

**NÜKLEER TIPTA KULLANILAN RADYOİZOTOPLARIN RADYASYON
ZIRHLAMASI İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF RADIATION SHIELDING SOFTWARE FOR
RADIOISOTOPES USED IN NUCLEAR MEDICINE**

NEŞE YURTTAŞ

PROF. DR MEHMET TOMBAKOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2020

İthaf Sayfası

Yazarın İstedine Bağlı olarak

ÖZET

NÜKLEER TIPTA KULLANILAN RADYOİZOTOPLARIN RADYASYON ZIRHLAMASI İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Neşe YURTTAŞ

Yüksek Lisans, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU

Temmuz, 2020 , 98 sayfa

Bu çalışmada ülkemizde Hastanelerin Nükleer Tıp Bölümlerinde kullanılan radyoizotopların radyasyon zırhlaması hesabında kullanılmak üzere bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım sayesinde Nükleer Tıp Bölümlerinde zırhlama yapılması planlanan alanlarda kullanılması planlanan beton veya kurşun zırh malzemesine göre malzeme kalınlığının ne kadar olması gerektiğinin kolay bir şekilde hesaplanması amaçlanmıştır.

Yazılım dili olarak C Sharp (C#) kullanılmıştır. Geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçlar matematiksel formüllerle yapılan hesaplamalar ile karşılaştırılarak güvenilirliği kontrol edilmiştir.

Monte Carlo yöntemi kullanılarak farklı radyonüklidler ve zırhlama malzemeleri için yazılımda kullanılması gereken parametrelerin belirlenmesi için örnek hesaplamalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nükleer Tıpta Zırhlama Hesabı, C Sharp (C#), Beton Zırhlama, Kurşun Zırhlama, Yazılım

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF RADIATION SHIELDING SOFTWARE FOR RADIOISOTOPES USED IN NUCLEAR MEDICINE

Neşe YURTTAŞ

Master of Science, Department of Nuclear Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU

July 2020, 98 pages

In this study, a shielding software was developed in order to use in radiation shielding calculations of radioisotopes used in the Nuclear Medicine Departments of Hospitals in our country. Utilizing the software, it is aimed to easily calculate the thickness of concrete or lead shielding materials planned to be used in the areas where shielding is planned in Nuclear Medicine Departments.

C Sharp (C #) programing language is used for software. The results obtained from the developed software were compared with the calculations made with mathematical formulas and their correctness was checked.

Sample calculations were performed to determine the parameters need to be used in the software for different radionuclides and shielding materials by using the Monte Carlo method.

Keywords: Shielding Calculations In Nuclear Medicine, C Sharp (C#), Concrete Shielding, Lead Shileding, Software

TEŞEKKÜR

Değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU'na tez sürecim boyunca verdiği destek ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim.

Çalışmalarına destek veren sayın jüri üyelerim ve değerli hocalarıma şükranlarımı bildiririm.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez dönemimde hem maddi desteği hem de en zor zamanlarda verdiği manevi desteği için eşim Çağlar YURTTAŞ'a, kıymetli annemiz Zeynep YURTTAŞ'a, babamız İsmail YURTTAŞ'a ve varlığı ile hayatımıza renk katan kızımız Zeynep YURTTAŞ'a teşekkür ederim.

Monte Carlo hesaplamaları yaparak tezime katkı sağlayan Gökhan PEDİZ'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Emine KAYA, babam Ayhan KAYA, kardeşlerim Murat KAYA, Adem KAYA ve Alper KAYA'ya ve kuzenim Zafer ÇİNPOLAT'a teşekkürü borç bilirim.

Neşe YURTTAŞ

Haziran 2020, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
1.GİRİŞ	1
2.GENEL BİLGİLER	3
2.1 Nükleer Tıp	3
2.1.1 Nükleer Tıbbın Tarihçesi	3
2.2 Radyasyon.....	5
2.3 Radyasyondan Korunma	8
2.3.1 Zaman	9
2.3.2 Mesafe.....	9
2.3.3 Zırhlama.....	9
2.4 Radyasyon Alanları ve Bu Alanların Sınıflandırılması	10
3. NÜKLEER TIP ÜNİTELERİ	11
3.1 Nükleer Tıp Ünitelerinin Sınıflandırılması.....	11
3.2 Nükleer Tıp Ünitelerinde Bulunan Radyasyon Kaynakları	11
3.2.1 Alfa Parçacıkları	11
3.2.2 Beta Parçacıkları	12
3.2.3 Gama Işınları.....	13
3.3 Nükleer Tıp Ünitelerinde Bulunan Alanlar	13
3.3.1 Sıcak oda.....	13
3.3.2 Radyoaktif Katı Atık Odası	13
3.3.3 Enjeksiyon Odası	14
3.3.4 Görüntüleme Odası	14
3.3.5 Efor Odası	14
3.3.6 Radyoaktif Yetişkin ve Radyoaktif Çocuk Hasta Bekleme Odası	14
3.3.7 Radyoaktif Hasta Tuvaleti	15
3.3.8 Rayonüklit Tedavi Odası	15
3.3.9 Arınma Duş Sistemi.....	15
3.3.10 Tiroid Test (Uptake) Odası	15
3.3.11 Ayakta tedavi odası.....	15

