, yüksek maliyetlidir.
Demir cevheri	4000-5400	Yoğunluk, bileşenlerin oranına göre değişmektedir.
Kil tuğlası	1600	500 kV'luk enerjye kadar olan uygulamalarda kurşun veya çelik zırhlama ile birlikte kullanılabilir.
Cüruf briketi	1100-1400	
Toprak dolgu	1600	Yer altında inşa edilmiş mekanlar için kullanılabilir.
Çelik	7900	Genellikle mevcut bir tedavi odasında ilave zırhlama malzemesi olarak kullanılır.
Kurşun (katı)	11 340	

Yukarıda da belirtildiği gibi, radyasyon zırhlaması için kullanılabilecek pek çok farklı malzeme olmakla birlikte, ilgili tüm faktörlerin değerlendirilmesi ışığında yapılacak uygun malzeme seçiminin yanı sıra, tasarım aşamasında ilgili parametrelere bağlı olarak mimari projelerde dikkat edilmesi gereken birtakım unsurlar da bulunmaktadır.

2.2.4. Radyasyon zırhlamasına yönelik mimari projelerde dikkat edilmesi gereken genel hususlar

“Özel bir alanda, özel bir problem için uygun çözüm arayışı” olarak tanımlanabilen “mimari tasarım”ın (Erman ve Yılmaz, 2017) öne çıktığı alanlardan birisi de radyasyon uygulamalarının yapıldığı mahallerdir. Tıbbi uygulamalar ise, günümüzde radyasyonun en çok kullanıldığı alanların başında gelmekte olup, sağlık yapıları kapsamında radyasyon uygulamalarının yapıldığı mekanlar, esneklik kurgusu dâhilinde değerlendirilmesi gereken, yeni cihazlar ile uygulama veya kullanımdaki değişiklikler, artan iş yükü, bitişik alanların meşguliyet faktörlerindeki değişiklikler gibi gelecekte ortaya çıkması olası ihtiyaçların tasarım aşamasında dikkate alınmasını gerektiren alanlardır. Ayrıca, geniş enerji aralığında ve farklı tipte cihazlar ile klinik teknikler kullanılmasına bağlı olarak zırhlama gereksinimlerinde önemli farklılıklar oluşmakta olup, özellikle zırhlamanın çok yüksek maliyetli olduğu yüksek enerji aralığında dikkatli ve doğru planlama, kayda değer tasarrufla sonuçlanabilmektedir (NCRP, 2005: 13).

Radyasyon uygulamalarının yapıldığı mekanlarda, uygulamaya ve kullanılan cihaza bağlı olarak, radyasyon zırhlamasına yönelik mimari projelerde dikkat edilmesi gereken farklı hususlar bulunmakla birlikte, söz konusu mekanların genel olarak; alt, üst veya bitişik alanlarının daimî mesken olarak kullanılmaması, zemin veya bodrum katların hasta ve personel yoğunluğunun en az olduğu noktalarında ve diğer bölümlerden bağımsız olarak konumlanması gereklidir. Personel ve hastaların rahat şekilde kullanımını sağlayacak büyüklükte bir tasarım yapılmalı, mekanlara erişim tek noktadan sağlanarak, mekan içinde birden fazla cihaz bulundurulmamalıdır (URL-27). Ayrıca, radyasyon uygulamalarının yapıldığı bazı alanlar için (nükleer tıp uygulamalarının yapıldığı üniteler ile radyoaktif madde ile yataklı tedavi yapılan üniteler gibi) mekanlar, radyoaktivite miktarları doğrultusunda, ünitenin girişinden itibaren en düşük aktiviteden en yüksek aktiviteye doğru konumlandırılmak suretiyle bir planlama yapılmalıdır (URL-28); (URL-29).

Radyasyon uygulamalarının yapıldığı alanlarda genel olarak; “çivi, boru deliklerinin ve elektrik, havalandırma, ısıtma tesisatlarının, kumanda üniteleri ile cihazların bağlantı kablolarının zırhlama bütünlüğünü bozmaması sağlanmalıdır” (URL-27); (URL-28). Ayrıca; duvar ve döşeme elemanlarının içinden geçen elektrik ve mekanik tesisat elemanlarından kaynaklanan boşlukların radyasyon korumasına zarar vermemesi için gereksinim dâhilinde, ilave zırhlama (kurşun gibi) yapılmalı ve bu malzemenin kalınlığı yerine geçtiği malzemeye eşdeğer oranda zırhlama sağlayacak nitelikte olmalıdır (NCRP, 2004: 22).

Farklı malzemelerin birleşim noktalarının zırhlamanın bütünlüğü bozulmayacak şekilde tasarlanması önemli bir husustur. Zırhlama için derz gerektiren malzemeler (blok veya tuğla gibi) kullanıldığında derzler için kullanılacak harcın en az malzemenin yoğunluğuna sahip olması ve derzlerin şaşırtmalı olarak uygulanması gereklidir (NCRP, 2005: 74). Özellikle tıbbi radyoloji uygulamalarının yapıldığı alanlarda sıklıkla kullanılan kurşun levhaların birleşim yerlerinde zırhlamanın devamlılığı sağlanmalıdır (NCRP, 2004: 16). TAEK tarafından yayımlanan “Tıbbi Radyoloji Uygulamalarının Yapıldığı Odaların Tasarımında Dikkat Edilecek Hususlara ve Zırhlama Koşullarına İlişkin Kılavuz” kapsamında; zırhlama yapılacak alanlarda kullanılacak kurşun levhaların en az 1 santimetre (cm) üst üste binecek şekilde birleşim yerlerinde uygulanması, zırhlaması gereken duvar, kapı ve kasalar arasında boşluk bulunmaması, pencerelerin pervazları da dâhil, duvar zırhı kadar kurşun ile kaplanması gereklilikleri belirtilmektedir. Ayrıca, zırhlaması gereken alanlarda açıkta

kurşun kalmaması sağlanarak, uygun malzemeler (alçı panel gibi) ile kaplanmalıdır. Duvarlarda kurşun kaplama yükseklikleriyle ilgili farklı gereklilikler bulunmakta olup, örneğin teşhis laboratuvarlarında (bilgisayarlı tomografi odaları hariç) duvarlara monte edilecek kurşun plakalar için yükseklik, döşemeden itibaren 2,0 metre (m) olmalıdır (URL-14). Nükleer tıp uygulamalarının yapıldığı mekanlarda ise farklı olarak, zırhlamanın zeminden tavana kadar yapılması gerekliliği bulunmaktadır (URL-28).

Tez kapsamında radyasyon zırhlamasına yönelik yapısal detayları ele alınacak olan LINAC mekanlarını da kapsayan, radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların mimari projelerinde dikkat edilmesi gereken genel hususlar TAEK tarafından yayımlanan “Radyoterapi uygulamalarının yapıldığı ve/veya simülasyon cihazlarının bulunduğu odaların zırhlanmasına ilişkin mimari projede bulunması gerekli hususlar” kapsamında aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Cihazın/kaynağın bulunduğu oda; mesken, okul, işyeri gibi halkın kullandığı alanlara bitişik olmamalıdır.
- Cihazın/kaynağın bulunduğu odada şaşırtma koridoru bulunmalı ve tek giriş kapısı olmalıdır.
- Cihazın/kaynağın bulunduğu odadaki çivi, boru deliklerinin ve elektrik, havalandırma, ısıtma tesisatlarının, kumanda üniteleri ile cihazların bağlantı kablolarının zırhlama bütünlüğünü bozmaması sağlanmalıdır.
- Enerjisi 10 MeV’in üzerinde olan hızlandırıcılarda kapı, oluşan nötronları durdurma özelliğine sahip parafin, polietilen vb. malzemeler ile kaplanmalıdır.
- Cihazın/kaynağın bulunduğu odada havalandırma sistemi olmalıdır.
- Oda boyutları; X-ışını cihazları için 20 metrekareden (m^2)’den, Co-60 cihazı için 25 m^2 ’den ve hızlandırıcılar için 35 m^2 ’den küçük olmamalıdır (bu alanlara şaşırtma koridoru, kumanda odası dâhil değildir) (URL-15).

Ayrıca; radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların zırhlama uygunluk raporu için radyasyon zırhlamasına ilişkin ünitenin ölçekli mimari projesinde yer alması gereken bilgiler şu şekilde sıralanmaktadır:

- Cihazın/kaynağın oda içerisindeki yerleşim durumu
- Duvarların, taban ve tavanın yapı malzemelerinin cinsi (kurşun, beton, dolu tuğla, delikli tuğla vb.), kalınlığı (cm) ve yoğunluğu (g/cm^3)

- Birincil ve ikincil radyasyon demetinin yönlendirildiği alanlar ile izomerkezin yeri
- Cihazın/kaynağın bulunduğu odanın bitişik alanları ile alt ve üst katların kullanım amacı ile günlük meşgul edilme süreleri (URL-15).

Yukarı da bahsedildiği gibi, radyasyon uygulamalarının yapıldığı alanların zırhlanmasına ilişkin mimari projelerde tasarımla ilgili dikkat edilmesi gereken birtakım hususlar bulunmaktadır. Ayrıca, bina inşaatı tamamlandıktan sonra yapılacak tadilat ve ilave imalatların yüksek maliyetli olması sebebiyle, yapısal zırhlamanın uygun şekilde tasarlanarak inşaat sürecinde de doğru ve düzgün şekilde uygulanması önem teşkil etmektedir (NCRP, 2005: 13).

3. LİNEER HIZLANDIRICI MEKANLARI İÇİN RADYASYON ZIRHLAMASINA YÖNELİK TASARIM UNSURLARI

Bu bölümde, LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları için öneri ve değerlendirmeler ortaya konulmuş, mekansal tasarım, malzemeler ile duvar, döşeme ve kapı elemanları için detaylar radyasyon zırhlaması bağlamında ele alınmıştır. Minimum maliyette etkin bir radyasyon koruması, her tasarım için ilgili faktörlerin tümünün dikkate alınıp değerlendirilmesiyle mümkün olabilmektedir. Ülkemizde konu ile ilgili yetkili kurum olan Nükleer Düzenleme Kurumunun (NDK) yerinde yaptığı radyasyon kontrolleri, söz konusu mekanlarda radyasyon güvenliğinin gereken şekilde sağlanmasının ölçütü olarak esastır.

3.1. Mekansal Tasarım

Radyoterapi, kanser hastalıklarının görüntülenmesi ve tedavisi için radyasyon kaynaklarının ve kompleks teknolojilerin kullanıldığı multidisipliner bir alandır (IAEA, 2014: önsöz). Radyoterapi uygulamaları kapsamında en yaygın olarak kullanılan, yüksek enerjili elektron demeti ve X-ışını üretebilen lineer hızlandırıcıların, mekan dışındakileri radyasyonun zararlı etkilerinden koruyabilmek amacıyla, zırhlanmış bir mekanda konumlanmaları gerekmektedir (IPEM, 2017: 2-1). Bu mekanlarda radyasyondan korunmanın gereken şekilde sağlanabilmesi için ise, radyasyon zırhlamasının doğru şekilde tasarlanması ve uygulanması önemlidir.

Günümüzde disiplinler arası çalışmanın giderek arttığı alanlardan biri olarak sağlık yapılarında, LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için tasarım süreci konularında uzman; mimar ile inşaat, makine ve elektrik mühendisleri, radyasyondan korunma uzmanı, cihaz firma yetkilisi ve tesis yetkilileri gibi elemanlardan oluşacak bir ekip ile disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde yürütülmelidir (URL-22). Söz konusu disiplinler arasındaki iletişim, en az hata ile doğru bir tasarım için gereklidir.

NCRP'ye (2005: 12-17) göre; zırhlama ile ilgili gereklilikler, radyasyon uygulamalarının yapılacağı mekanların bina içindeki konumunu ve binanın yapım türünü etkileyebileceğinden, radyasyondan korunma uzmanı erken aşamalarda proje sürecine dâhil edilmelidir. Planların uygun şekilde geliştirilmesinde, duvar ve döşeme elemanlarının

potansiyel zırhlama gereksinimleri çerçevesinde değerlendirilmesinde birlikte çalışan mimar ve uzman, proje hedeflerine uygun ve zırh tasarımına yönelik en uygun malzemeleri ve sistemleri birlikte belirler. Uzman, elektrik ve mekanik sistem elemanlarının duvar, tavan ve zeminde geçeceği yerleri belirlemek için oluşturulan öneri planlarla ilgili değerlendirmeye dâhil olup, kullanılacak strüktürel sistemler ve döşeme kalınlıklarıyla ilgili mimar ve inşaat mühendisiyle birlikte çalışmalıdır.

Ülkemizde, yapılan tasarımların radyasyon güvenliği yönünden değerlendirmesi NDK tarafından yapılmaktadır. Söz konusu kurum tarafından ilgili parametreler çerçevesinde yapılan zırhlama hesaplamaları ile duvar, tavan, taban (mekanın tamamen toprak zemine oturması durumunda zırhlama gerekmemektedir) ve kapı elemanları için zırh kalınlıkları belirlenmekte ve zırhlama uygunluk raporu kapsamında, mimari projede belirtilen kalınlıkların uygunluk durumu belirtilmektedir. Zırhlama hesaplamalarına esas parametrelerde veya cihazın konumunda herhangi bir değişiklik yapılması halinde ise olması gereken min. kalınlık değerleri de değişmektedir. Ayrıca, NDK'nın inşaat imalatları ve cihaz kurulumunun tamamlanmasının ardından yerinde yaptığı radyasyon kontrolleri, radyasyon güvenliğinin gereken şekilde sağlanmasıyla ilgili nihai sonucun verilebilmesi için esastır.

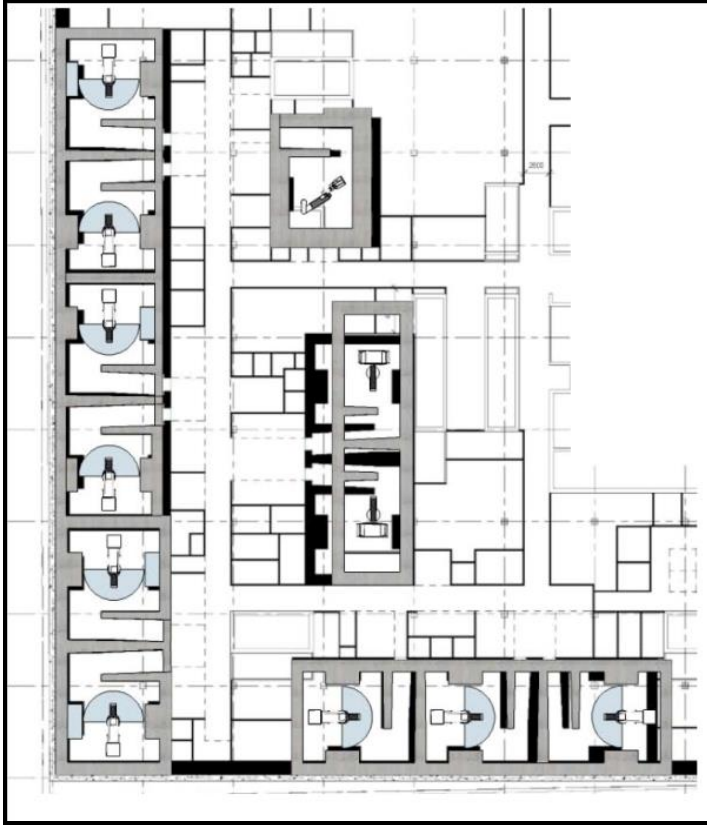
Bir radyoterapi ünitesi özelinde düşünüldüğünde, bina içerisindeki konum ve yerleşim, iş akışı ve radyasyon koruması için dikkatli planlama ve tasarımın yanı sıra, gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçlar ve teknolojiye gelişmelere cevap verebilecek nitelikte bir tasarım, bu mekanların sürdürülebilirliği açısından gereklidir. Radyasyondan korunmak için tasarımında kalın zırhlara gereksinim oluşan söz konusu mekanlar için konumlandırma, zırh kalınlıklarını ve dolayısıyla bina maliyetini doğrudan etkileyen bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır (IAEA, 2014: 1).