3.4 Nükleer Tıp Ünitelerinde Görüntüleme Kullanılacak Radyofarmasötiklerin Seçimi.....	15
4. SPECT ÜNİTESİ.....	17
4.1 SPECT Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları.....	19
5. PET ÜNİTESİ.....	20
5.1 PET Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları .	21
6. RADYONÜKLİT TEDAVİ ÜNİTELERİ.....	23
6.1 Radyonüklit Tedavi Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları.....	24
7. ZIRHLAMA	25
7.1 Zırhlamada Kullanılan Başlıca Malzemeler	27
7.1.1 Beton.....	27
7.1.2 Kurşun.....	27
7.1.3 Tuğla ve Benzer Malzemeler	28
7.1.4 Çelik.....	28
7.1.5 Alçı Panel.....	28
7.1.6 Toprak.....	28
7.1.7 Cam.....	29
7.2 Nükleer Tıp Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar	29
7.3 Nükleer Tıp Ünitelerinde Zırhlama Hesaplamaları	30
7.3.1 Zırhlama Hesaplamalarında Kullanılan Parametreler.....	32
7.4 Zırhlama Hesabı İçin Yazılım Geliştirilmesi.....	46
7.4.1 Nükleer Tıp Zırhlama Hesaplamalarında Monte Carlo Yönteminin Kullanımı....	48
7.4.2 Görüntüleme odalarında bilgisayarlı tomografi cihazından yayılan x-ışınları için zırhlama hesabı	56
8. NÜKLEER TIP ÜNİTELERİ ÖRNEK ZIRHLAMA HESAPLARI.....	58
8.1 SPECT Ünitesi Örnek Zırhlama Hesabı Yapılması.....	58
8.1.1 Sıcak Oda Zırhlama Hesabı	59
8.1.2 Radyoaktif Katı Atık Odası Zırhlama Hesabı.....	61

8.1.3 Radyoaktif Hasta Tuvaleti Zırhlama Hesabı	62
8.1.4 Enjeksiyon Odası Zırhlama Hesabı	63
8.1.5 Efor Odası Zırhlama Hesabı	65
8.1.6 Ayaktan Hasta Tedavi Odası Zırhlama Hesabı.....	66
8.1.7 Görüntüleme Odaları Zırhlama Hesabı.....	67
8.1.8 Radyoaktif Yetişkin Hasta Bekleme Odası Zırhlama Hesabı.....	71
8.1.9 Radyoaktif Çocuk Hasta Bekleme Odası Zırhlama Hesabı.....	73
8.2 PET Ünitesi Örnek Zırhlama Hesabı Yapılması.....	74
8.2.1 F-18 Sıcak Oda Zırhlama Hesabı.....	76
8.2.2 Ga-68 Sıcak Oda Zırhlama Hesabı	77
8.2.3 PET-CT Görüntüleme Odası Zırhlama Hesabı.....	78
8.2.4 Radyoaktif Katı Atık Odası Zırhlama Hesabı.....	81
8.2.5 Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odaları Zırhlama Hesabı.....	82
8.3 Yataklı Tedavi Ünitesi Örnek Zırhlama Hesabı Yapılması.....	86
8.3.1 Yataklı Tedavi Ünitesi Sıcak Oda Zırhlama Hesabı.....	87
8.3.2 Yataklı Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Zırhlama Hesabı	89
8.3.3 Radyonüklit Tedavi Odası I Zırhlama Hesabı	89
8.4 Zırhlama Yapılırken Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar	91
8.4.1 Zırhlama Hesabı Yapılan Duvarda Mevcutta Zırh Malzemesi Olduğu	92
9.YORUMLAR.....	94
10.KAYNAKLAR	95
EK-1 TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU	97
ÖZGEÇMİŞ	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Fotoelektrik Etki.....	6
Şekil 2.2 Çift Üretimi	6
Şekil 2.3 Compton Saçılması	7
Şekil 2.4 Maruz Kalınan Radyasyon Dozunu Azaltmak için Gerekli Önlemler	9
Şekil 3.1 Anihilasyon Olayı.....	12
Şekil 4.1 Gama Kamera Cihazı	17
Şekil 4.2 Gama Kamera Cihazı Ana Ünite ve Elemanları.....	18
Şekil 5.1 PET Cihazında Anihilasyon Fotonlarının Dedektörlere Çarpması.....	20
Şekil 5.2 PET-CT Cihazı	21
Şekil 7.1 Radyasyon Türlerine Göre Farklı Malzemelerdeki Giricilikleri.....	26
Şekil 7.2 A Noktasında Bulunan Radyasyon Kaynağından d Mesafede Uzakta Bulunan Toplum Bireyleri [9].....	31
Şekil 7.3 Radyoaktif Madde Almış Bir Hastanın Bulunduğu Odanın Zırhlama Hesaplamalarında Bitişik Alanlarına Olan Mesafesi [10]	34
Şekil 7.4 Nokta Kaynak İçin Işınlama Geometrisi	53
Şekil 7.5 Doz Hızının Zırh Kalınlığına Göre Değişimi	55
Şekil 8.1 SPECT Ünitesi genel yerleşim planı	58
Şekil 8.2 Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Sıcak Oda, Radyoaktif Hasta Tuvaleti ve Radyoaktif Katı Atık Odası Alan Yerleşimi	59
Şekil 8.3 SPECT Ünitesi Sıcak Oda Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü ..	61
Şekil 8.4 Radyoaktif Katı Atık Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	62
Şekil 8.5 Radyoaktif Hasta Tuvaleti Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü	63
Şekil 8.6 Harflendirilen Ve Mesafelerin Gösterildiği Efor Odası, Enjeksiyon Odası ve Ayaktan Hasta Tedavi Odası Alan Yerleşimi	63
Şekil 8.7 SPECT Ünitesi Enjeksiyon Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	64
Şekil 8.8 SPECT Ünitesi Efor Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.	65
Şekil 8.9 SPECT Ünitesi Ayakta Tedavi Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	67
Şekil 8.10 Harflendirilen Ve Mesafelerin Gösterildiği Görüntüleme Odaları Alan	

Yerleşimi	68
Şekil 8.11 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	70
Şekil 8.12 SPECT Ünitesi SPECT Görüntüleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	71
Şekil 8.13 Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Radyoaktif Hasta Bekleme Odaları Alan Yerleşimi	71
Şekil 8.14 SPECT Ünitesi Radyoaktif Yetişkin Hasta Bekleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü	72
Şekil 8.16 Örnek PET Ünitesi Alan Yerleşimi	74
Şekil 8.17 F-18 Sıcak Oda, Ga-68 Sıcak Oda , Görüntüleme Odası ve Radyoaktif Katı Atık Odası İçin Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi	75
Şekil 8.18 PET Ünitesi F-18 Sıcak Oda Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	77
Şekil 8.19 PET Ünitesi Ga-68 Sıcak Oda Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	78
Şekil 8.20 PET Ünitesi Görüntüleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	79
Şekil 8.21 PET Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	82
Şekil 8.22 Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I ve Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II için Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi.....	83
Şekil 8.23 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	84
Şekil 8.24 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	85
Şekil 8.25 Örnek Yataklı Tedavi Ünitesi Alan Yerleşimi.....	86
Şekil 8.26 Sıcak Oda ve Radyoaktif Katı Atık Odası için Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi	87
Şekil 8.27 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Sıcak Oda Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	88
Şekil 8.28 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü	89

Şekil 8.29 Radyonüklit Tedavi Odası I için Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi	90
Şekil 8.30 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Yataklı Tedavi Odası I Yazılım ile Zırlama Hesabı Ekran Görüntüsü.....	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 SPECT Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları.....	19
Çizelge 5.1 PET Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları.....	22
Çizelge 6.1 Radyonüklit Tedavi Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler	24
Çizelge 7.1 Alanlara Göre Tasarım Dozları [11].....	33
Çizelge 7.2 Alanlara göre meşguliyet faktörleri [11]	36
Çizelge 7.3 Denklem 7.2’de kullanılan katsayılar [14]	37
Çizelge 7.4 Denklem 7.3’de kullanılan katsayılar [15]	38
Çizelge 7.5 Nükleer Tıpta Yaygın Olarak Kullanılan Radyonüklitlerin Gama Sabitleri [11].....	39
Çizelge 7.6 Radyoaktif kaynakların TVL değerleri [11].....	40
Çizelge 7.7 Nükleer Tıpta Kullanılan Radyasyon Kaynakları İçin Yaygın Olarak Kullanılan İş Yükü Değerleri [11].....	44
Çizelge 7.8 Yaygın Olarak Kullanılan PET Radyonüklitlerinin Fiziksel Özellikleri [10]	
Çizelge 7.9 Yaygın Olarak Kullanılan PET Radyonüklitleri için Etkin Doz Eşdeğer Doz Hızı Sabitleri [10]	50
Çizelge 7.10 F-18 için Rapor Edilen Doz Hızı Sabitleri [10].....	50
Çizelge 8.1 SPECT Ünitesi Sıcak Oda Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	60
Çizelge 8.2 SPECT Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı .	61
Çizelge 8.3 SPECT Ünitesi Radyoaktif Hasta Tuvaleti Matematiksel Zırhlama Hesabı ...	62
Çizelge 8.4 SPECT Ünitesi Enjeksiyon Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	64
Çizelge 8.5 SPECT Ünitesi Efor Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	65
Çizelge 8.6 SPECT Ünitesi Ayaktan Hasta Tedavi Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı	66
Çizelge 8.7 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	68
Çizelge 8.8 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını Zırhlama Hesabı	69
Çizelge 8.9 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını kaynaklı ve radyofarmasötik verilmiş hasta kaynaklı Zırhlama Hesabı karşılaştırması	69
Çizelge 8.10 SPECT Ünitesi SPECT Görüntüleme Odası Matematiksel Zırhlama	

Hesabı	70
Çizelge 8.11 SPECT Ünitesi Radyoaktif Yetişkin Hasta Bekleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	72
Çizelge 8.12 SPECT Ünitesi Radyoaktif Çocuk Hasta Bekleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	73
Çizelge 8.13 PET Ünitesi Sıcak Oda Matematiksel Zırhlama Hesabı	76
Çizelge 8.14 PET Ünitesi Ga-68 Sıcak Oda Matematiksel Zırhlama Hesabı	78
Çizelge 8.15 PET/PET-CT Ünitesi Görüntüleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı..	79
Çizelge 8.16 PET Ünitesi PET-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını Zırhlama Hesabı ..	80
Çizelge 8.17 PET Ünitesi PET-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını kaynaklı ve radyofarmasötik verilmiş hasta kaynaklı Zırhlama Hesabı karşılaştırması	81
Çizelge 8.18 PET Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı	82
Çizelge 8.19 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I Matematiksel Zırhlama Hesabı	84
Çizelge 8.20 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	85
Çizelge 8.21 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	88
Çizelge 8.22 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı.....	89
Çizelge 8.23 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Yataklı Tedavi Odası I Matematiksel Zırhlama Hesabı	91

1. GİRİŞ

1924 yılında genç kızlar Waterbury Saat Fabrikası'nda, saat kadranlarını karanlıkta parlaması için çinko bir bileşim karıştırılmış radyoaktif radyum tuzları ile boyarken yaşadıkları tehlikeden habersizlerdi. Radyum atomlarından çıkan alfa parçacıkları, çinko atomlarının enerji seviyesini artırarak titreşmelerine böylece etrafa yeşilimsi bir ışık yayılmasına neden oluyordu. Bu ışık, geceleri parıldayarak saat kadranının görülebilir hale getiriyor ancak gündüzleri fark edilmiyordu. Radyum kızları teker teker hastalanmaya, bu hastalıklar nedeni ile ölmeye başladıklarında doktorlar bu hastalıkların ve ölümlerin nedeninin radyum olabileceğini ilk başta düşünmemişlerdi. Araştırmayı yapan doktorlardan birinin beş yıl önce ölmüş bu genç kızlardan birisine ait kemikleri mezarlıktan çıkarıp incelemesi ile kemiklerin hala radyasyon yaydıklarını fark edilmiştir.

Bugün radyum elementinden kaynaklanan radyasyonun insan sağlığına neden bu tip zararlar verdiğini biliyoruz. Radyasyon, parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar biçiminde enerji yayımı ya da aktarımıdır. Radyasyonun keşfi ile birlikte başlayan ve devam eden bilimsel araştırmalar, yararları ve zararları hakkında pek çok bilgiye sahip olmamızı sağlamaktadır.