Radyoterapi ünitesi ile ilgili yer seçimi NCRP'ye göre fonksiyonel gerekliliklerin yanı sıra; operasyonel verimlilik, maliyet, esneklik kurgusu (gelecekte genişleme imkânı veya artan iş yükü gibi) gibi faktörler ışığında yapılmalıdır. Genellikle, dış duvarlara ilişkin zırhlama maliyetini en aza indirmek amacıyla söz konusu mekanlar en ekonomik strateji olarak “yer altında” inşa edilir. Ancak, bu durumda zırhlama maliyetindeki azalmanın kazı, su yalıtımı gibi altyapı giderlerinin yanı sıra, mekanlara sirkülasyonu sağlayacak inşaat alanının maliyetiyle de karşılaştırılarak bir maliyet analizi yapılması gerekir (NCRP, 2005: 65-66). Esneklik kurgusu dâhilinde değerlendirildiğinde, yer altında bir konumlandırmada

genişleme, kazı ve altyapıyla ilgili gereklilikler oluşturacağından gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçların ilk planlamada dikkate alınması gereklidir. Döşemenin zırlama gerekliliğini ortadan kaldıran zemin katta yerleşim ise gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçlar doğrultusunda genişlemeye en ekonomik şekilde imkân veren tasarımıdır (NCRP, 2005: 66). Söz konusu mekanları toprak zemin yerine başka bir mekan üstünde konumlandırmak ise, döşeme için ayrı bir zırlama gereksinimi oluşturmasının yanı sıra, strüktürel anlamda da binaya ciddi yük getirmekte (URL-22) ve esneklik kurgusu dâhilinde değerlendirildiğinde dezavantaj yaratmaktadır (NCRP, 2005: 66).

Önemli bir diğer husus; söz konusu mekanların diğer mekanlarla olan ilişkisinin meşguliyet faktörleri gözetilerek doğru şekilde kurgulanması bağlamında bariyerlerin kalınlık gereksinimleri ile ilgili optimizasyondur. Örneğin; zırlama yapılacak mekana bitişik diğer mekanların koridor, mekanik tesisat odası gibi çok yoğun kullanıma sahip olmayan alanlar olarak planlanması, zırlama gereksinimlerini azaltan etkili bir stratejidir (NCRP, 2005: 16). Ünite tek katlı bir yapıda konumlanmışsa çatıya erişim kısıtlanırken, üst katta kullanılan başka mekanlar var ise yine, depo veya mekanik tesisat cihazları (Chiller cihazları, havalandırma cihazları gibi) için kullanılacak alanların tasarlanması zırlama gereksinimleri açısından daha optimal bir çözüm yolu sunmaktadır (IAEA, 2006: 25-26). Ayrıca, fonksiyonel gerekliliklerin izin verdiği ölçüde, cihaz yönünün yüksek meşguliyetli alanlar dikkate alınarak belirlenmesi, daha fazla kalınlık gerektiren birincil bariyerlerin zırlama gereksinimlerinin azaltılabilmesi açısından tasarımda göz önünde bulundurulması gereken hususlardandır (IAEA, 2014: 11).

Yapıda zırlama gerektiren birden çok mekanın varlığında, zırh duvarlarının ortak kullanılmasını sağlamak amacıyla, Şekil 3.1’de bir örneği görülebileceği gibi mekanları birbirine bitişik şekilde tasarlamak, alandan tasarruf sağlanmasının yanı sıra, gereken zırh malzemesi miktarının azaltılması sonucunda da yapı maliyetinin optimize edilmesi açısından ideal bir tasarım sunmaktadır (IAEA, 2014: 8).



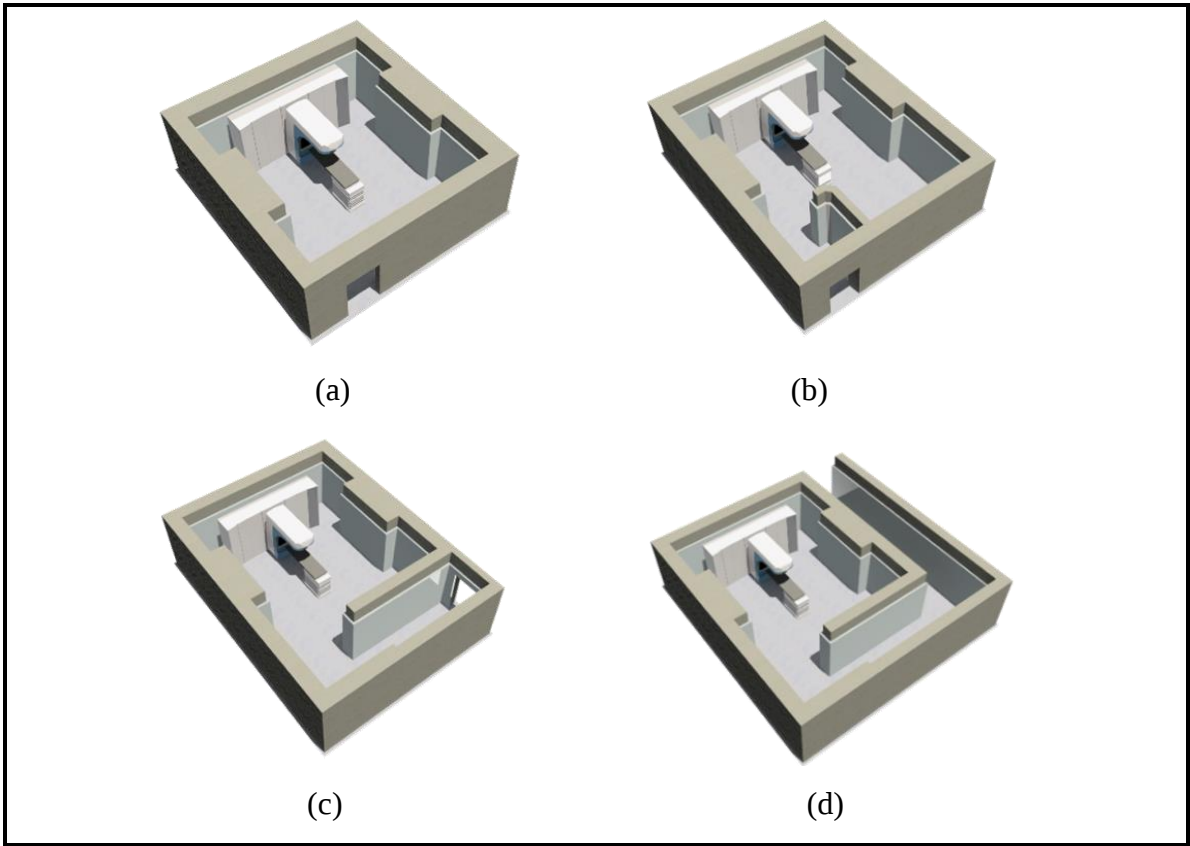
Şekil 3.1. Zırhlama gerektiren mekanların birbirine bitişik olarak tasarlandığı bir örnek (URL-22)

Tüm cihazlar için ortak gerekliliklerden biri olan ve her cihaz için ayrı bir mekan olarak tasarlanması gereken kontrol alanı (IAEA, 2014: 11) ilgili personelin cihazı kontrol ettikleri, tedavi odası girişine yakın noktada konumlandırılması gereken (IAEA, 2006: 12) hasta ile görsel ve sesli iletişimin sağlandığı alandır. Radyasyon zırhını olabildiğince düşük kalınlıklarda tutabilmek ve personelin izin verilen sınırlar çerçevesinde doz alımını sağlamak amacıyla bu alanın ikincil bariyerin arkasında konumlandırılması tavsiye edilmektedir (NCRP, 2005: 67).

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar 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 (NCRP, 2005: 76). Tasarımı özel hususların dikkatlice değerlendirilmesini gerektiren söz konusu kapılarla ilgili detaylar Bölüm 3.3.3'te açıklanmaktadır.

Farklı mekânsal alternatiflerin görülebileceği Şekil 3.2'de ilk tasarımda (a), şaşırtma koridoru olmadan, zırhlanmış kalın ve ağır bir kapı ile mekana doğrudan erişim sağlanırken,

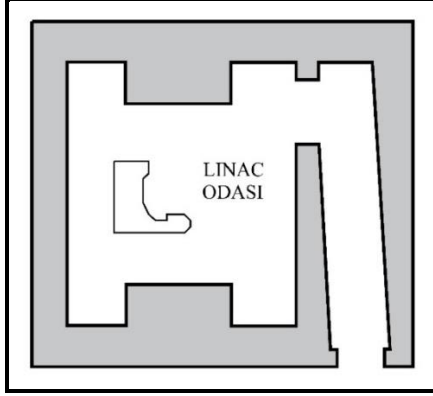
b, c ve d alternatiflerinde, kapının zırh kalınlığını, dolayısıyla ağırlığını ve maliyetini azaltmak için kullanılabilecek farklı uzunluklarda şaşırtma koridorlu tasarımlar yer almaktadır (URL-22). IAEA’ye göre; şaşırtma koridorunun yeterli uzunlukta olduğu veya yeterli büküme sahip olduğu durumlarda 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 dedektörleri gibi güvenlik tedbirlerine başvurulmalıdır (IAEA, 2006: 11).



Şekil 3.2. Mekana doğrudan erişim (a), mekana farklı uzunluklardaki şaşırtma koridorlarıyla erişim (b), (c), (d) (URL-22)

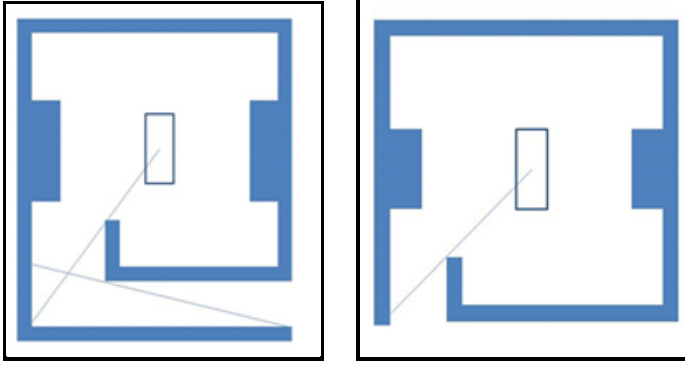
NCRP’ye göre; mekansal tasarım alternatiflerinden şaşırtma koridoru düzenlemesi, kapının zırhlama gereksinimini önemli miktarda azaltmasıyla genellikle en ekonomik yaklaşımdır (NCRP, 2005: 76). Şaşırtma koridoru içeren bir tasarımın diğer bir avantajı da koridorun, mekanik ve elektrik tesisatı için kullanılan kanalların zırhlama bütünlüğü bozulmadan geçebilecekleri bir yol oluşturmaktır (IAEA, 2006: 11). Öte yandan bu koridorlar, alan gereksinimini ve personel ile hastaların (özellikle sedyeli hastaların) mekana erişim

mesafelerini artırması açısından dezavantaj yaratmaktadır (NCRP, 2005: 67). Şaşırtma koridoruna yönelik NCRP tarafından önerilen tipik bir tasarım Şekil 3.3 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Şaşırtma koridorlu tipik bir tasarım (NCRP, 2005: 106)

IAEA'ye göre; şaşırtma koridoru bulunan mekanlarda kapı zırhlaması ile ilgili gereksinimi azaltmak için; şaşırtma koridorunun uzunluğunu artırmak, koridorun iç açıklık alanını azaltmak, koridora büküm eklemek gibi alternatifler değerlendirilebilir. Kapı zırhlamasına ilişkin gereksinimleri azaltmak için diğer yollar; şaşırtma koridoru duvarlarına BPE uygulamak ve yüksek enerjili uygulamalarda kapatılabilecek, nötronları zırhlama özelliğinde bir iç koridor kapısı ilave etmektir (IAEA, 2006: 43). Ayrıca, koridor iç duvarının bitiminde tasarlanacak duvar elemanları ikincil radyasyonun şaşırtma koridoruna giren miktarını azaltma konusunda etkilidir. Ancak, söz konusu elemanların tasarımında, hasta ve personelin mekan içindeki sirkülasyonunun göz önünde bulundurulması önemlidir. Benzer şekilde, mekana erişimin doğrudan zırhlanmış bir kapı ile yapıldığı tasarımlar için de bu duvarlar, kapıya ulaşan radyasyonun miktarını ve dolayısıyla kapıdaki zırhlamayı ve ağırlığı önemli ölçüde azaltabilir. IPEM'e göre, şaşırtma koridoru olmayan tasarımlar hastalar için klostrofobik bir atmosfere yol açabileceğinden, hem bu hissi azaltmak, hem de kapının ağırlığını azaltmak için söz konusu duvarlarla kısa bir koridor oluşturmak faydalı olabilir (IPEM, 2017: 2-2, 7-10, 7-11). Şekil 3.4'te, söz konusu duvar elemanlarının eklendiği şaşırtma koridoru olan ve olmayan tasarımlar görülebilmektedir.



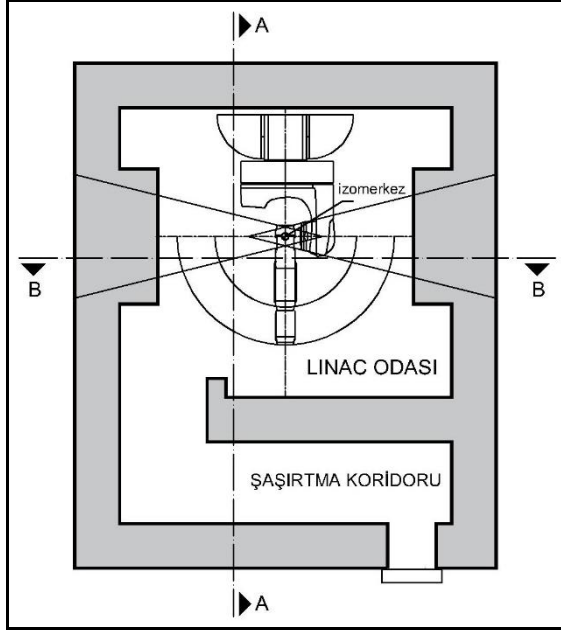
Şekil 3.4. Şaşırtma koridoru olan (solda) ve olmayan (sağda) mekan tasarımları (IPEM, 2017: 7-12)

IPEM'e (2017: 4-2) göre; radyasyon ışınının merkezi, izomerkez olarak adlandırılan noktadan geçecek şekilde tasarlanır ve izomerkezin mekandaki konumu, tüm tasarım için bir referans noktası oluşturmaktadır. Mekansal tasarım bağlamında özel hususların dikkatle değerlendirilmesini gerektiren, ayrıca interlock⁹ sistemi ile uyarı ışıkları ve uygun noktalarda acil durum butonları gibi güvenlik gereklilikleri bulunan radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların tasarımı genel olarak; cihazın tipi, tedavinin türü, kullanılan özel ekipman gibi faktörlere bağlı olarak şekillenmektedir (NCRP, 2005: 12-13).

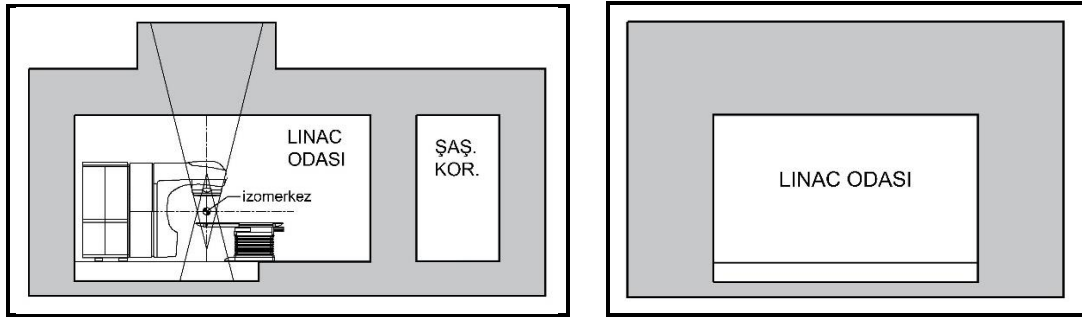
LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar; kullanımla ilgili bütün ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte, elektrik ve mekanikle ilgili gereklilikler ve üretici firmaya bağlı gereksinimler çerçevesinde yeterli mekan boyutlarını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır (IAEA, 2006: 10). Söz konusu mekanlar IAEA'ye göre minimum 7 m x 7 m boyutlarında ve cihazın taşınması, elektrik ve mekanik tesisat elemanlarının geçişi için şaşırtma koridoru da dâhil olmak üzere minimum 4 metre yükseklikte planlanmalıdır. Ayrıca 2-2,2 m'lik bir şaşırtma koridoru genişliği söz konusu mekanların tasarımı için tavsiye edilmektedir (IAEA, 2014: 8). Esneklik kurgusu dahilinde gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçlar göz önüne alınıp, mekanların ihtiyaçtan daha büyük boyutlarda tasarlanması avantajlı olsa da, yapı maliyeti ve mekan içindeki sirkülasyon mesafelerinin artması gibi faktörler bu durum için dezavantaj yaratmaktadır. Söz konusu mekanların birincil bariyerlerinin tasarımı için ayrıca, gelecekte tekniklerin olası değişimlerinin meşguliyet faktörünü ve/veya iş yükünü artırabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (NCRP, 2005: 66-

⁹ Güvenliğin tehlikeye girmesi durumunda (kapının açılması gibi) ışınlamayı sona erdiren cihaz (IPEM, 2017: 13-5).