Bir atoma enerji aktarımı yolu ile atomdan elektron koparılmasına iyonlaşma denir. İyonize radyasyon insan sağlığını tehdit eden bir unsurdur. Radyasyonun yararlarından fayda sağlarken zararlarından da kendimizi ve çevremizi korumamız gereklidir.

Ülkemizde radyoaktif atıklar da dahil olmak üzere iyonize radyasyon kaynaklarının her türlü amaçla üretilmesi, kullanılması, bulundurulması, ithal/ihraç edilmesi, depolanması ve taşınması için gerekli koşullar yasal mevzuatlar ile belirlenmiştir. Radyasyon kaynakları ile faaliyetler yetkilendirmeye tabi tutulmaktadır. Radyasyon uygulamalarının bazılarında radyasyon kaynağı ile faaliyet gösterilecek alanın radyasyon zırlanması ve alan yerleşimi uygunluğu için mekânsal tasarım onayı alınması zorunludur.

Yürürlükte olan mevzuat gereği nükleer tıp ünitelerinde radyonüklit ile hasta tedavi üniteleri ve PET cihazı ile faaliyet gösterecek üniteler için faaliyet öncesi ilgili kurumdan mekânsal tasarım onayı alınması zorunludur. Gama kamera cihazı ile faaliyet gösterecek üniteler için böyle bir zorunluluk bulunmamaktadır.

Bu tez kapsamında radyasyonun sağlık alanında yararlı kullanım alanlarından biri olan nükleer tıp ünitelerinde aynı zamanda zararlarından korunmak için önemli bir unsur olan zırhlamanın nasıl yapılması gerektiği konusunda bilgi sunulmuştur. Zırhlama hesaplamaları için yol gösterici bir çalışma olması amaçlanmıştır. Nükleer tıp ünitelerinde bulunan radyasyon kaynaklarının bulunduğu alanların zırhlanması için hesaplama yöntemleri anlatılmış; örnek ünite hesaplamaları hem matematiksel olarak hem de geliştirilen bir yazılım ile yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Nükleer Tıp

Nükleer tıp, radyoaktif madde veya radyofarmasötik (Radyonükliti hedef organa taşıyacak bir ajan molekül eklenmiş radyoaktif madde) kullanarak organların işlevlerini ve yapısını inceleyen; bazı hastalıkların tedavisinde de kullanılan özel bir radyoloji alanıdır. Nükleer tıp, kimya, fizik, matematik, bilgisayar teknolojisi ve tıbbi içeren birçok farklı disiplinin bir birleşimidir.

X-ışınları, bağırsaklar, kaslar ve kan damarları gibi yumuşak dokudan geçtiği için, ayırt edici bir madde kullanılmadıkça bu dokuların standart bir X-ışını üzerinde görselleştirilmesi oldukça zordur. Ayırt edici madde, dokunun daha net görülmesini sağlar. Nükleer görüntüleme, organ ve doku yapısının yanı sıra o organ veya dokunun fonksiyonun görüntülenmesini de sağlamaktadır. Organlarda lezyon (doku bozukluğu) içerisindeki hücre sayısı azaldıkça, radyoaktif maddenin bu lezyona tutulma oranı da azalır. Dolayısı ile görüntüde kontrastı farklılaşan lezyon, daha çok radyoaktif madde barındıran komşu dokular içerisinde farklılaşır.

Görüntüleme işlemi için radyofarmasötik veya radyoaktif madde hastaya yiyecek / içecek olarak ya da damar yoluyla veya solutularak verilir ve vücut dokusu tarafından emilmesi beklenir. Radyofarmasötik elde etmek için kullanılan radyonüklit çalışmanın türüne göre değişiklik göstermektedir. Hastaya verilen radyonüklit, hedeflenen vücut dokusunda toplandıktan sonra bu radyoaktif maddenin yaymış olduğu radyasyon bir radyasyon detektörü tarafından tespit edilir. Sağlık uzmanları ise görüntüleme sırasında radyonüklitin vücuttaki dağılımını ölçerek, tümörler, enfeksiyonlar, organ büyümesi veya kistler gibi çeşitli durumları değerlendirebilir ve teşhis edebilir. Organ işlevini ve kan dolaşımını değerlendirmek için de nükleer görüntüleme kullanılabilir.

2.1.1 Nükleer Tıbbın Tarihçesi

Nükleer tıp tarihi, bilim insanlarının fizik, kimya, mühendislik ve tıp alanındaki farklı disiplinlerde katkılarını içerdiği için nükleer tıbbın multi-disipliner doğası, tıp tarihçelerinin nükleer tıbbın doğuş tarihini belirlemesini de zorlaştırmaktadır.

Birçok tarihçi, 1934'te yapay olarak üretilen radyonüklitlerin Frédéric Joliot-Curie ve Irène Joliot-Curie tarafından keşfedilmesini nükleer tıptaki en önemli kilometre taşı olarak görmektedir. 1934'te, Nature dergisinde, polonyum preparatıyla ışınlanan alüminyum folyodaki radyoaktivitenin keşfinden sonra ilk yapay radyoaktif malzeme üretiminin yapıldığı duyurulmuştur. Çalışmalar, X-ışını için Wilhelm Konrad Roentgen, radyoaktif uranyum tuzları için Henri Becquerel ve radyoaktif toryum, polonyum ve "radyoaktivite" için Marie Curie (Irène Curie'nin annesi) tarafından yapılan daha önceki keşifler üzerine inşa edilmiştir. Taro Takemi ise 1930'larda nükleer fiziğin tıbbi uygulanmasını incelemiştir [1,2].

1936'da, "nükleer tıbbın babası" olarak bilinen John Lawrence, lösemiye tedavi etmek için fosfor-32 kullanarak yapay bir radyonüklitin hastalarında ilk uygulamasını yapmıştır [1].

Nükleer tıp, potansiyel bir uzmanlık alanı olarak 11 Mayıs 1946'da Dr. Saul Hertz ve Dr. Arthur Roberts tarafından Amerikan Tıp Derneği Dergisi'nde zehirli guatr hastalığının radyoaktif iyot (RAI) ile tedavisine ilişkin bir makalenin yayınlanması ile kamuya tanıtılmıştır [1].

Tıbbi amaçla kullanılan radyonüklitlerin hiçbiri Teknesyum-99m'nin keşfi ve gelişimi kadar önemli olamamıştır. İlk olarak 1937'de C. Perrier ve E. Segre tarafından Periyodik Çizelgedeki 43 numaralı boşluğu doldurmak için yapay bir element olarak keşfedilmiştir. 1960'larda Teknesyum-99m üretmek için bir jeneratör sisteminin geliştirilmesi, tıbbi kullanım için pratik bir yöntem haline gelmiştir. Teknesyum-99m bugün nükleer tıpta en çok kullanılan elementtir [1,2].

Nükleer tıbbın yaygın klinik kullanımı, radyoaktivitenin tespiti ve biyokimyasal süreçleri izlemek için belirli radyonüklitlerin kullanılması ile başlamıştır. 1950'lerde Benedict Cassen'in ilk doğrusal tarayıcısı ve Hal O. Anger'in sintilasyon kamerasını geliştirmesi, nükleer tıbbın genç disiplinini tam teşekküllü bir tıbbi görüntüleme uzmanlığına dönüştürmüştür [1,2].

1970'lere gelindiğinde, vücudun çoğu organı nükleer tıp teknikleri kullanılarak görüntülenebiliyordu. 1971'de Amerikan Tabipler Birliği nükleer tıbbı resmi olarak tıp uzmanlığı olarak tanımış ve 1972'de Amerikan Nükleer Tıp Kurulu kurulmuştur [1,2].

1980'lerde kalp hastalığı tanısında kullanılmak üzere radyofarmasötikler üretilmiştir. Aynı zamanda, tek bir foton emisyonlu bilgisayarlı tomografinin (SPECT, Single Photon Emission Computed Tomography) geliştirilmesi, kalbin üç boyutlu rekonstrüksiyonuna ve nükleer kardiyoloji alanının kurulmasına olanak sağlamıştır.

Nükleer tıptaki son gelişmeler, pozitron emisyon tomografi tarayıcısının (PET, Positron Emission Tomography) icat edilmesidir. PET ve PET / CT görüntüleme, yerinde veya yakındaki bir siklotron gereksinimi nedeniyle ilk yıllarında çok hızlı gelişme kaydedilememiştir. Ancak PET ve PET / CT uygulamalarının ücretlerinin sağlık güvenceleri tarafından ödemesini onaylamaya yönelik idari kararlar, son yıllarda olağanüstü büyüme yol açmıştır. Siklotron olmayan yerlerde de PET / CT görüntüleme cihazları kullanılmaya başlanması artık tanı ve tedavi izleme için onkolojinin ayrılmaz bir parçası olmuştur [1,2].

Bugün bile ülkemizdeki üniversite hastaneleri, büyük devlet hastaneleri ile özel kuruluşlarda bulunan nükleer tıp ünitelerinde pek çok organın fonksiyon görüntülemesi gerçekleştirilmektedir. Bu tetkikler birçok organın ve hastalığın sintigrafi yöntemi ile görüntülenmesi olmakla birlikte bazı tümör ve enflamatuvar hastalıkların tedavisinin yapılmasına da olanak sağlamaktadır [3].

2.2 Radyasyon

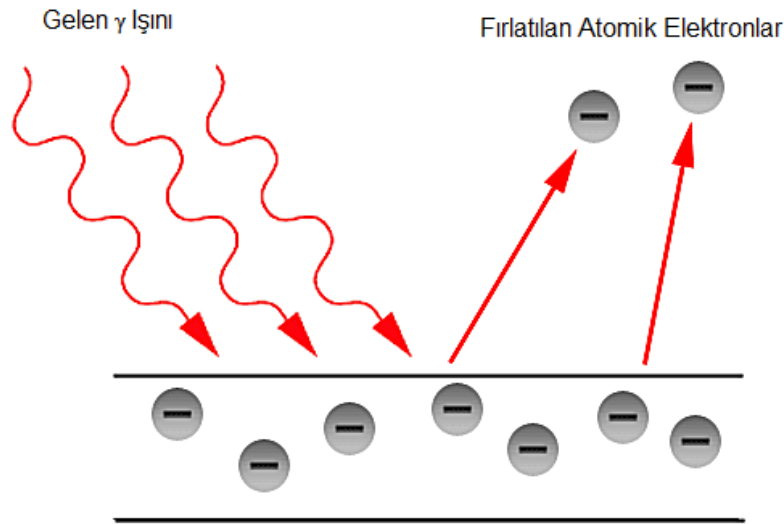
Radyasyon, genel bir ifade ile ortamda parçacıklar ve elektromanyetik dalgalar ile taşınan enerji olarak tanımlanabilir. Enerji aktarımı yolu ile bir atomdan elektron koparılmasına iyonlaşma denir. Taşınan bu enerji nedeni ile hedef atomlarda iyonlaşmaya gerçekleşir ise 'iyonlaştırıcı radyasyon' adını alır. Alfa parçacığı, beta parçacığı, nötron, gama ışını ve x-ışınları iyonlaştırıcı radyasyon türlerindedir. İyonize radyasyon, alınan dozla ilişkili olarak dokularda hücre yapısını bozabilir ve hasarlara sebep olabilir.

Radyasyon ilerlediği her ortamda parçacık boyutunda çarpışmalar yaparak enerjisinin bir kısmını kaybetmektedir. Kaybedilen enerji miktarı, radyasyonun türüne, enerjisine ve bulunduğu ortamın özelliklerine göre değişiklik gösterir.