68). LINAC odası için örnek bir şematik plan ve kesitler Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da yer almaktadır.



Şekil 3.5. LINAC odası için şematik bir plan (yazar tarafından oluşturulmuştur)



Şekil 3.6. LINAC odası için şematik kesitler: A-A kesiti (solda), B-B kesiti (sağda) (yazar tarafından oluşturulmuştur)

LINAC cihazı üreten çeşitli firmalar bulunmakla birlikte, Elekta (Resim 3.1) ve Varian (Resim 3.2) firmalarına ait cihazlar radyoterapi uygulamaları için en sık tercih edilen LINAC cihazlardır. Bu cihazların zemin tasarımları bağlamında birtakım farklılıklar bulunmakta ve ayrıca, diğer cihazlardan farklı olarak Elekta firmasının cihazı için kurulum aşamasında mekan içinde ayrı bir teknik oda oluşturulmaktadır. Söz konusu mekanlarda masa çukuru ve gantry bölümü zemin betonlarının tek seferde dökülmüş eksiz olması, çukurun tozdan ve sudan arındırılması ve çukurun içine şap atılmaması gereklilikleri Sağlık Bakanlığı (2018: 23) tarafından belirtilmektedir.



Resim 3.1. Elekta firmasının LINAC cihazı için tasarlanmış bir mekan (IPEM, 2017: 4-23)



Resim 3.2. Varian firmasının LINAC cihazı için tasarlanmış bir mekan (URL-20)

Sağlık Bakanlığına (2018: 48, 52) göre LINAC cihazının yanı sıra, tedavi masası, modülatör kabini, lazerler, oda içi monitörü gibi elemanlar bulundurabilen söz konusu mekanların tasarımı için dikkat edilmesi gereken bir nokta; modülatör kabini ve oda içi monitörü gibi elemanlar için konumlandırma yapılırken, bu elemanların birincil radyasyon alanı içerisinde bulunmaması gerekliliğidir.

Yukarıda da belirtildiği gibi, mekânsal tasarımı radyasyon zırhlaması bağlamında etkileyen birçok faktör bulunmakla birlikte, tasarımı söz konusu bağlamda şekillendiren unsurlardan bir diğeri de kullanılacak yapı malzemeleridir.

3.2. Malzemeler

Hem foton hem de nötron zırhlamasının dikkate alınmasının gerektiği yüksek enerjili hızlandırıcıların kullanıldığı mekanlar 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. Bu iki farklı gereklilik için farklı malzemeler tercih edilebilirken, her iki radyasyon çeşidi için zırhlama özelliği yüksek malzemeler de tercih etmek mümkündür. Normal beton, ağır beton, kurşun, çelik, polietilen, parafin, toprak gibi malzemeler, LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlarda zırhlama için sıklıkla tercih edilen malzemelerdir (NCRP, 2005: 69).

Pek çok avantajıyla en yaygın kullanılan malzeme olan beton, hem X-ışınları hem de nötronlar için zırhlama özelliğinin yanı sıra, iyi yapısal özelliklere sahip ve yaygın kullanımından dolayı nispeten ekonomik bir malzemedir. Betonun söz konusu mekanlarda kullanmanın düşük maliyetli olmasının bir sebebi de duvar ve döşeme elemanlarının fazla detay içermemelerinden dolayı kalıp maliyetinin nispeten düşük olmasıdır (NCRP, 2005: 69). LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların inşasında zırh malzemesi olarak en az 2350 kg/m^3 yoğunlukta (IAEA, 2006: 4) ve en az C35 sınıfı beton kullanılmaktadır.

Bir sağlık yapısında LINAC cihazı ile tedavi yapılan mekanların zırhlaması için ayrılması gereken alan düşünüldüğünde, zırh tasarımı bağlamında çok kalın olabilen duvar kalınlıklarının optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Kosako, Oishi, Nakamura ve Kiyanagi, 2014). Fotonların zayıflatılması için beton yoğunluğunun, bileşimine yüksek yoğunluklu çeşitli agregalar eklenerek artırıldığı, üretimi için kullanılacak agrega bileşenlerinden Bölüm 2.2.3'te bahsedilen ağır beton; alan kısıtlaması olan durumlarda, duvar kalınlıklarını azaltmak amacıyla tercih edilebilen uygun malzemelerden biridir. Ülkemizde de erişim imkânı bulunan barit agregası kullanılarak üretilen ağır betonlarda malzeme yoğunluğu ile radyasyon zırhlama özelliği aynı doğrultuda artmaktadır. Akyol'a (2015: 74) göre; normal beton yerine ağır beton kullanılarak, perde duvar kesit kalınlıklarını önemli oranlarda azaltabilmek mümkündür. Kılınçarslan ve diğerlerine (2011) göre de; 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.

Alan kısıtlaması olan durumlarda, zırh malzemesi olarak tercih edilebilecek malzemelerden bir diğeri de özelliklerinden Bölüm 2.2.3'te bahsedilen, yüksek yoğunluklarda üretilen beton bloklardır. Söz konusu malzemenin kullanımıyla ilgili olarak, harçlı uygulamalarda blokla aynı yoğunlukta harç (boşluksuz olarak) kullanılması ve derzlerin şaşırtmalı olarak tasarlanması proje ve uygulama aşamasında dikkat edilmesi gereken önemli hususlardır (NCRP, 2005: 74).

Kurşun, çelik gibi malzemeler de alan kısıtlaması olan durumlarda kullanılabilen yüksek yoğunluğa sahip malzemelerdir (IAEA, 2006: 20). Betona göre, yaklaşık beş kat daha fazla yoğunluğa ve farklı formlarda kullanım imkânına sahip olan kurşun, fotonları zırlama özelliği çok yüksek bir malzeme olup, ilave zırlama için de gereksinim dâhilinde kullanılmaktadır. Özelliklerine Bölüm 2.2.3'te değinilen ve dezavantajları sebebiyle belirli önlemler dâhilinde kullanılmayı gerektiren kurşunun, alan kısıtlaması olan yerlerde sadece kurşun tuğla olarak kullanımı ile inşa edilen bariyerler, zırlama ihtiyacına bağlı olarak, kaldırılıp tekrar kullanma avantajı ile esnek uygulama imkânı sunar. Ancak, 10 MV üzerinde enerji üreten hızlandırıcılar için kurşun kullanımı, malzemenin nötronları zırlamada yetersiz kalması ve hatta yüksek enerjili fotonlar tarafından ilave nötronlar oluşturulması gibi dezavantajlı özellikleri nedeniyle kısıtlanmaktadır (NCRP, 2005: 81-82).

Yoğunluğu ve dolayısıyla fotonları zırlama özelliği kurşun kadar yüksek olmasa da çelik, alan kısıtlaması olan durumlarda kullanılabilen, ilave zırlama için de gereksinim dâhilinde tercih edilen bir malzemedir (IAEA, 2006: 20). Özelliklerine Bölüm 2.2.3'te değinilen söz konusu malzeme IPEM'e (2017: 7-5) göre; yüksek enerjili uygulamalarda birtakım önlemler dâhilinde kullanılması gereken ve ortaya çıkabilecek nötronlardan dolayı, beton bariyer içine gömülerek uygulanması daha uygun olabilen bir malzemedir.

Polietilen, nötronları zırlamak için çok etkili bir malzeme olmakla birlikte, gereksinim çerçevesinde; kanalların etrafında, bariyerlerde ve kapılarda saf olarak veya değişik oranlarda bor ilave edilerek nötronları zırlamak için kullanılmaktadır (NCRP, 2005: 71). Bor, yüksek hidrojen içeriğine sahip polietilene ilave edilerek etkili bir nötron zırhı

oluşturulabilmekte ve ağırlıkça %5'lik bor bileşimiyle BPE nötron zırhlaması için kapılarda sıklıkla tercih edilmektedir (IAEA, 2006: 20).

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için diğer bir malzeme, yer altında konumlandırılan mekanlar için kullanılabilen topraktır. İyi tanımlanabilir bir malzeme olmayıp yoğunluğu değişken olan toprağın zırh malzemesi olarak kullanımında dikkat edilmesi gereken bir nokta; yüzeye yakın kısımlarda, duvar ve tavan birleşiminde zırh kalınlıklarının radyasyondan korunmaya yönelik gereksinimleri karşılayacak nitelikte tasarlanmasıdır (NCRP, 2005: 68, 72).

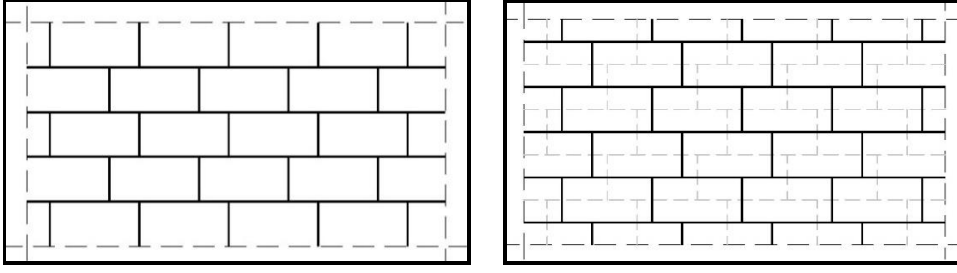
Yukarıda da belirtildiği gibi, uygun zırh malzemesi seçimi çeşitli faktörler çerçevesinde değerlendirilmek suretiyle tasarıma etki eden faktörlerdendir. Radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları kapsamında değerlendirilmesi gereken önemli hususlardan bir diğeri de radyasyonun zararlı etkilerinden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

3.3. Detaylar

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için radyasyon zırhlamasına yönelik detaylar; duvar, döşeme (tavan ve zemin) ve kapı olmak üzere farklı yapı elemanları bağlamında değerlendirilebilir.

3.3.1. Duvar

Farklı parametrelere bağlı olarak tasarımında birtakım özel hususlara dikkat edilmesini gerektiren LINAC mekanları için, doğru şekilde tasarlanacak detaylar ile duvar elemanları bağlamında zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi mümkündür. Bu hususlardan biri, kullanılacak farklı malzemelerin birleşim noktalarının zırhlamanın genel bütünlüğü bozulmayacak şekilde tasarlanıp uygulanmasıdır (NCRP, 2005: 13). Derz gerektiren malzemelerin (blok gibi) kullanılması durumunda derzler için kullanılacak harcın zırh malzemesiyle en azından aynı yoğunluğa ve zırhlama kapasitesine sahip olması ve derzlerin çakışmayacak şekilde, şaşırtmalı olarak uygulanması (Şekil 3.7) duvar elemanları bağlamında zırhlama bütünlüğünün korunması açısından gereklidir (NCRP, 2005: 74).

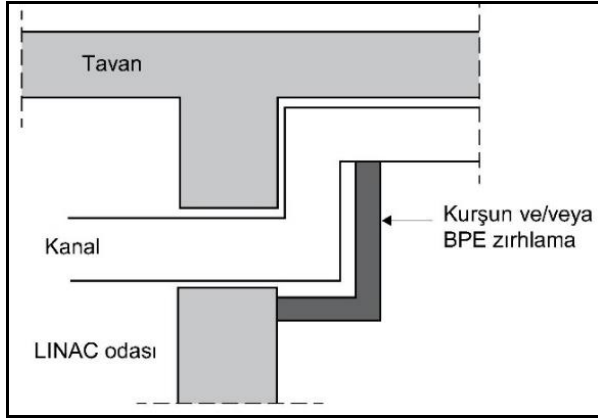


Şekil 3.7. Beton blokların derzler çakışmayacak şekilde yerleştirilmesi için örnek bir tasarım (yazar tarafından oluşturulmuştur)

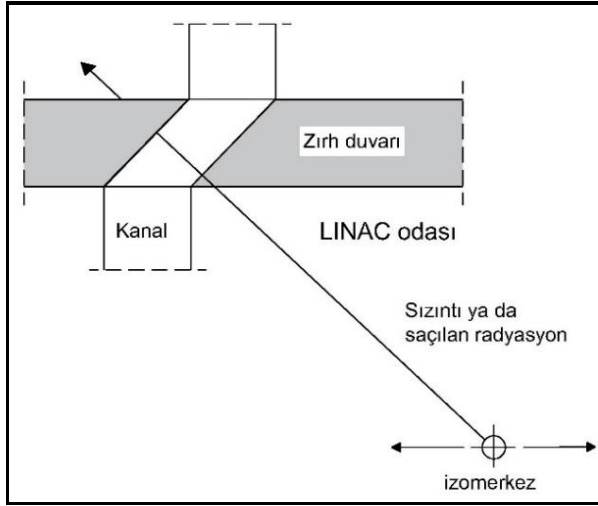
LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlarda zırhlamayla ilgili özel hususları belirleyen en önemli faktörlerden birisi elektrik ve mekanik tesisat elemanlarının tasarımı ve bunların mimari projelere ve inşaat uygulamalarına yansımalarıdır. Bu bağlamda, bariyerler içerisine gömülmüş çeşitli elemanlar ile bariyerlerden geçen kanal, boru gibi elemanlar için bırakılan boşluklardan dolayı radyasyon korumasının bozulmaması, söz konusu mekanların tasarımı bağlamında dikkat edilmesi gereken önemli hususlardandır (NCRP, 2005: 13). Kanallar için bırakılan boşluklardan dolayı ilave zırhlama gereksinimi olduğunda, kurşun veya çelik plakalar, tasarımları birtakım faktörlere bağlı olarak ilave zırhlama malzemesi olarak kullanılabilir (IAEA, 2006: 13-14). Bu durumlarda, kullanılacak malzeme kalınlığı en azından, zırh malzemesi olarak kullanılan betona eşdeğer zırhlama özelliğini sağlamalıdır (NCRP, 2005: 75-76).

Zırhlama gereksiniminin daha az olduğu ikincil bariyerlerde konumlanması gereken havalandırma kanalı, tesisat boruları gibi elemanlar için duvarda bırakılan boşluklar, tasarımları birtakım faktörlere bağlı olarak, şaşırtma bölmeleri (*baffle*) gerektirebilir. Gereksinim dâhilinde uygulanacak şaşırtma bölmelerinin tasarımında radyasyondan korunmaya yönelik unsurlar değerlendirilmelidir (NCRP, 2005: 74-75).

Kanalların her ne kadar küçük olursa olsun kesinlikle birincil bariyerlerden geçirilmemesi dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur (NCRP, 2005: 77). Ayrıca, hiçbir kanal ortogonal olarak zırh duvarlarından geçirilmemelidir, belli bir açıyla (Şekil 3.9) veya en az bir adet dirsek yapacak şekilde (Şekil 3.8) geçirilmelidir (IAEA, 2006: 13). Zırhlamanın bütünlüğü açısından kanalın doğru şekilde yönlendirilmesi; radyasyon doğrultusunda en az miktarda beton kaybı (Şekil 3.9) ve boşluktan geçen radyasyonun en aza indirgenmesini sağlamaktadır (NCRP, 2005: 77).



Şekil 3.8. Kanalda yapılan dirsek için şematik bir detay (NCRP, 2005: 75)



Şekil 3.9. Kanalların belli bir açıyla duvardan geçişi için şematik bir detay (NCRP, 2005: 78)

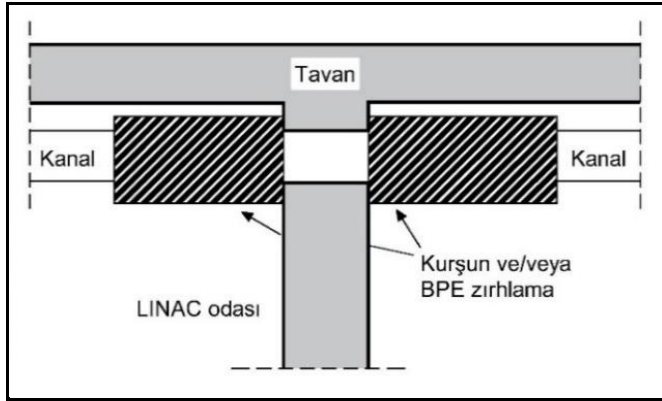
Özellikle, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (*Heating Ventilating and Air Conditioning*) (HVAC) kanalları gibi büyük ebatlı kanalların tasarımı zırhlama bütünlüğünü korumak için bazı özel hususlara dikkat edilmesini gerektirir. Bu bağlamda; kanalların duvar geçişlerinde olabildiğince yüksek bir noktaya¹⁰ yerleştirilmesi radyasyondan korunma için gereklidir (NCRP, 2005: 77-78). Ayrıca, kanaldan geçen radyasyon miktarını azaltmak için kanal kesitinin en/boy oranının yüksek olması IAEA (2006: 14) tarafından önerilmektedir.

HVAC gibi büyük kesit alanına sahip kanalların tasarımına ilişkin farklı gereksinimlerin olduğu durumlar mekânsal tasarım bağlamında üç başlık altında değerlendirilebilir:

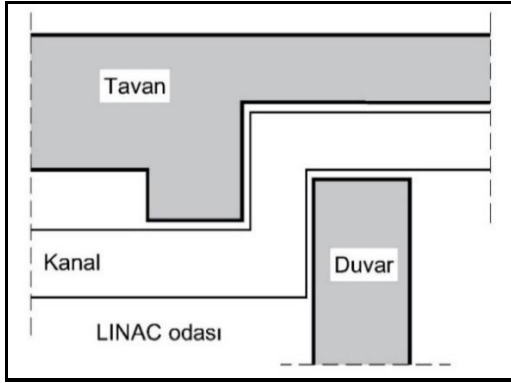
¹⁰ Geçtiği nokta zeminden 3 m veya daha yukarıda olduğunda bireylere ulaşan radyasyon oranı azalmaktadır (IAEA, 2006: 14).

şasırtma koridoru olan mekanlar, şasırtma koridoru olmayan mekanlar ve tavandan geçen kanallar. Şasırtma koridoru olan tasarımlarda zırhlama gereksinimleri çerçevesinde kanal geçişleri için en uygun yer kapı üstündeki zırh duvarıdır (NCRP, 2005: 78). Bu bağlamda, kanalların mekandan çıkışlarının şasırtma koridorunun sonundan verilmesi, temiz ve kirli hava taşıyan kanalların mekan dışına çıktığı noktalarda gereksinim dâhilinde ilave zırhlama yapılarak, radyasyondan korunmaya yönelik tedbirlerin alınması gereklidir (Sağlık Bakanlığı, 2018:15).

Düşük enerjili cihazların (<10 MV) kullanıldığı mekanlarda kanal etrafında genellikle ek zırhlamaya ihtiyaç olmayabilirken, yüksek enerjili cihazlar için ise şasırtma koridoru uzunluğuna bağlı olarak ek zırhlama gereksinimi oluşabilir ve tercih edilen düzenleme şasırtma koridorundan çıktıktan sonra kanala hemen bir dirsek yapmaktır (Şekil 3.8). Eğer bu uygulama mümkün değil ise, kanallar Şekil 3.10'dan görülebileceği gibi kurşunla ve/veya BPE ile sarılmalıdır. Maliyeti daha yüksek olmakla birlikte üçüncü bir alternatif ise beton zırhlı bir şasırtma bölmesi olarak kullanıp (Şekil 3.11) birbirine paralel beton elemanlarla mini bir şasırtma koridoru oluşturmaktır. Bu detayda, örtüşme derecesinin mümkün olduğunca büyük olması, istenilen sonuca ulaşabilmesi için gereklidir (NCRP, 2005: 78-79).



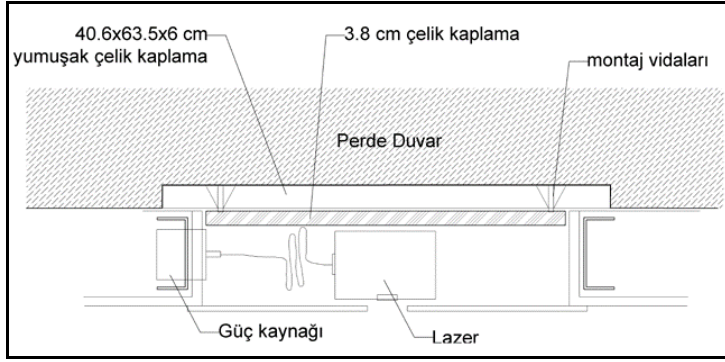
Şekil 3.10. Duvarın her iki tarafında zırhlama malzemesi ile sarılmış kanal için şematik bir detay (NCRP, 2005: 80)



Şekil 3.11. Kanal geçişi için oluşturulmuş beton şaşırtma bölmesi için şematik bir detay (NCRP, 2005: 80)

Tasarım olarak bir şaşırtma koridoru içermeyen mekanlarda ise; zırhlama gereksiniminin daha düşük olduğu gantry dönüş düzlemine paralel duvarlar, kanal geçişleri için tercih edilmektedir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilen detaylar bu mekanlar için uygulanabilmekte olup, kanalda mümkün olan en dar açılı dirsek tercihen mekanın dışında yapılmalı ve kanal gereksinim doğrultusunda yeterli kalınlıkta BPE ile sarılmalıdır. Üçüncü tip olarak tavandan geçecek kanallarda ise, mümkün olan en yüksek en/boy oranına sahip dikdörtgen kesitli bir kanal tasarlanmalıdır ve zırhlama bütünlüğünün bozulmamasına yönelik önlemler alınmalıdır (NCRP, 2005: 79-80).

LINAC mekanlarında havalandırma sistemiyle ilgili dikkat edilmesi gereken bir husus, radyasyon zırhlamasıyla doğrudan ilişkili olmamakla birlikte, hızlandırıcı tarafından oluşturulan ozonun (O_3) yarattığı tehlike durumundan korunabilmek için ozon konsantrasyonunun belirli seviyelerin üzerine çıkmamasına ilişkindir (NCRP, 2005: 91). Sağlık Bakanlığı’nın hava değişim oranını saatte minimum 10 kez olarak önerdiği söz konusu mekanlarda 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 (Şekil 3.12). Tasarlanacak mekanik havalandırma sistemi ile tedavi odası içerisindeki atmosferin ısı şartlandırma, nem kontrolü ve oluşacak zehirli gazların tahliyesi bağlamında istenilen şartları sağlaması amaçlanmaktadır (Sağlık Bakanlığı, 2018: 13-14).

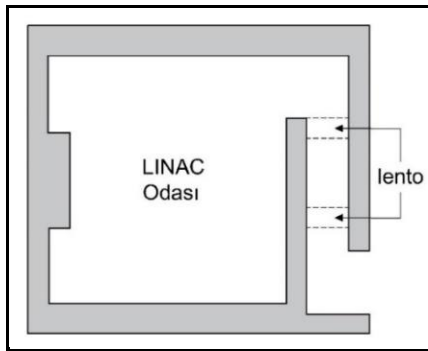


Şekil 3.14. Standart lazer montaj şekli (duvara gömülü şekilde) (Sağlık Bakanlığı, 2018: 53)

Radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım yukarıda da bahsedildiği gibi, duvar elemanları bağlamında çeşitli unsurların dikkatle değerlendirilmesini gerektirmektedir. Mekanik ve elektrik tesisat elemanlarıyla ilgili tasarım ve uygulama sürecini etkileyecek unsurlar, disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde değerlendirilmelidir. Benzer şekilde, tasarım aşamasında özel dikkat gerektiren diğer yapı elemanı da döşemelerdir.

3.3.2. Döşeme

Zırhlama bütünlüğünün korunabilmesi için, döşeme elemanları kapsamında tavan ve zemin için gerekli hususlar tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, lineer hızlandırıcı mekanlarının tavan detaylarıyla ilgili hususlardan biri; şaşırtma koridorunda yükseklik/genişlik oranının zırhlama gereksinimleri bağlamında önemli olduğu durumlarda koridor girişinde lento (*lintel*) kullanımıdır (NCRP, 2005: 37). IPEM'e (2017: 7-12) göre, şaşırtma koridoru girişine ulaşan X-ışını ve nötron dozları, en az 50 cm kalınlıkta yapılacak beton lentolarla azaltılabilir (Şekil 3.15 ve Resim 3.3). Ancak, lento alt yüksekliğinin cihaz, personel ve hasta sirkülasyonu için sıkıntı yaratmayacak şekilde tasarlanması gereklidir.

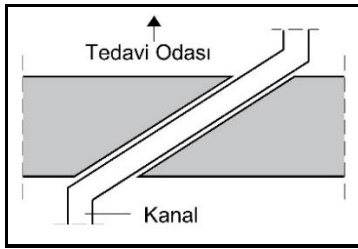


Şekil 3.15. Lentoların şaşırtma koridorundaki konumu (IPEM, 2017:7-13)

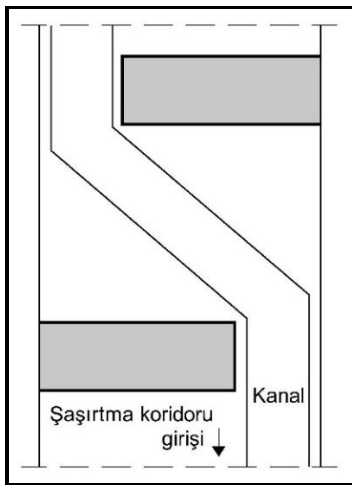


Resim 3.3. Lentolu bir şaşırtma koridoru (IPEM, 2017:7-13)

Şaşırtma koridorunda lento kullanımıyla ilgili dikkat edilmesi gereken bir diğer husus HVAC kanallarının geçişine ilişkindir. Kanal ve lento boyutlarına bağlı olarak kanalların uygun şekilde lentodan geçişi için uygulanabilecek detaylar Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de yer almaktadır (IPEM, 2017: 7-15).

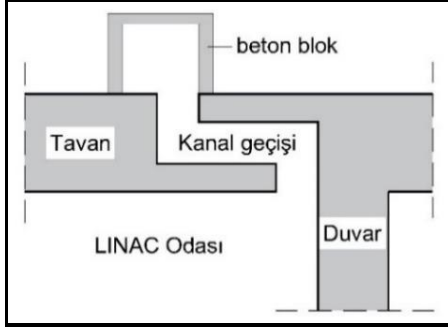


Şekil 3.16. HVAC kanallarının lentodan geçişi için şematik bir detay (IPEM, 2017: 7-15)

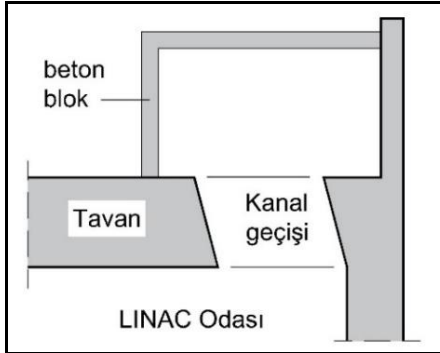


Şekil 3.17. HVAC kanallarının lentodan geçişi için şematik bir detay (IPEM, 2017: 7-15)

Tavan detayları için önemli bir diğer husus da kanalların mekan dışına çıktığı noktaların tasarımına ilişkindir. Kanalın çıkış noktasında konumlanmış başka bir mekan bulunmayan tasarımlarda ilgili faktörlere bağlı olarak şaşırtma koridoru sonunda uygulanabilecek detaylar Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 ile gösterilmektedir.

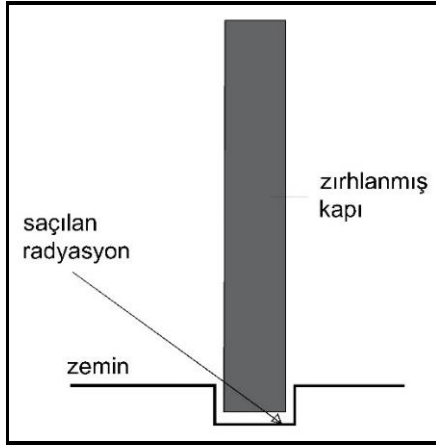


Şekil 3.18. Kanalların tavadan şaşırtmalı geçişi için şematik bir detay (yazar tarafından oluşturulmuştur)



Şekil 3.19. Kanalların tavadan açılı geçişi için şematik bir detay (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Zırhlama bütünlüğünün bozulmamasına yönelik alınabilecek önlemler çerçevesinde döşeme detayıyla ilgili değerlendirilebilecek bir husus, mekana doğrudan erişim sağlayan zırhlanmış kapıların oturacağı zeminde, kapı altından radyasyon sızıntısının önlenmesi için oluşturulacak zemin detayına ilişkindir. Bu bağlamda, IPEM (2017: 7-16) tarafından önerilen, kapı için derin olmayan çukur bir zemin oluşturulmasına ilişkin bir detay Şekil 3.20’de yer almaktadır.



Şekil 3.20. Şaşırtma koridoru bulunmayan mekanlarda zırhlanmış kapılar için şematik bir zemin detayı (IPEM, 2017: 7-16)

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların radyasyon zırhlamasına yönelik tasarımı için dikkat edilmesi gereken unsurlardan bir diğeri de zeminden giden elektrik ve su boruları gibi tesisat elemanları için, gereksinim dahilinde ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde gereken önlemlerin alınmasıdır. NCRP' ye (2005: 81) göre; küçük çaptaki (<2,5 cm) borular için uygun şekilde yerleştirilmek koşuluyla genellikle özel bir önlem alınması gerekmez. Ancak zırhlama gereksinimleri doğrultusunda, çapı 2,5 cm'den daha büyük elemanların, eksilen betonun telafisi için kurşunla sarılması değerlendirilmelidir. IAEA de, daha büyük kanalların içine yerleştirilen su ve elektrik borularının bariyerlerden geçmemelerini, mekandan çıkarken şaşırtma koridorunu takip etmeleri ya da bariyerlerin altında bir yol izlemelerini önermektedir. Ayrıca, kontrol odasına genellikle bariyerlerin altından geçerek ulaşan tedavi cihazına ait kabloların geçişi için alt katta başka bir mekan olmaması, kontrol odası birincil bariyerin arkasında konumlanmadığı ve kabloların bu bariyerin altından geçmediği sürece ilave zırhlamaya ihtiyaç olmayacağı IAEA (2006: 13) tarafından belirtilmektedir.

Radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım yukarıda bahsedildiği gibi, döşeme elemanları bağlamında çeşitli unsurların dikkatle değerlendirilmesini gerektirmekte olup, mekanik ve elektrik tesisat elemanlarıyla ilgili tasarım ve uygulama sürecini etkileyecek unsurlar, disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde değerlendirilmelidir. Benzer şekilde, radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım aşamasında özel dikkat gerektiren diğeri bir eleman da kapıdır.

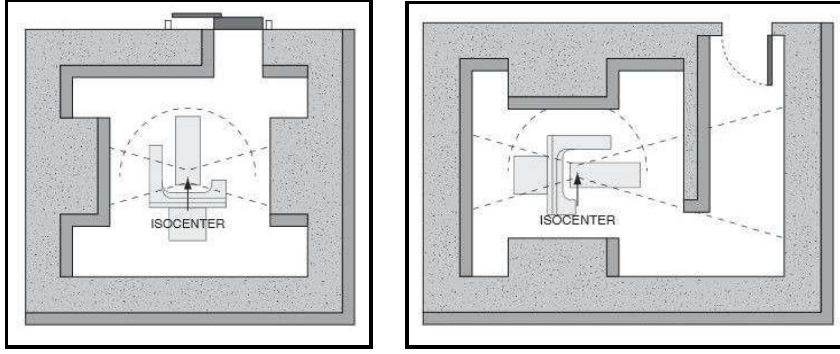
3.3.3. Kapı

Özellikle yüksek enerjili cihazların kullanıldığı mekanlar için kapı tasarımı, operasyonel verimlilikten ödün verilmeden, gereken radyasyon korumasının sağlanabilmesi amacıyla özel dikkat gerektiren bir konudur (NCRP, 2005: 13). Radyasyon korumalı kapılar genel olarak; boyut, zırhlama ve kurulum özellikleri çerçevesinde gereksinimler ve tercihler doğrultusunda özelleşmekte (URL-32) ve kapı zırhlaması için malzeme ve kalınlıkları, ilgili faktörlerin tümünün değerlendirilerek zırhlama hesaplamalarına yansıtılması neticesinde belirlenmektedir.

Yüksek enerjili (>10 MV) hızlandırıcılar ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlarda daha önce de bahsedildiği gibi, fotonların yanı sıra nötronlar için de zırhlama gerekliliği ortaya çıkmaktadır (NCRP, 2005: 43). IPEM'e (2017: 4-17) göre; gereksinim doğrultusunda uygun şekilde zırhlanmış ve interlock sisteme sahip tek bir kapının olması, ilave bir nötron kapısına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Kapıların tipi üretici firmaya göre değişebilmekle birlikte sıklıkla kurşun, polietilen, borlu polietilen, yüksek yoğunluklu blok gibi malzemeler kapılarda zırhlama için kullanılmaktadır (URL-22). Ayrıca, kapılarda kurşun imalatı düzgün şekilde yapılmalı, kurşun ve çelik gereken standartlara sahip olmalıdır.