Gama ışınları madde ile üç farklı biçimde etkileşim göstermektedirler: fotoelektrik etki,

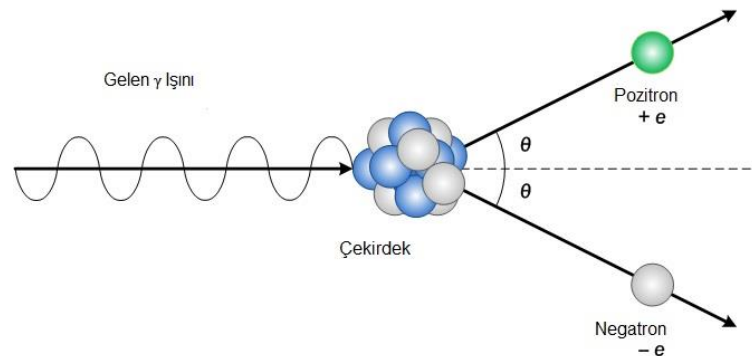
çift üretimi ve compton etkisi [4].

Fotoelektrik Etki: Gelen gama ışınının tüm atomla etkileşerek gama ışınının yok olması ve atomdan bir atomik elektronun fırlatılmasıdır (Bknz Şekil 2.1). Enerjinin korunması söz konusudur. Fırlatılan fotoelektronun kinetik enerjisi gelen gama ışınının enerjisi ile fırlatılan elektronun atoma bağlanma enerjisinin farkı kadardır.



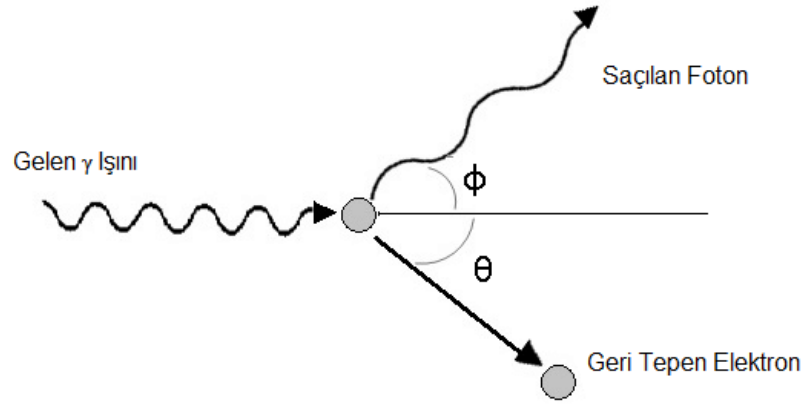
Şekil 2.1 Fotoelektrik Etki

Çift Üretimi: Gelen fotonun yok olması ve bir elektron çifti (pozitron ve negatron) oluşmasıdır (Bknz. Şekil 2.2). Elektron çiftinin durgun kütle enerjisi $2 m_e c^2 = 1,02$ MeV'dir. Bu nedenle gelen gama ışınının enerjisi bu enerjiden daha yüksek olmadıkça çift üretimi meydana gelmemektedir.



Şekil 2.2 Çift Üretimi

Compton Etkisi (Compton Saçılması): Gelen gama ışınının elektron tarafından esnek saçılmasıdır (Bknz Şekil 2.3). Hem enerji hem de momentum korunmaktadır.



Şekil 2.3 Compton Saçılması

Radyasyonun sağlığını etkileri radyasyon dozunun büyüklüğüne bağlıdır. Bilim insanları yıllardır insanlarda ve laboratuvar hayvanlarında iyonlaştırıcı radyasyonun etkilerini araştırmaktadırlar. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, her gün maruz kaldığımız düşük doz iyonlaştırıcı radyasyonun bize herhangi bir zarar vermediği düşünülmektedir. Ancak çok miktarda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmanın büyük zarara neden olabileceği bilinmektedir. Bu nedenle gereğinden fazla iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınmamalıdır.

İyonize radyasyonun sağlık üzerinde yapacağı etkiler çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerin bazıları şunlardır:

Radyasyon türü: Farklı radyasyon türlerinin aynı doz hızında farklı etkiler gösterebilmektedir.

Alınan doz miktarı: Yüksek dozda radyasyona maruz kalmak çok ciddi sağlık sorunlarının ortaya çıkmasına sebep olabilir.

Doz hızı: Kısa zaman periyodunda alınan yüksek doz daha fazla zarara neden olurken, uzun zaman periyodunda doz alındığında hücrelerin kendilerini onarabilmeleri mümkün olmaktadır.

Maruz kalan vücut bölgesi: Vücudun farklı bölgelerinin radyasyona karşı hassasiyeti

farklı olabilmektedir.

Biyolojik farklılıklar: Her yaşta insanların radyasyon tepkisi birbirinden farklılık gösterebilmektedir.

2.3 Radyasyondan Korunma

Radyasyon kelimesi ilk duyulduğunda kulağa korkutucu gelse de yararları yadsınamayacak kadar çoktur. Nükleer tıp uygulamaları bu duruma güzel bir örnektir. Doğru radyasyon kaynağı seçildiğinde, planlaması doğru yapıldığında ve doğru uygulandığında hastalığın teşhis ve tedavisine olanak sağlamakla birlikte teşhis ve tedavi süresini kısaltabilmektedir. Ancak radyasyonun yararlarından fayda sağlarken zararlarından da korunmak gereklidir.

Doz sınırlama sisteminin radyasyondan korunmada üç temel ilkesi gerekçelendirme (uygulamanın gerekliliği), optimizasyon ve doz sınırlamasıdır. Uygulamanın gerekliliği, radyasyonun zararları dikkate alındığında, belirgin bir faydası olmayan radyasyon uygulamasına müsaade edilememelidir. Optimizasyon, radyasyona maruziyetine neden olan uygulamalarda, olabilecek ışınlanmalar için alınan dozların büyüklüğü, ışınlanacak kişi sayısı, sosyal ve ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak mümkün olan en düşük dozun alınması sağlanmasıdır. Tıbbi ışınlamalar dışında, müsaade edilen ışınlamaların sebep olduğu ilgili organ veya dokudaki eşdeğer dozun ve etkin dozun, yasal düzenlemeler ile belirlenen yıllık doz sınırlarını aşmamasını sağlamaktır. Radyasyon çalışanları ve toplum üyesi kişiler için doz sınırları aşağıda verilmiştir [5,6].