Genellikle estetik sebeplerle kapı çevresindeki beton yüzeylerde alçı plaka kullanımına, alçı plakanın nötronlar için zayıf bir zırhlama malzemesi olması ve kapı çevresinde radyasyon sızıntısına sebep olabilecek bir çatlak oluşturma tehlikesinden dolayı dikkat edilmelidir. Önemli bir çatlak oluşması durumunda ise BPE ile veya sade polietilen ile çatlak doldurulmalıdır (NCRP, 2005: 77).

LINAC cihazı için tasarlanacak mekanlarda kapılar Bölüm 3.1'de de bahsedildiği ve Şekil 3.21'den görülebileceği üzere; bir şaşırtma koridoru ile erişim sağlanan veya şaşırtma koridoru olmadan doğrudan erişim sağlanan mekanlar için, zırhlama gereksinimleri doğrultusunda iki başlık altında değerlendirilebilir. Mekana doğrudan erişim sağlayan zırhlanmış kapılar genellikle alan kısıtlamasının olduğu yapılarda kullanılmakta olup, ikincil bariyerle aynı zırhlama gereksinimine sahip olma ve çok ağır olma özellikleriyle yüksek enerjili uygulamaların yapıldığı mahallerde özellikle çok yüksek maliyetlidir (URL-31).

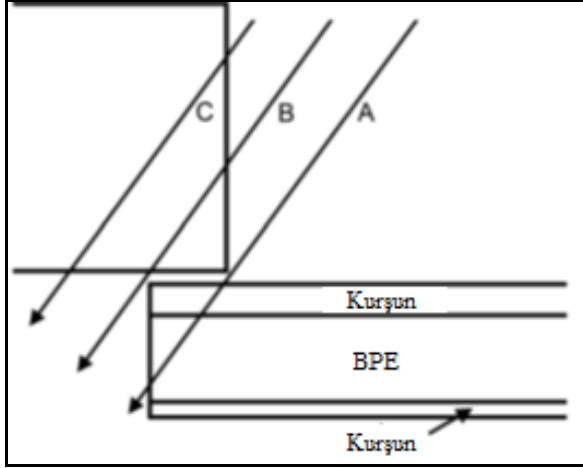


Şekil 3.21. Farklı zırhlama gereksinimine sahip kapıların kullanıldığı iki farklı mekânsal tasarım (URL-33)

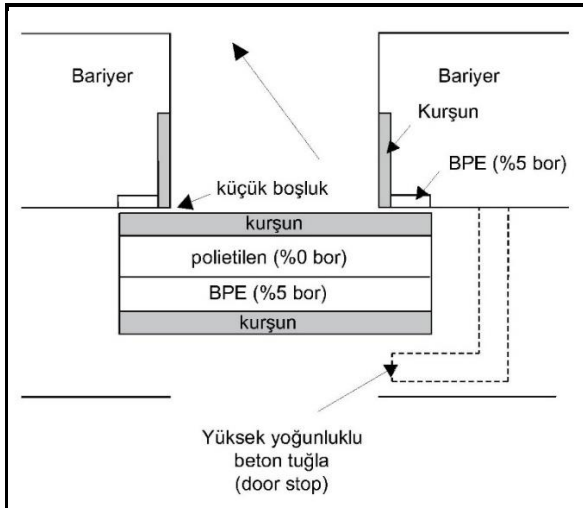
Şaşırtma koridoru bulunan mekan tasarımlarında kapı zırhlaması; radyasyonun enerjisi, şaşırtma koridorunun tasarımı, haftalık iş yükü ve ışının yönü gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir (NCRP, 2005: 76). Şaşırtma koridorunun uzunluğu kapıların zırhlama gereksinimi açısından önemli bir faktör olmakla birlikte, kısa şaşırtma koridoruna sahip hızlandırıcı odalarında kapı zırhlaması için daha kalın BPE ve kurşun gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Kapılarda genel tasarım ise BPE'yi iki kurşun tabakası arasında sandviç yaparak kullanmaktır (IAEA, 2006: 42).

Şaşırtma koridoru olmayan mekanlarda da kapıların zırhlama malzemeleriyle ilgili genel tercih nötronlar mevcutsa BPE ilavesiyle kurşun ve çelik (kapı dış kaplaması) tabakalar olup, bor konsantrasyonu genellikle ağırlıkça %5'tir (NCRP, 2005: 47). Tasarımı karmaşık ve özel hususların dikkatle değerlendirilmesini gerektiren söz konusu kapıların hatasız şekilde uygulanması radyasyondan korunma açısından son derece önemlidir. Bu bağlamda, kapı kenarlarından radyasyon sızıntısının önlenmesine yönelik tedbirler tasarım sürecinde değerlendirilmelidir (IPEM, 2017: 4-17, 7-15).

NCRP'ye göre; mekana doğrudan erişim sağlayan zırhlanmış kapıların yeterli radyasyon koruma potansiyelleriyle ilgili ortaya çıkabilecek tasarım problemleri (Şekil 3.22) için iki çözüm yolu bulunmaktadır: kapının duvarla örtüşme uzunluğunu olabildiğince artırmak veya Şekil 3.23'te yer alan detaydaki gibi zırhlanmış bir kapı detayı uygulamaktır. İkinci alternatifte duvar yüzeyine kurşun ve BPE eklenmesi gerekebilmekle birlikte, ilk alternatif olarak kapının daha geniş yapılması ise, ağırlık ve mekanizma ile ilgili kaygıların yanı sıra açılma süresi ve maliyeti ile daha az tercih edilen bir alternatiftir (NCRP, 2005: 50).



Şekil 3.22. Kapıda yetersiz zırhlama (NCRP, 2005: 49)



Şekil 3.23. Zırhlanmış kapılar için şematik bir detay (NCRP, 2005: 50)

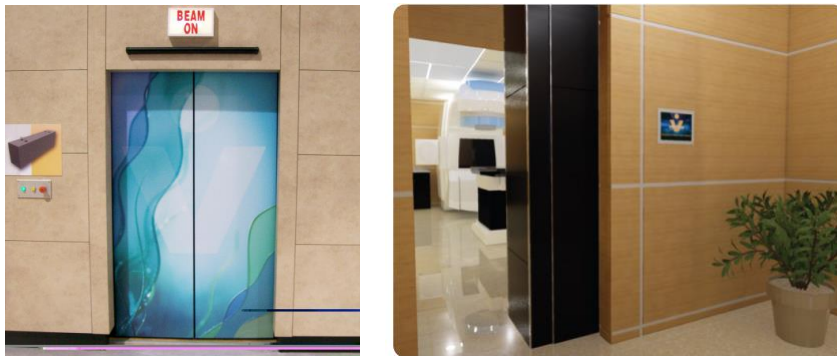
İlgili faktörlere bağlı olarak çok ağır olabilen otomatik kapılar için gerekli güvenlik tedbirlerinin alınması önemli bir husustur. Söz konusu kapılar, acil durumlarda (elektrik kesintisi gibi) manuel olarak çalıştırılması için donanım gerektirmekte, manuel olarak kontrol edilemeyen durumlarda ise gerekli tedbirler alınmalıdır. Açılma ve kapanma sırasında oluşabilecek olumsuz durumlara karşı kapıyı durduran (veya tersine hareket ettiren) güvenlik mekanizması ve acil durdurma kontrolü bulunmalıdır (NCRP, 2005: 48, 76). İnterlock sistemi ile tedavi esnasında kapının açılması durumunda cihaz otomatik olarak durmalı, kullanım süresince girişe izin verilmemeli, ışık ve işaretlerle uyarılma sağlanmalıdır (Sağlık Bakanlığı, 2018: 11).

Lineer hızlandırıcı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlarda kullanılan kapı tiplerini genel olarak menteşeli (*swing*) kapı (Resim 3.4) ve kayar (*sliding*) kapı olarak sınıflandırmak mümkündür. NCRP'ye (2005: 47) göre; mekana doğrudan erişim sağlayan kapıların ağırlığı son derece fazladır ve 120 cm genişlikte bir menteşeli kapı için ağırlık sınırı 8 000 - 9 000 kg'dır. Bu ağırlığın üstünde ise, iki dar kapı veya bir kayar kapı kullanmak gerekir.



Resim 3.4. Menteşeli kapı (URL-32)

Diğer bir kapı tipi olan kayar kapılar ise kendi içinde; Resim 3.5'ten görülebileceği üzere, çift kanatlı (*bi-parting*) ve tek kanatlı (*single leaf*) olmak üzere sınıflandırılabilir. Çift kanatlı kayar kapılar genel olarak diğer kapı türlerine göre daha hızlı açılıp kapanma özelliğine sahiptir (URL-34). Kayar kapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husus; ikincil radyasyonlar için, kapı ve duvar arasında minimum boşluk kalarak yeterli örtüşme sağlayacak şekilde bir tasarım yapılmasıdır (URL-30).



Resim 3.5. Çift kanatlı kayar kapı (solda) (URL-22), Tek kanatlı kayar kapı (sağda) (URL-35)

4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölüm kapsamında; lineer hızlandırıcı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için ele alınan radyasyon zırhlamasına yönelik yapısal detaylara ilişkin bulgular derlenerek analiz çalışmaları ile değerlendirilmiştir.

Sağlık yapılarının tasarım sürecinde, önemli bir tasarım parametresi olarak fonksiyonelliğin gerekliliklerinin yanı sıra, mekan dışındakileri radyasyondan korumaya, izin verilen değerler çerçevesinde doz alımının sağlanmasına yönelik farklı parametreler, radyasyon uygulamalarının yapıldığı mekanlar kapsamında tasarıma dâhil olmaktadır.

Tez çalışması kapsamında edinilen bulgular doğrultusunda; radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için radyasyon zırhlamasına yönelik mimari tasarım bağlamında dikkat edilmesi gereken hususların, söz konusu mekanlar için yapılacak uygun konumlandırma ile başladığı söylenebilir. Bu bağlamda, söz konusu mekanların genel olarak mesken, okul, işyeri gibi halkın kullandığı alanlara bitişik olmaması gerekliliğinin yanı sıra yapı içinde konumlandırmaya ilişkin genel olarak;

- Maliyet
- Operasyonel verimlilik
- Yapı strüktürü
- Esneklik kurgusu (gelecekte genişleme, artan iş yükü ve/veya meşguliyet faktörü) gibi faktörler tasarım aşamasında değerlendirilmesi gereken unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

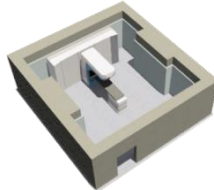
Her cihaz için ilgili faktörlerin bütünleşik olarak değerlendirilmesi çerçevesinde bir tasarım yapılabilen LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamaları yapılan mekanların tasarımında zırhlama gereksinimini azaltmaya yönelik unsurlar:

- Toprak zemin üstünde konumlandırma,
- Yer altında konumlandırma,
- Bitişikte ve/veya üst katta başka mekanlar konumlandırılmışsa bu mekanların yoğun kullanıma sahip olmayan (depo, teknik oda gibi) alanlar olarak planlanması (alanların meşguliyet faktörleri Çizelge 2.5 ile belirtilmiştir),
- Bariyerlerin ortak kullanımı için mekanların birbirine bitişik tasarlanması,

- Bitişik alanların meşguliyeti dikkate alınarak cihaz yönünün belirlenmesi,
- Kontrol odasının birincil bariyerin değil, zırhlama gereksiniminin daha az olduğu ikincil bariyerin arkasında tasarlanması,
- İkincil radyasyonların mekan girişine ulaşan miktarlarının azaltılmasına yönelik önlemlerin tasarım sürecinde değerlendirilmesi, olarak sıralanabilir.

Bölüm 2.2.4’te belirtilen “Cihazın/kaynağın bulunduğu odada şaşırtma koridoru bulunmalı” hususu uyarınca ve maliyet, radyasyondan korunmaya yönelik özel önlemler gibi unsurlar sebebiyle ülkemizde genellikle şaşırtma koridorlu tasarımlar yapılmaktadır. Bununla birlikte, tez kapsamında araştırılan kaynaklardan edinilen bulgular doğrultusunda; mekana ağır, zırhlanmış bir kapı ile doğrudan erişim sağlanan tasarımların da diğer ülkelerde kullanıldığı, bu bağlamda her iki tasarımın kullanılabildiği durumlarda ilgili parametrelerin değerlendirilmesi çerçevesinde bir tasarım yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.1 ile LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı alanlar için mekânsal tasarım alternatifleri ile bu tasarımların özelliklerine ilişkin genel bilgiler sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Mekansal tasarım alternatiflerine ilişkin bir değerlendirme (yazar tarafından oluşturulmuştur)

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

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mahallerde kullanılacak yapı malzemeleri için genel bir değerlendirme Çizelge 4.2 ile sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Zırhlama için kullanılan yapı malzemeleri için bir değerlendirme (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Malzeme-Özellik	Avantaj	Dezavantaj
Normal beton	-Hem X ışınları hem de nötronların zırhlaması için kullanımı uygun bir malzemedir. -Üstün yapısal özelliklere sahiptir. -Genellikle en ucuz zırhlama malzemesidir. -Yaygın kullanımından dolayı üretim ve uygulaması kolaydır.	-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.
Ağır beton	-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.	-Normal betona göre maliyeti yüksektir. -Genel olarak malzemeyi uygulama tecrübesi azdır. -Nakliyatı zordur. -Homojenliğin sağlanması normal betona göre daha zordur. -Yoğunluk kontrolü ve boşluk, çatlak oluşumu gibi unsurlar için uygulama esnasında özel dikkat gerektirir.
Beton blok	-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, kütleme gereksinimi yoktur) uygulama sürecine imkân verir.	-Zırhlama bütünlüğünün korunabilmesi için özel önlemler alınması gerekir (derzlerin şaşırtmalı olarak uygulanması, harçlı uygulamalarda malzemeyle aynı yoğunlukta harç kullanılması gibi) -Nakliyatı zordur. -Normal betona göre maliyeti yüksektir.
Kurşun	-Fotonları zırhlama özelliği çok yüksek bir malzemedir. -Üretimi kolaydır. -Yüksek işlenebilirlik özelliğine sahiptir.	-Nötronları zırhlamada etkili bir malzeme değildir, yüksek enerjili uygulamalarda nötron kaynağı haline gelebilmesi sebebiyle dikkatli kullanılması ve gerekli önlemlerin alınması gerekir. -Yumuşak bir malzemedir, uygulamada ikinci bir yapısal desteğe ihtiyaç duyar. -Toksitesi yüksektir.

Çizelge 4.2. (devam) Zırhlama için kullanılan yapı malzemeleri için bir değerlendirme (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Çelik	-Fotonları zırhlamak için kurşun kadar olmasa da, iyi bir zırhlama malzemesidir. -İyi bir yapısal malzemedir. -Kurşun gibi toksik bir malzeme değildir.	-Nötronları zırhlamada etkili bir malzeme değildir, yüksek enerjili uygulamalarda dikkatli kullanılması gerekir.
-Yoğunluğu (7,87 g/cm ³) kurşun ve beton arasında bir değere sahiptir. - Farklı ebat ve kalınlıklarda gereksinim doğrultusunda kullanılmaktadır.		
Polietilen ve parafin	-Polietilen nötronları zırhlama özelliği çok yüksek bir malzemedir. -Polietilen, üretimi kolay ve parafine göre daha sağlam bir malzemedir.	-Polietilen nispeten pahalı bir malzemedir. -Parafin yanıcı bir malzemedir, kalıcı zırhlar için kullanımı uygun değildir.
-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.		
Toprak	-İlgili faktörlere bağlı olarak zırh kalınlıklarının azaltılabilmesini sağlar. -Maliyet açısından avantajlıdır.	-İyi tanımlanabilir bir malzeme olmayıp yoğunluğu değişkendir.
-Yer altında konumlandırılan mekanlar için kullanılabilir.		

Zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi için tasarımları, disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde dikkatli değerlendirme süreci gerektiren yapı elemanlarına ilişkin; duvar ve döşeme detaylarıyla ilgili dikkat edilmesi gereken genel hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çeşitli amaçlar için kullanılan tesisat elemanlarının duvar ve döşeme elemanlarıyla kesiştiği 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 veya bu bariyerlerden geçirilmesi, kanalların her ne kadar küçük olursa olsun birincil bariyerlerden geçirilmemesi,
- Kanalların ortogonal olarak değil, belli bir açıyla veya dirsek yaparak mekan dışına geçirilmesi,
- HVAC gibi büyük kesit alanına sahip kanalların mekandan çıkışlarının şaşırtma koridoru sonundan, kapı üstünden ve olabildiğince yüksek bir noktadan yapılması ve gereksinim dâhilinde ilave zırhlama yapılarak, bu noktalarda radyasyondan korunmaya yönelik önlemlerin alınması,

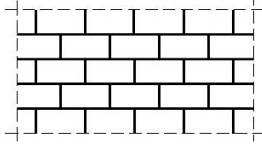
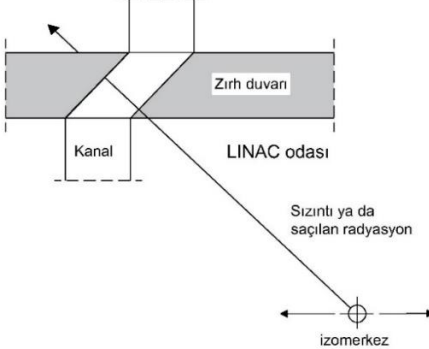
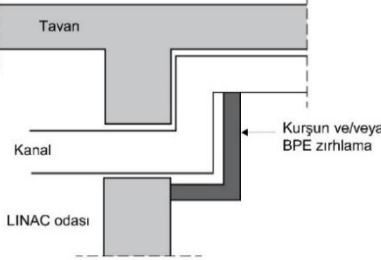
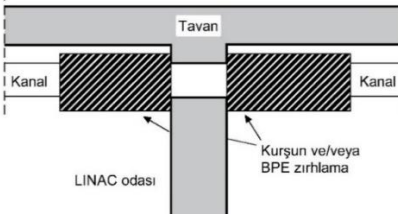
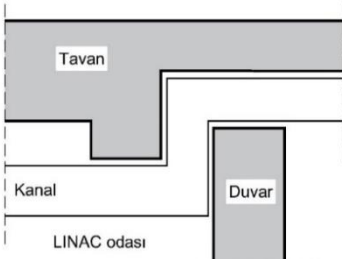
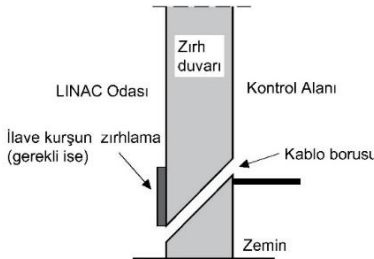
- Kullanılacak ilave zırhlama malzemesi kalınlığının yerine geçtiği zırh malzemesiyle eşdeğer zırhlama özelliğinde olması,
- Zırhlama için kullanılacak farklı malzemelerin birleşim noktalarının zırhlamanın genel bütünlüğü bozulmayacak şekilde tasarlanması.

Tez kapsamında, radyasyon zırhlamasına yönelik kapı tasarımına ilişkin elde edilen bulgular ise genel hatlarıyla şu şekilde sıralanabilir:

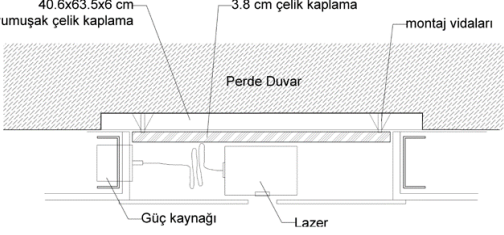
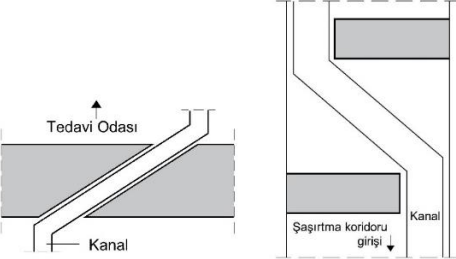
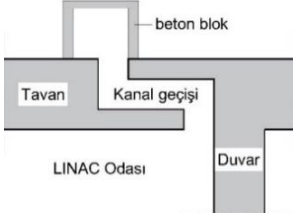
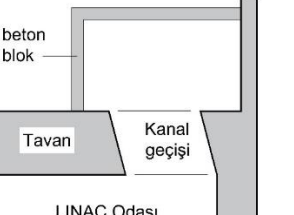
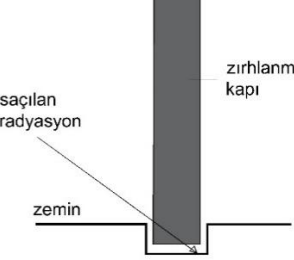
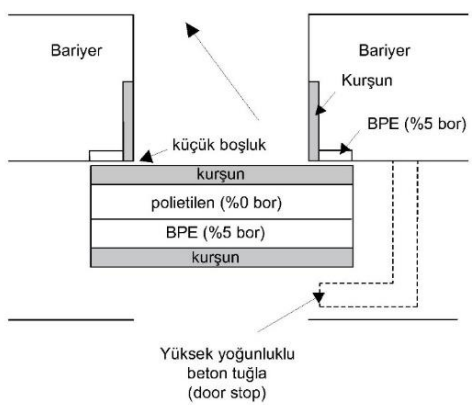
- Kapı zırhlaması için malzeme seçimi ile malzeme kalınlıkları, ilgili faktörlerin tümünün değerlendirilmesi ve zırhlama hesaplamalarına yansıtılması neticesinde ortaya çıkmaktadır.
- Şaşırtma koridorunun uzunluğu, kapının zırhlama gereksinimini azaltan önemli bir faktördür.
- Mekana doğrudan erişim sağlayan kapılar (*direct-shielded door*) bitişikteki ikincil bariyerle aynı zırhlama gereksinimine sahip olma ve çok ağır olma özellikleriyle özellikle yüksek enerjili uygulamalarda çok yüksek maliyetlidir.
- Kapı çevresinden radyasyon sızıntısının önlenmesine yönelik tedbirler alınmalıdır.
- Yüksek enerjili (>10 MV) cihazların kullanıldığı mekanlarda 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.

Zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi için tasarımları özel dikkat gerektiren yapı elemanlarına ilişkin, tez kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda hazırlanan detay analizleri Çizelge 4.3 ile sunulmaktadır.

Çizelge 4.3. Yapı elemanlarına ilişkin detay analizleri

Yapı elemanlarına ilişkin detay analizleri	
Beton blok kullanımında derzlerin yatayda ve düşeyde şaşırtmalı olarak uygulanması	 (Yazar tarafından oluşturulmuştur)
Kanalların duvardan geçişinin belli bir açıyla yapılması	 (NCRP, 2005: 78)
Kanallara duvardan geçiş noktasında dirsek yapılması	 (NCRP, 2005: 75)
Şaşırtma koridoru olan mekanlarda büyük ebatlı kanallara (HVAC gibi) dirsek yapmak mümkün değilse kanalların kırşunla ve/veya BPE ile sarılması	 (NCRP, 2005: 80)
Şaşırtma koridoru olan mekanlarda büyük ebatlı kanalların (HVAC gibi) geçişi için beton elemanlarla mini bir şaşırtma koridoru oluşturulması	 (NCRP, 2005: 80)
Dozimetri kabloları için kullanılan kanalların kontrol odası ile LINAC odası arasında duvardan düşeyde ve yatayda belli bir açıyla geçmesi	 (IPEM,2017:7-14)

Çizelge 4.3. (devam) Yapı elemanlarına ilişkin detay analizleri

Lazerlerin duvara yerleşiminde gereksinim dâhilinde çelik plakalarla ilave zırhlama yapılması	 (Sağlık Bakanlığı, 2018: 53)
Şaşırtma koridorunda tasarlanan lentolarda kanal ve lento boyutlarına bağlı olarak HVAC kanallarının lentodan uygun şekilde geçirilmesi	 (IPEM, 2017:7-15)
Şaşırtma koridoru olan mekanlarda kanalların tavandan şaşırtmalı olarak geçirilmesi	 (Yazar tarafından oluşturulmuştur)
Şaşırtma koridoru olan mekanlarda kanalların tavandan belli bir açıyla geçirilmesi	 (Yazar tarafından oluşturulmuştur)
Şaşırtma koridoru olmayan mekanlarda, kapı altından radyasyon sızıntısının önlenmesi için çukur zemin tasarlanması	 (IPEM, 2017: 7-16)
İlgili faktörler doğrultusunda uygulanabilecek konsept bir zırhlı kapı detayı	 (NCRP, 2005: 50)

Üretimini yaptıkları LINAC cihazları radyoterapi uygulamaları kapsamında yaygın olarak kullanılan Elekta ve Varian firmalarının yetkili kişileriyle yapılan görüşmeler doğrultusunda ayrıca şu bilgilere ulaşılmıştır:

- Lineer hızlandırıcı ile radyoterapi uygulamaları yapılan mekanların bodrum katta konumlandırılması tercih edilmekle birlikte, zemin katta projelendirilmesi durumunda ise, kişilerin birincil bariyerlerle doğrudan temasının engellenmesi için en az 1,5 metrelik alan tel çitle çevrilmeli, birincil bariyerin bitişiğinde kullanılan başka mekanlar var ise yine birincil bariyerle teması engellemek için boşluk oluşturularak ikinci bir beton duvar imalatı yapılmalıdır.
- LINAC odalarının proje aşamasında, yer hazırlığından sorumlu firma yetkilisinin proje sürecine dâhil edilmesi, cihazın mekânsal gereksinimlerinin karşılanabilmesi ve radyasyondan korunma konusunda tasarım unsurlarının uygun şekilde değerlendirilebilmesi bağlamında daha doğru ve sağlıklı projelerin ortaya çıkmasına yardımcı olacaktır.
- Cihazın mekan içerisindeki kurulumunun yapılabilmesi için inşaat imalatlarının tamamlanması ve cihazın söz konusu odalara taşınabilmesi için mimari tasarımın yeterli koridor ve mekan ölçülerini sağlayacak nitelikte planlanması gerekmektedir.
- Farklı firmalara ait cihazların tasarım gereklilikleri bağlamında birtakım farklılıklar bulunmakta olup, kullanılacak cihaz mimari proje aşamasında genellikle belli olmadığı için cihazların zemin tasarımıyla ilgili farklı gereksinimleri karşılamak üzere zeminde 50 cm'lik düşük döşeme oluşturulması önerilmektedir.
- Çok kalın beton zırhlara sahip olan LINAC odalarının yapım aşamasında dikkat edilmesi gereken bir husus; radyasyon sızıntısına sebep olabilecek boşluk, çatlak gibi istenmeyen durumların betonda oluşmamasıdır. Bu bağlamda, vibrasyonu optimum düzeyde yapılmış, boşluksuz beton imalatları yapılmalı, inşaat esnasında tayrot (tie-rod) delikleri oluşturulmamalıdır. Zırhlama bütünlüğünün korunabilmesi için duvar ve tavan elemanlarının beton imalatları mümkün olduğunca tek seferde yapılmalı, mümkün olmayan durumlarda da soğuk derz oluşumunu engellemek için farklı zamanlarda dökülecek betonların birleşim noktaları için şaşırtmalı yüzeyler oluşturularak beton imalatları yapılmalıdır.
- Ülkemizde ağır betonların maliyetinin çok yüksek ve tedarik sürelerinin çok uzun olması ve zırh kalınlıklarındaki azalmanın malzemenin kullanımındaki dezavantajları tolere

edecek değerlerde olmaması sebebiyle söz konusu mekanların yapımında ağır beton genellikle ülkemizde tercih edilmemektedir¹¹.

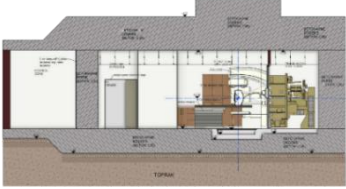
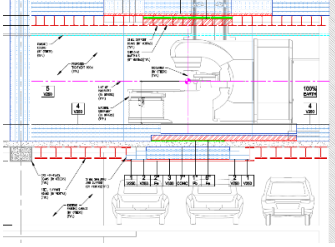
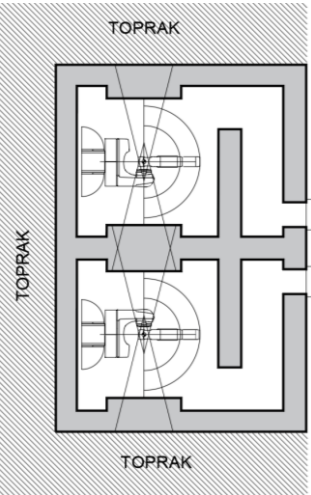
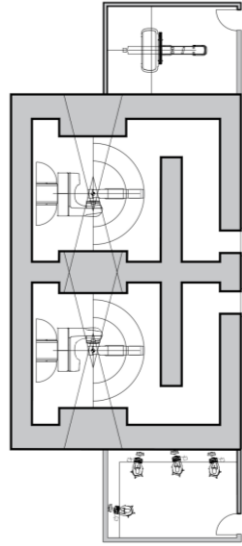
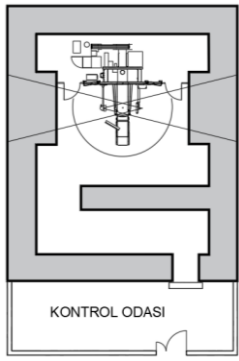
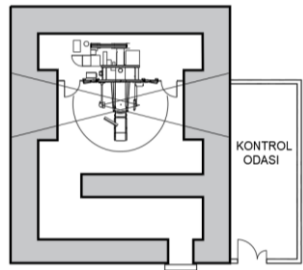
- Toprak; boşluk oranı ve bileşenleri bağlamında homojen yapıda olmadığı için zırh kalınlıklarını azaltacak nitelikte bir malzeme olarak değerlendirilebilmesi, çok iyi şekilde sıkıştırılmasına ve mekanın yerin ne kadar altında olduğuna bağlıdır. Bununla birlikte, zırhlamaya etkisini net şekilde belirtmek yine de zordur.
- Proje aşamasında genellikle firma ve kullanılacak cihaz belli olmadığı için en yüksek cihaz seviyesine ve cihaz gereksinimlerini karşılayacak nitelikteki en büyük mekan boyutlarına göre bir tasarım yapılması tavsiye edilmektedir.
- Şaşırtma koridoruna büküm eklenerek yeterli koridor uzunluğunun elde edildiği durumlarda ilgili faktörlere bağlı olarak zırhlanmış kapıya gereksinim ortadan kaldırılabilir. Ancak sağlık yapıları içerisindeki kullanım alanlarını daha etkin kullanıp alandan tasarruf sağlamak amacıyla bu tip tasarımlar ülkemizde genellikle uygulanmamaktadır¹².

LINAC mekanlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları bağlamında ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların öneri ve değerlendirmeleri doğrultusunda elde edilen bulgular ve ilgili firmalarla yapılan görüşmeler doğrultusunda hazırlanan, örnek tasarımlar üzerinden yapılan değerlendirmelerin yer aldığı bir tablo Çizelge 4.4'te yer almaktadır.

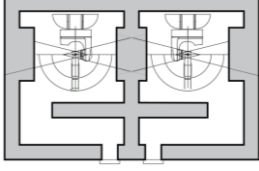
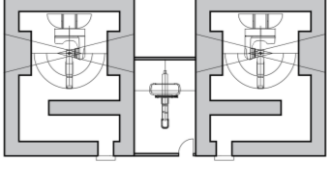
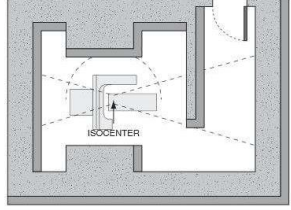
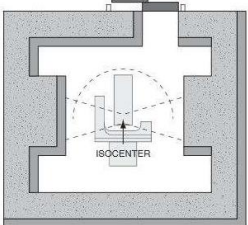
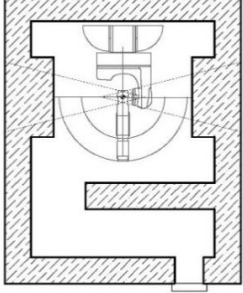
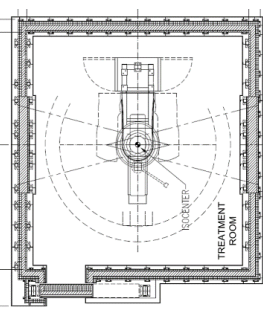
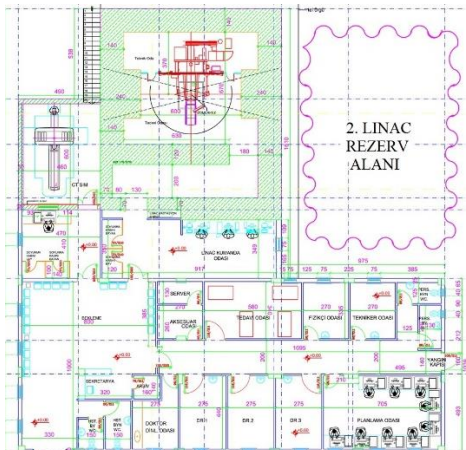
¹¹ Elekta firma yetkilisi Hakan Özvanlıgil, kişisel görüşme, 6 Kasım 2019.