Radyasyon görevlileri için etkin doz,

- Ardışık beş yılın ortalaması 20 mSv'i, herhangi bir yılda ise 50 mSv'i geçemez
- El ve ayak veya cilt için yıllık eşdeğer doz sınırı 500 mSv, göz merceği için 150 mSv'dir.
- Cilt için en yüksek radyasyon dozuna maruz kalan 1 cm²'lik alanın eşdeğer dozu, diğer alanların aldığı doza bakılmaksızın ortalama cilt eşdeğer dozu olarak kabul edilir.

Toplum üyesi kişiler için etkin doz,

- Yılda 1 mSv'i geçemez.

- Özel durumlarda; ardışık beş yılın ortalaması 1 mSv olmak üzere yılda 5 mSv'e kadar izin verilir.
- Cilt için yıllık eşdeğer doz sınırı 50 mSv, göz merceği için 15 mSv'dir.

Günlük hayatta radyasyona maruz kalmamak mümkün olmayabilir. Doğal radyasyon kaynakları, mesleki işinlamalar, sağlık gereksinimlerinden kaynaklı işinlamalar, radyasyon kazaları bunlara örnektir. Ancak maruz kalma durumu olduğunda bunu en az zararlarla atlattmak için alınması gereken bir takım önlemler mevcuttur.

Radyasyonun zararlarının alınan doz ile doğru orantılıdır. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi zaman, mesafe ve zırhlama bu dozu azaltmak için dikkat edilmesi gereken üç önemli faktördür.



Şekil 2.4 Maruz Kalınan Radyasyon Dozunu Azaltmak için Gerekli Önlemler

2.3.1 Zaman

Radyasyona maruz kaldığımız süre ile alınan doz doğru orantılıdır.

2.3.2 Mesafe

Her radyasyon kaynağının belirli bir etki mesafesi vardır. Radyasyonun şiddeti radyasyonla aramızdaki her birim uzaklığın karesi ile ters orantılıdır.

2.3.3 Zırhlama

Zırhlama, radyasyon kaynağı nedeniyle maruz kalınan dozun, önüne konulan uygun bir zırhlama malzemesiyle azaltılmasıdır.

2.4 Radyasyon Alanları ve Bu Alanların Sınıflandırılması

Nükleer tıp üniteleri, hastanelerde veya görüntüleme merkezlerinde radyasyon alanları olarak tanımlıdır.

Planlanmış ışınlamalar sebebi ile belirlenen yıllık doz sınırlarından fazla doza maruz kalma olasılığı bulunan alanlar radyasyon alanları olarak tanımlanmaktadır. Radyasyon alanlarının sınıflandırılmasının nedeni, planlanmış ışınlanmalarda radyasyon dozu alma olasılığını en az seviyede tutmak böylece radyasyona maruziyeti kontrolünü sağlamaktır.

Radyasyon alanlarının sınıflandırılırken, gerçekleştirilen faaliyet nedeni ile normal çalışma şartlarında alınabilecek yıllık radyasyon dozu ile gerçekleşmesi beklenmeyen ancak meydana gelme ihtimali önceden öngörülen kaza veya acil duruma bağlı olarak ortaya çıkan muhtemel ışınlanma durumlarında alınabilecek yıllık radyasyon dozlarının toplamı dikkate alınır.

Radyasyon kaynağının özellikleri ile kaynağın ve bulundurulduğu alanın zırhlama özellikleri radyasyon alanlarının sınıflandırılmasında etkilidir. Radyasyon kaynağının türüne ve uygulama yöntemine göre denetimli alanlar ve gözetimli alanlar olarak sınıflandırılabilir.

Denetimli alanların giriş ve çıkışların özel denetime tabidir. Çalışmalar özel kurallara bağlıdır. Bu alanlarda çalışan radyasyon çalışanlarının yıllık radyasyon doz limitlerinin 3/10'unu geçme ihtimali vardır.

Gözetimli alanlarda çalışan radyasyon çalışanların yıllık doz limitlerinin 1/20'sini aşma ihtimali vardır fakat 3/10'unu geçmesi beklenmemektedir. Bu alanlarda kişisel doz ölçümü zorunlu değildir ancak radyasyon seviyelerinin izlenmesini gerektirmektedir [6].

3. NÜKLEER TIP ÜNİTELERİ

3.1 Nükleer Tıp Ünitelerinin Sınıflandırılması

Nükleer tıp üniteleri uygulamanın türüne göre kendi içerisinde farklı kategorilerde incelenebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında üç grupta incelenmiştir.

- SPECT ve Hibrit Sistemleri Üniteleri,

Gama kamera cihazlarının ve bu cihazlara entegre edilerek birlikte kullanılan bilgisayarlı tomografi, Manyetik Rezonans (MR) vb. gibi cihazların görüntüleme işlemi için kullanıldığı üniteler. Bu tez kapsamında SPECT ünitesi olarak adlandırılacaktır.

- PET ve Hibrit Sistemleri Üniteleri,

PET cihazlarının ve bu cihazlara entegre edilerek birlikte kullanılan bilgisayarlı tomografi, Manyetik Rezonans (MR) vb. gibi cihazların görüntüleme işlemi için kullanıldığı üniteler. Bu tez kapsamında PET ünitesi olarak adlandırılacaktır.

- Radyonüklit ile Hasta Tedavi Üniteleri. Hastalara yüksek aktivitede radyonüklit verilerek yataklı tedavi odalarında bekletildikleri ünitelerdir. Bu tez kapsamında radyonüklit tedavi ünitesi olarak adlandırılacaktır.