¹² Varian firma yetkilisi Tuğrul Karaeşme, kişisel görüşme, 5 Kasım 2019.

Çizelge 4.4. LINAC mekanlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları için bir değerlendirme (yazar tarafından oluşturulmuştur)

	Tavsiye edilen	Tavsiye edilmeyen	Açıklama
Toprak zemin üstünde konumlandırma	 (Sağlık Bakanlığı, 2018: 40)	 (URL-22)	Mekanı toprak zemin yerine başka bir mekan üstünde konumlandırmak zemin için de zırhlama gereksinimi oluşturmasının yanı sıra binaya strüktürel anlamda da ciddi yük getirmesi sebebiyle tavsiye edilmemektedir.
Yer altında konumlandırma	 (Yazar tarafından hazırlanmıştır)	 (Yazar tarafından hazırlanmıştır)	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 çitle 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	 (Yazar tarafından hazırlanmıştır)	 (Yazar tarafından hazırlanmıştır)	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.

Çizelge 4.4. (devam) LINAC mekanlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları için bir değerlendirme (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Mekanların birbirine bitişik tasarlanması	 (Yazar tarafından hazırlanmıştır)	 (Yazar tarafından hazırlanmıştır)	Birincil ve ikincil bariyerlerin ortak kullanımını sağlamak için mekanların birbirine bitişik olarak tasarlanması önerilmektedir.
Mekanda şaşırtma koridoru tasarlanması	 (URL-33)	 (URL-33)	Mekan girişine ulaşan ikincil radyasyon miktarı ve kapının zırhlama gereksiniminin azaltılabilmesi için mekanın şaşırtma koridoru ile tasarlanması önerilmektedir.
Zırh malzemesi olarak beton kullanımı	 (Yazar tarafından hazırlanmıştır)	 (URL-31)	LINAC cihazı ile yüksek enerjili radyasyon uygulamalarının yapıldığı mekanlarda kurşun, duvar ve döşeme elemanları için zırh malzemesi olarak kullanımı uygun bir malzeme değildir. Kurşun, gereksinim dâhilinde ilave zırhlama ve kapı zırhlaması için kullanılmaktadır. Duvar ve döşeme elemanları için zırh malzemesi olarak beton kullanılmalıdır.
Konumlandırmada esneklik	 (URL-37)		Zemin katta konumlandırılan mekanlarda, gelecekte yapılması planlanan ikinci bir LINAC odası için, daha düşük zırh kalınlığına ihtiyaç duyularak, mevcut bariyerin ortak kullanılabilmesi amacıyla, rezerv alanının zırhlanmış mekanın bitişiğinde oluşturulması önerilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde tasarım süreci, farklı disiplinlere ait uzmanların işbirliği içerisinde ele aldıkları, disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde doğru ve başarılı bir ürünün elde edilebileceği, karmaşık bir sistem haline dönüşmüştür. Bilim ve teknolojinin birbirini sürekli olarak yüksek bir hızda geliştirdiği günümüzde, daha grift hale gelen tasarım süreci, var olan tasarım parametrelerine, kurgu dâhilinde değerlendirilmesi gereken yeni öğeler eklemektedir. Radyasyon uygulamaları da mimari tasarımın hedef niteliklerinden; işlevsellik, biçimsellik gibi olguların yanı sıra, mekanın 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 yapılan radyasyon zırhlamasına yönelik unsurların doğru şekilde tasarlanması, izin verilen sınırların üstünde doz alımının engellenmesini ve dolayısıyla radyasyonun insan sağlığına olan olumsuz etkilerinden kaçınabilmeyi sağlamaktadır.

Bu tez çalışması için ana araştırma sorusu olarak: “LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların tasarım sürecinde birtakım tasarım unsurlarıyla optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretilebilir mi?” sorusu sorulmuştur. Bu ana araştırma sorusunun cevabına ulaşmak için ayrıca şu alt sorular da araştırılmıştır:

LINAC mekanlarının tasarım süreci için radyasyon zırhlamasının önemi nedir?

Radyoterapi uygulamalarında kullanımı giderek yaygınlaşan LINAC cihazının kullanıldığı alanlar, yüksek enerjili radyasyon uygulamalarının yapıldığı, radyasyondan korunabilmek için özel hususlara dikkat edilmesini gerektiren özel mekanlardır. Zırhlama gereksinimleri çerçevesinde oldukça kalın zırhlara sahip olan bu mekanlar, mimari tasarım sürecinde, yapı içinde konumlandırmadan mekanik ve elektrik tesisat elemanlarına yönelik detaylara kadar birçok faktörün değerlendirildiği çerçevede bir kurgulanma gerektirir. Bu bağlamda söz konusu cihazların kullanıldığı mekanlarda radyasyonun insan sağlığına olumsuz etkilerinden korunabilmek, mekan dışındakilerin alacağı radyasyon dozunu izin verilen

değerler çerçevesinde sınırlayabilmek için yapısal zırhlamanın uygun şekilde yapılması önemlidir.

“Radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları kapsamındaki bileşenler nelerdir?”

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 mekanlarının tasarımında radyasyon zırhlaması için kullanılan yapı malzemeleri nelerdir?”

LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlar için zırh malzemesi olarak beton kullanılmaktadır. Ayrıca, kurşun, çelik, polietilen gibi malzemeler gereksinim dâhilinde ilave zırhlama malzemesi olarak ve kapı zırhlaması için kullanılmaktadır.

“LINAC cihazı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanların tasarım sürecinde; mali, hammadde, enerji gibi kaynakları daha etkin ve verimli kullanmaya yönelik tasarım unsurları ve radyasyondan korunmaya yönelik önlemler ile optimal ve zırhlama bütünlüğü çerçevesinde tasarımlar üretebilmek mümkündür” olarak tez çalışması için ortaya atılan hipotez doğrulanmıştır.

Söz konusu mekanlar için ilgili disiplinler arası işbirliği ve iletişim çerçevesinde bir tasarım şarttır. Bu bağlamda en büyük görev proje sürecinde tasarım parametrelerini uygun şekilde bir araya getirerek bir tasarım kurgusu ortaya çıkarmak ve disiplinler arası koordinasyonu sağlamakla yükümlü olan mimara düşmektedir. Ayrıca, ülkemizde konu ile ilgili yetkili kurum olan NDK’nın mimari proje üzerinden değerlendirmeleri ve yerinde yaptığı radyasyon kontrolleri radyasyon güvenliğinin gereken şekilde sağlanmasının ölçütü olarak esastır.

Tez çalışması kapsamında ayrıca şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Minimum maliyette etkin bir radyasyon koruması, her tasarım için ilgili faktörlerin tümünün dikkate alınıp değerlendirilmesiyle mümkün olabilir.

- Bina içinde konumlandırma yapılırken ilgili faktörlerin değerlendirilmesi çerçevesinde bir tasarım yapılmalıdır.
- Zırhlama gereksinimini azaltacak stratejiler mimari tasarım sürecinde değerlendirilerek tasarıma yansıtılmalıdır.
- Zırhlama için malzeme tercihi yapılırken, ilgili bütün faktörler değerlendirilerek, ekonomiklik ve yapısal özellikleri, yüksek zırhlama potansiyeli ile biraraya getirebilen seçenekler tercih edilmelidir.
- Radyasyon zırhlamasına yönelik detaylara ilişkin tasarım unsurları; duvar, döşeme ve kapı elemanları bağlamında dikkatle değerlendirilmeli ve zırhlama bütünlüğünün bozulmamasına yönelik gerekli tedbirler bu bağlamda alınmalıdır.

Bu tez çalışmasında; konu kapsamında çalışan mimarların tasarım sürecinde problemin temelini anlayıp, tasarımı optimize etmeye yönelik unsurları ilgili faktörler çerçevesinde dikkatli şekilde ele almaları, tasarım sürecinde ilgili disiplinlerle gereken işbirliği içerisinde çalışmaları, bu şekilde, radyasyonun insan sağlığına olan olumsuz etkilerinden korunabilmeyi sağlayacak ve çeşitli kaynakları etkin ve verimli kullanmayı mümkün kılacak tasarımlar elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, radyasyon zırhlamasına yönelik uygun projelendirme yapılmasının yanı sıra, uygulama esnasında da beton yoğunluk değeri ve beton sınıfının da gereken şartları sağlamasına ilişkin kontrollerin yapılması, radyasyon sızıntısına sebep olabilecek boşluk ve çatlak gibi istenmeyen durumların betonda oluşmaması için gereken özen ve dikkatin gösterilmesi önem teşkil etmektedir.

Bu bağlamda, söz konusu mekanların yapım aşamasından sonra, radyasyon güvenliğinin sağlanmasına ilişkin yapılacak denetimler sonucunda zor ve maliyetli olan inşaat tadilat süreçlerine yol açacak durumlarla karşılaşılmasında için, yeterli zırh kalınlıkları, uygun malzeme kullanımı ve zırhlama bütünlüğünün bozulmamasına yönelik önlemlerin proje ve inşaat sürecinde doğru şekilde tasarlanıp uygulanması önemlidir. Ayrıca, tez çalışması kapsamında zırh kalınlıklarını azaltmaya yönelik ağır beton gibi yapı malzemeleriyle ilgili araştırmaların yapılmakta olduğu bulgusuna ulaşılmış olup, bu 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.

Tez kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda hazırlanan, lineer hızlandırıcı ile radyoterapi uygulamalarının yapıldığı mekanlarda radyasyon zırlamasına yönelik tasarım unsurları için bir değerlendirme Çizelge 5.1 ile sunulmuştur.

Çizelge 5.1. LINAC mekanlarının radyasyon zırhlamasına yönelik tasarım unsurları için bir değerlendirme (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Mekansal Tasarım		Malzemeler		Detaylar	
Konum	-Operasyonel verimlilik, maliyet, yapı strüktürü ve esneklik kurgusu (gelecekte genişleme, artan iş yükü ve/veya meşguliyet faktörü gibi) çerçevesinde bir tasarım yapılmalıdır.	Normal beton	-Zırh malzemesi olarak kullanımı uygun bir malzemedir. -Avantajlı özellikleri sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. -Radyasyon zırhı olarak min. 2,35 g/cm ³ yoğunlukta ve min. C35 sınıfı beton kullanılmaktadır. -Zırhlama gereksinimini karşılamak için gereken kalın zırhlar yapıda alan kaybına yol açar.	Duvar-Döşeme	-Çeşitli amaçlar için kullanılan tesisat elemanlarının duvar ve döşeme elemanlarıyla kesiştiği noktalarda zırhlama bütünlüğünün bozulmamasına yönelik unsurlar tasarım sürecinde değerlendirilmelidir. -Tesisat elemanları kesinlikle birincil bariyerlerden değil, zırhlama gereksiniminin daha düşük olduğu ikincil bariyerlerden geçirilmelidir. -Kanallar ortogonal olarak değil, belli bir açıyla veya dirsek yaparak mekan dışına geçirilmelidir. -HVAC gibi kesit alanı büyük kanalların şaşırtma koridoru sonundan, kapı üstünden ve olabildiğince yüksek bir noktadan mekan dışına geçişi sağlanmalı, gereksinim dâhilinde ilave zırhlama yapılmalıdır. -Kullanılacak ilave zırhlama malzemesi kalınlığı yerine geçtiği zırh malzemesiyle eşdeğer zırhlama özelliğinde olmalıdır. -Zırhlama için kullanılacak farklı malzemelerin birleşim noktaları zırhlamanın genel bütünlüğü bozulmayacak şekilde tasarlanmalıdır.
Zırhlama gereksinimini azaltmaya yönelik unsurlar	-Toprak zemin üstünde konumlandırma, -Yer altında konumlandırma, -Bitişikte ve/veya üst katta başka mekanlar konumlandırılmışsa bu mekanların yoğun kullanıma sahip olmayan (depo, teknik oda gibi) alanlar olarak planlanması, -Bariyerlerin ortak kullanımı için mekanların bitişik olarak tasarlanması, -Bitişik alanların meşguliyetleri dikkate alınarak cihaz yönünün belirlenmesi, -Kontrol odasının ikincil bariyer arkasında tasarlanması, -İkincil radyasyonların mekan girişine ulaşan miktarlarının azaltılmasına yönelik önlemlerin alınması, hususları ilgili faktörlere bağlı olarak tasarım sürecinde değerlendirilmelidir.	Ağır beton	-Artan yoğunluk değeri zırhlama özelliğini de aynı doğrultuda artırır. Daha ince zırh kalınlıkları yapıda alan kullanımı açısından avantaj sağlar. -Ülkemizde kullanımı yaygın olmamakla birlikte, barit agregası ağır beton üretimi için sıklıkla tercih edilen bir malzemedir.		
		Beton blok	-Alan kısıtlaması olan durumlarda yüksek yoğunluklu beton bloklar kullanılabilir. -Zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi için özel önlemler alınması gerekir.		
		Kurşun ve Çelik	-Fotonlar için iyi bir zırh malzemesidir (özellikle kurşun, zırhlama özelliği çok yüksek bir malzemedir) Nötronlar için ise kullanımı uygun değildir. -Zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi amacıyla ilave zırhlama malzemesi olarak ve kapılarda gereksinim dâhilinde kullanılmaktadır.		
Mekana Erişim	-Şaşırtma koridoru ile veya ağır, zırhlanmış bir kapı ile doğrudan erişim alternatifleri ilgili faktörler çerçevesinde değerlendirilmelidir. -Mekana doğrudan erişim sağlayan zırhlanmış kapılar bitişikteki ikincil bariyerle aynı zırhlama gereksinimine sahip olup, çok ağır ve maliyetlidir. -Ülkemizde genellikle, kapının zırhlama gereksinimini azaltan şaşırtma koridorlu tasarımlar uygulanmaktadır.	Kurşun ve Çelik	-Fotonlar için iyi bir zırh malzemesidir (özellikle kurşun, zırhlama özelliği çok yüksek bir malzemedir) Nötronlar için ise kullanımı uygun değildir. -Zırhlama bütünlüğünün sağlanabilmesi amacıyla ilave zırhlama malzemesi olarak ve kapılarda gereksinim dâhilinde kullanılmaktadır.	Kapı	-Malzeme seçimi ile malzeme kalınlıkları, ilgili faktörlerin tümünün değerlendirilmesi ve zırhlama hesaplamalarına yansıtılması neticesinde ortaya çıkmaktadır. -Yüksek enerjili (>10 MV) cihazların kullanıldığı mekanlarda 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. -Kapı çevresinden radyasyon sızıntının önlenmesine yönelik tedbirler alınmalıdır.
		Polietilen	-Nötronları zırhlama özelliği çok yüksek olan polietilen saf olarak veya ağırlıkça %5 bor içeriğiyle gereksinim dâhilinde (özellikle kapılarda) yaygın olarak kullanılmaktadır.		
		Toprak	-Yoğunluğu değişkendir. -Yer altında konumlandırılan mekanlar için ilgili faktörlere bağlı olarak zırh kalınlıklarının azaltılabilmesini sağlar.		
-Her mekan için ilgili faktörlerin bütünlük olarak değerlendirilmesi çerçevesinde bir tasarım yapılmalıdır. -Tasarım süreci disiplinler arası koordinasyon çerçevesinde yürütülmelidir. -Ülkemizde, yetkili kurum olan NDK'nın mimari proje üzerinden değerlendirmeleri doğrultusunda zırhlama uygunluk raporu verilmektedir.					

KAYNAKLAR

- Akgün, Y., Durmuş, A. ve Durmuş, A. (2007). Barit Agregasıyla Üretilen Ağır Bir Betonun Özellikleri. 7. *Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı*. İstanbul. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 465-474.
- Akkurt, I. Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S. and Basyigit, C. (2010). Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate. *Annals of Nuclear Energy*, 37, 910-914.
- Akkurt, I. and El-Khayatt, A. M. (2013). The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding. *Annals of Nuclear Energy*, 51, 5-9.
- Akyol, B. (2015). *Radyoterapi Merkezi İnşaatlarında Malzeme Seçiminin Tasarıma Etkisinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 74.
- Apak, H. (2014). *Yapılarda Radon Etkisini Azaltmaya Ya Da Yok Etmeye Yönelik Bir Yaklaşım*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 89.
- Atakan, Y. (2014). *Radyasyon ve Sağlığımız* (Birinci Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 4-5, 21, 23.
- Chang, R., Goldsby, K. A. (2018). *Genel Kimya Temel Kavramlar*. (Çev. R. İnım, S. Aksoy ve T. Uyar). Ankara: Palme Yayıncılık. (Eserin orijinali 2014'te yayımlandı), 733, 738.
- Coşkun, Ö. (2011). İyonize radyasyonun biyolojik etkileri. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 13-17.
- Demir, F., Budak, G., Sahin, R., Karabulut, A., Oltulu, M., Şerifoğlu, K. and Ün, A. (2010). Radiation transmission of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator. *Annals of Nuclear Energy*, 37(3), 339-344.
- Ergül, S. (2009). *Eğitim Fakülteleri İçin Genel Kimya* (İkinci Baskı). Ankara: Anı Yayıncılık, 242.
- Erman, O. ve Yılmaz, N. (2017). Mimari tasarımda konsept ve bağlam ilişkisi üzerine. *Uluslararası Hakemli Tasarım ve Mimarlık Dergisi*, 10, 96-115.
- Institute of Physics and Engineering in Medicine. (2017). Design and Shielding of Radiotherapy Treatment Facilities; *IPEM Report 75*, UK, 13-5, 2-1, 4-2, 4-23, 2-2, 7-10, 7-11, 7-12, 7-5, 7-13, 7-14, 7-15, 7-16, 4-17.
- International Atomic Energy Agency. (2006). Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities; *IAEA Safety Reports Series No.47*, Austria, 1, 19-20, 4, 25-26, 10-14, 43, 16, 42.

International Atomic Energy Agency. (2014). Radiotherapy Facilities: Master Planning and Concept Design Considerations; *IAEA Human Health Reports No.10*, Austria, önsöz, 1, 8, 11.

International Commission on Radiological Protection. (2007). Annals of the ICRP; *ICRP Publication 103*, UK, 81.

İnternet: TAEK. Kapalı Ortamlarda Radon ve Yapı Malzemelerindeki Radyoaktiviteye İlişkin Kılavuz. URL-1: [http://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/teknik-bilgiler-kilavuzlar/Kapalı-Ortamlarda-Radon-ve-Yapı-Malzemelerindeki-Radyoaktiviteye-İlişkin-Kılavuz-\(RSGD-KLV-13\)/lang.tr-tr/](http://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/teknik-bilgiler-kilavuzlar/Kapalı-Ortamlarda-Radon-ve-Yapı-Malzemelerindeki-Radyoaktiviteye-İlişkin-Kılavuz-(RSGD-KLV-13)/lang.tr-tr/), Son Erişim Tarihi: 24.03.2019.

İnternet: WHO. Cancer Tomorrow. URL-2: <https://gco.iarc.fr/tomorrow/home>, Son Erişim Tarihi: 18.09.2019.

İnternet: Nükleer Akademi. URL-3: <http://nukleerakademi.org/nukleer-guvenlik/radyasyon/>, Son Erişim Tarihi: 24.03.2019.

İnternet: TAEK. Türkiye'de Radyasyon Kaynakları 2018. URL-4: <http://www.taek.gov.tr/tr/component/remository/func-startdown/1852/lang.tr-tr/?Itemid=301>, Son Erişim Tarihi: 23.05.2019.

İnternet: TAEK. Kullanma Bulundurma Üst Bilgi. URL-5: <http://www.taek.gov.tr/tr/hizmetlerimiz/radyasyon-guvenligi/single-article/lisans/112-haberler/kullanma-bulundurma-lisans-iislemeleri.html>, Son Erişim Tarihi: 24.03.2019.

İnternet: TAEK. Radyoaktif Madde İçeren Tüketici Ürünlerinde Radyasyondan Korunmaya İlişkin Kılavuz. URL-6: <http://www.taek.gov.tr/tr/component/remository/func-startdown/1810/lang.tr-tr/?Itemid=301>, Son Erişim Tarihi: 24.03.2019.

İnternet: Radyoterapide Simülasyon. URL-7: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Radyoterapide%20Simulasyon.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: MEB. Radyoterapi Uygulama Planı. URL-8: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Radyoterapi%20Uygulama%20Planı.pdf, Son Erişim Tarihi: 24.03.2019.

İnternet: AFAD. İçsel ve Dışsal Radyasyondan Korunma. URL-9: <https://www.afad.gov.tr/kbrn/icsel-ve-dissal-radyasyondan-korunma>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: Resmi Gazete. Nükleer Tesislerde Radyasyondan Korunma Yönetmeliği. URL-10: <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/05/20180529-17.htm>, Son Erişim Tarihi: 18.09.2019.

İnternet: URL-11: <http://bmeng.blogspot.com/2009/07/linear-accelerator-linac.html>, Son Erişim Tarihi: 18.09.2019.

İnternet: Memorial. Radyoterapi Nedir, Nasıl Uygulanır, Yan Etkileri Nelerdir? URL-12: <https://www.memorial.com.tr/saglik-rehberleri/radyoterapi/>, Son Erişim Tarihi: 18.09.2019.

İnternet: A guide to the use of lead for radiation shielding. URL-13: <https://www.canadametal.com/wp-content/uploads/2016/08/radiation-shielding.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: TAEK. Tıbbi Radyoloji Uygulamalarının Yapıldığı Odaların Tasarımında Dikkat Edilecek Hususlara ve Zırhlama Koşullarına İlişkin Kılavuz. URL-14: <http://www.taek.gov.tr/tr/component/remository/func-startdown/1433/lang.tr-tr/?Itemid=301>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: TAEK. Radyoterapi Uygulamalarının Yapıldığı ve/veya Simülasyon Cihazlarının Bulunduğu Odaların Zırhlanmasına İlişkin Mimari Projede Bulunması Gerekli Hususlar. URL-15: <https://taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/zirhlama-hesabi-islemleri/radyoterapi/Radyoterapi-Uygulamalarının-Yapıldığı-Ve-Veya-Simülasyon-Cihazlarının-Bulunduğu-Odaların-Zırhlanmasına-İlişkin-Mimari-Projede-Bulunması-Gerekli-Hususlar>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: TAEK. Zırhlama Hesaplamaları Kılavuzu. URL-16: <http://www.taek.gov.tr/tr/component/remository/func-startdown/1400/lang.tr-tr/?Itemid=301>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: TAEK. Zırhlama. URL-17: <http://www.taek.gov.tr/tr/hizmetlerimiz/radyasyon-guvenligi/article-category-list.html>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: TAEK. Dış Röntgen Cihazları ile Yapılan Uygulamalar İçin Radyasyon Güvenliği Kılavuzu. URL-18: <http://www.taek.gov.tr/tr/component/remository/func-startdown/1755/lang.tr-tr/?Itemid=301>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: TAEK. Veterinerlikte Radyoloji Uygulamaları İçin Radyasyondan Korunma Programının Hazırlanmasına İlişkin Kılavuz. URL-19: <http://www.taek.gov.tr/tr/component/remository/func-startdown/1795/lang.tr-tr/?Itemid=301>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: URL-20: <https://www.saratoga.com/saratogabusinessjournal/2019/04/saratoga-hospital-spending-6m-to-expand-mollie-wilmot-radiation-oncology-center/>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: TomoTherapy Cihazı ve Tedavisi Nedir?. URL-21: http://www.tomoterapitedavisi.com/tomotherapy-cihazı-ve-tomoterapi_tedavisi-nedir, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: Johnston, Steven. The Science of Radiation Shielding. URL-22: <https://network.aia.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=a0516f34-41dd-46af-980f-07487f132b75>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: NELCO. Impervius Lead. URL-23: <https://www.nelcoworldwide.com/medical-shielding-products/lead-products/>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: NELCO. AlphaShield Modular Lead Brick. URL-24: <https://www.nelcoworldwide.com/medical-shielding-products/lead-products/lead-brick/>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: NELCO. MegaShield Modular Block Systems. URL-25: <https://www.nelcoworldwide.com/medical-shielding-products/concrete/megashield-modular-block/>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: NELCO. UltraShield Modular Block. URL-26: <https://www.nelcoworldwide.com/medical-shielding%20products/concrete/high-density-concrete-block/>, Son Erişim Tarihi: 25.03.2019.

İnternet: TAEK. Tıbbi Radyoloji Uygulamalarının Yapıldığı Odaların Zırhlanmasına İlişkin Mimari Projede Bulunması Gerekli Hususlar. URL-27: <http://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/zirhlama-hesabi-islemleri/radyoloji/Tıbbi-Radyoloji-Uygulamalarının-Yapıldığı-Odaların-Zırhlanmasına-İlişkin-Mimari-Projede-Bulunması-Gerekli-Hususlar>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: TAEK. Nükleer Tıp Uygulamalarının Yapıldığı Ünitelerin (Teşhis ve Ayakta Tedavi) Zırhlanmasına İlişkin Mimari Projede Bulunması Gerekli Hususlar. URL-28: [http://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/zirhlama-hesabi-islemleri/nukleer-tip/Nükleer-Tıp-Uygulamalarının-Yapıldığı-Ünitelerin-\(Teşhis-Ve-Ayakta-Tedavi\)-Zırhlanmasına-İlişkin-Mimari-Projede-Bulunması-Gerekli-Hususlar](http://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/zirhlama-hesabi-islemleri/nukleer-tip/Nükleer-Tıp-Uygulamalarının-Yapıldığı-Ünitelerin-(Teşhis-Ve-Ayakta-Tedavi)-Zırhlanmasına-İlişkin-Mimari-Projede-Bulunması-Gerekli-Hususlar), Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: TAEK. Radyoaktif Madde İle Yataklı Tedavi Yapılan Ünitelerin Zırhlanmasına İlişkin Mimari Projede Bulunması Gerekli Hususlar. URL-29: [https://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/zirhlama-hesabi-islemleri/nukleer-tip/Nükleer-Tıp-Uygulamalarının-Yapıldığı-Ünitelerin-\(Teşhis-Ve-Ayakta-Tedavi\)-Zırhlanmasına-İlişkin-Mimari-Projede-Bulunması-Gerekli-Hususlar](https://www.taek.gov.tr/tr/belgeler-formlar/rsgd-formlari/zirhlama-hesabi-islemleri/nukleer-tip/Nükleer-Tıp-Uygulamalarının-Yapıldığı-Ünitelerin-(Teşhis-Ve-Ayakta-Tedavi)-Zırhlanmasına-İlişkin-Mimari-Projede-Bulunması-Gerekli-Hususlar), Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: Radkosis. Linak Kapı Çözümleri. URL-30: <http://radkosis.com/linak-kapi-cozumleri/>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: Rajat Kudchadker. Radiation Vault Design and Shielding. URL-31: <https://international.anl.gov/training/materials/AX/Kudchadker/1-Room-Shield-Design.pdf>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: NELCO. Radiation Shielding Swing Door. URL-32: <https://www.nelcoworldwide.com/medical-shielding-products/shielded-doors/guardian-swing-door/>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: RPP. Neutron Shielding Door Options. URL-33: <https://www.radiationproducts.com/neutron-doors.htm>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: Veritas. Radiaiton Shielded Sliding Doors. URL-34: <http://www.veritas-medicalsolutions.com/radiation-shielded-doors-sliding.html>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: URL-35: http://www.veritas-medicalsolutions.com/images/single_leaf.jpg, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: Veritas. URL-36: <http://www.veritas-medicalsolutions.com/radiation-shielding-compare.html>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2019.

İnternet: RADMED. URL-37: <http://www.radmedyapi.com.tr/eng/projelendirme/mimari-projelendirme/>, Son Erişim Tarihi: 10.11.2019.

Kaçar, A. (2006). *Yapılarda Radyasyon Kalkanı Olarak Kullanılan Barit Agregalı Ağır Beton Elemanların Zırh Kalınlık Hesaplarının Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 53-54.

Kılınçarslan Ş., Başıyigit, C., Molla T. ve Sancar S. (2011). Radyoaktif ışınlardan korunaklı ekolojik yapılar. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 93-99.

Kilincarslan, S. Akkurt, I. and Basyigit, C. (2006). The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering A*, 424(1-2), 83-86.

Kosako, K., Oishi, K., Nakamura, T. and Kiyanagi, Y. (2014). Optimum shielding structure for the wall of medical LINAC facility. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4, 276-279.

Kumaş, A. (2009a). *Radyasyon Fiziği ve Tıbbi Uygulamaları* (İkinci Baskı). Ankara: Palme Yayıncılık, 31.

Kumaş, A. (2009b). *Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği* (Birinci Baskı). Ankara: Palme Yayıncılık, 12, 16-19, 32-33, 35, 39-40.

Lamarsh, J. R., Baratta, A. J. (2015). *Nükleer Mühendisliğe Giriş*. (Çev. H. O. Zabunoğlu). Ankara: Palme Yayıncılık. (Eserin orijinali 2001’de yayımlandı), 507.

Lombardi, M. H. (1999). *Radiation Safety in Nuclear Medicine* (Birinci Baskı). Florida: CRC Press, 35, 42, 86.

Martin, J. E. (2013). *Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği*. (Çev. A. G. Tanır, M. H. Bölükdemir ve K. Koç). Ankara: Palme Yayıncılık. (Eserin orijinali 2006’da yayımlandı), 367-368, 660.

Mesbahi, A. and Ghiasi, H. (2018). Shielding properties of the ordinary concrete loaded with micro- and nano-particles against neutron and gamma radiations. *Applied Radiation and Isotopes*, 136, 27-31.

National Council on Radiation Protection and Measurements. (2004). Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities; *NCRP Report No. 147*, 16-17, 22.

- 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*, 1, 32, 74-82, 11-17, 65-72, 106, 91, 37, 43, 47-50.
- Oto, B., Gür, A., Kaçal, M. R., Doğan, B. and Arasoğlu, A. (2013). Photon attenuation properties of some concretes containing barite and colemanite in different rates. *Annals of Nuclear Energy*, 51, 120-124.
- Ouda, A. S. (2015). Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. *Progress in Nuclear Energy*, 79, 48-55.
- Sağlık Bakanlığı. (2018). *LINAC (Doğrusal Hızlandırıcı)'nın Mimari ve Temel Altyapı Gereksinimleri*. Ankara: Murat ALPER ve İrem MÜHÜRÇÜ (Editörler), 1, 4-5, 11-15, 23, 52-54, 38-40, 48-49, 59.
- Samarin, A. (2013). Use of concrete as a biological shield from ionising radiation. *Energy and Environmental Engineering*, 1(2), 90-97.
- Shams, T., Eftekhari, 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.
- Şenkesen, Ö., Göksel, E. O. ve Küçüçük, H. (2016). Görüntü Kılavuzluğunda Radyoterapi Tekniği ve Uygulamaları. *Türkiye Klinikleri Radiation Oncology - Special Topics*, 2(3), 131-156.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2002). *Radyasyon ve Biz*. Ankara: Yusuf Ergün Togay, 2, 4-6, 10, 12, 14-16.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2009). *Radyasyon, İnsan ve Çevre*. Ankara: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 73, 75, 11, 32, 1, 6-8, 15-16, 23-24.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2011). Kültürel Mirasın Nükleer Tekniklerle Tanımlanması ve Korunması; *TAEK TR-2011-09*, Ankara, 1-2.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2009). Effects of Ionizing Radiation; *UNSCEAR 2006 Report Volume 2*, United Nations Publications, 201-203.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation; *UNSCEAR 2000 Report Volume 1: Sources*, United Nations Publications, 5, 158-177, 180, 191-192.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2010). Sources and Effects of Ionizing Radiation; *UNSCEAR 2008 Report Volume 1*, United Nations Publications, 223, 233, 404.
- Waly, E. S. A., Al-Qous, G. S. and Bourham, M. A. (2018). Shielding properties of glasses with different heavy elements additives for radiation shielding in the energy range 15–300 keV. *Radiation Physics and Chemistry*, 150, 120-124.

- 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.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAŞ, Seval Yeşim
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.12.1984, Konya
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (530) 681 02 94
 e-mail : syesimbass@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Mimarlık	Devam ediyor
Lisans	Selçuk Üniversitesi / Mimarlık	2009
Lise	Konya Karatay Anadolu Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Ticaret Bakanlığı	Mimar
2013-2018	Akdeniz Üniversitesi	Mimar
2011-2013	Gazi Üniversitesi	Mimar
2009-2011	Akdeniz Üniversitesi	Mimar

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Baş, S. Y., Arslan Selçuk, S. (2019, Nisan) *Binalarda Radon Gazı Etkisinin Azaltılmasına Yönelik Alınabilecek Önlemler Üzerine Bir Değerlendirme*. 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Ankara, Turkey.

Hobiler

Kitap okumak, seyahat etmek



GAZİ GELECEKTİR...