3.2 Nükleer Tıp Ünitelerinde Bulunan Radyasyon Kaynakları

Radyonüklitler, kararlı hale gelebilmek için alfa, beta parçacığı ve gama ışını formunda kendiliğinden iyonize radyasyon yayan kararsız atomlardır. Bu radyoaktif ışınım formları ve karakteristiklerinin her biri hangi radyonüklitin tedavi veya görüntüleme için uygun olduğunu belirleyen unsurlardır. Radyonüklitler kararlı hale gelebilmek için birden fazla ışınım yapabilirler.

3.2.1 Alfa Parçacıkları

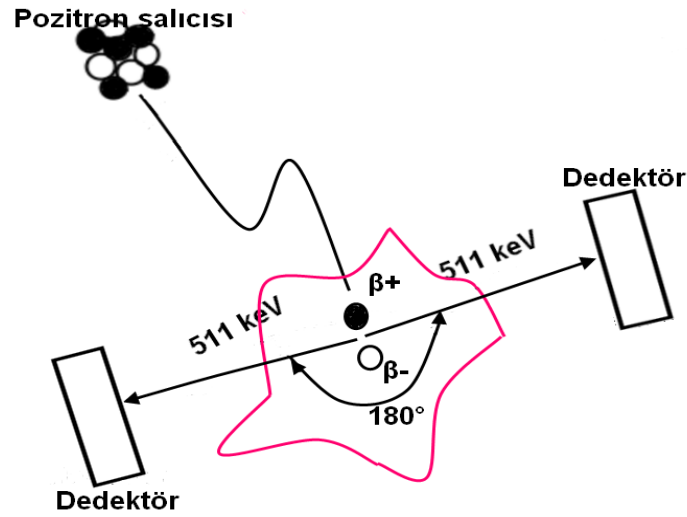
Alfa parçacıkları iki proton ve iki nötronu olan Helyum çekirdeğidir. Ağır parçacıklardır. Boyutlarının büyük olması nedeni ile madde ile güçlü bir etkileşime girebilmekte ve enerjilerinin büyük bir kısmını kısa mesafede aktarabilmektedir (Lineer Enerji Transferi,

LET). Bu nedenle tedavi için daha uygun potansiyele sahiptirler. Radyasyon kaynağı olarak bakıldığında korunması kolaydır. Bir kâğıt parçası bile durdurmak için yeterli olmaktadır. Bununla birlikte nükleer tıpta kullanılan ve alfa ışınları yapan radyonüklitler aynı zamanda gama ışınları da yapmakta ve bu sayede de algılanabilmektedirler [2].

3.2.2 Beta Parçacıkları

Beta parçacıkları elektron (β^-) veya pozitron (β^+) olarak adlandırılan daha küçük parçacıklardır. β^- , alfa parçacığı ile kıyaslandığında daha düşük bir LET değerine sahiptir ve hücre içerisinde daha az hasara neden olmaktadır. Düşük LET'e sahip olmaları ve madde içerisinde daha uzun mesafe yol alıyor olmaları daha büyük tümörlerin tedavisinde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır.

Negatif yüklü elektronlardan farklı olarak pozitronlar daha çok görüntüleme için tercih edilmektedir. Gerçekte, görüntülen β^+ parçacıklarının kendisi değil, anihilasyon sonucu oluşan gama ışınlarıdır: β^+ parçacığı bir elektronla karşılaştığında, Şekil 3.1'de gösterilen anihilasyon adı verilen olay meydana gelir, böylece her iki parçacığın kütlesi enerjiye dönüştürülür ve taban tabana zıt yollarda iki gama fotonu (511 keV) yayılır. Bunlar PET tarafından tespit edilen gama fotonlarıdır [2].



Şekil 3.1 Anihilasyon Olayı

3.2.3 Gama Işınları

Gama ışınları görüntüleme için kullanılan elektromanyetik ışımalarıdır. Maddeyle etkileşim olasılıkları göreceli olarak (alpha beta radyasyonuna göre) çok daha az olup, diğer ışımaların aksine vücut içindeki radyonüklitten yayımlanan gama ışınlarının vücut dışında algılanması olasıdır [2].

Nükleer tıp ünitelerinde bulunan radyasyon kaynakları şunlardır:

- Kullanılan radyofarmasötikler,
- Radyofarmasötik enjekte edilmiş, yutturulmuş, solutulmuş hasta,
- Görüntüleme cihazlarını veya ölçüm cihazlarını kalibre etmek için kullanılan kalibrasyon kaynakları (kapalı kaynak formunda, düşük aktivitede)
- Radyoaktif maddelerin kullanımı sonucu oluşan katı ve sıvı radyoaktif atıklar
- Görüntüleme cihazlarının bilgisayarlı tomografi entegre edilmiş hibrit sistem olması durumunda tomografi cihazından kaynaklı x-ışınları.

X-ışını dışındaki diğer radyasyon kaynakları, noktasal kaynak davranışı göstermekte ve bulunduğu ortamda 360 derece ışımaya yapabilmektedir.

3.3 Nükleer Tıp Ünitelerinde Bulunan Alanlar

3.3.1 Sıcak oda

Radyofarmasötiklerin depolandığı ve hastaya verilmek üzere hazırlandığı odalardır. Sıcak odalarda çeker ocak, kurşun hücre, göğüs koruyucu, ıraksak maşa gibi donanımlar bulunabilir. Sıcak odada radyoaktif kaynak, kaynağın kendisidir.

3.3.2 Radyoaktif Katı Atık Odası

Radyoaktif maddelerin kullanımı sonrasında açığa çıkan radyoaktif atıkların veya kullanımından vazgeçilen bulaş olmuş malzemelerin bekletildiği odalardır. Radyoaktif katı atık odasında radyasyon kaynağı radyoaktif atığın kendisidir.

3.3.3 Enjeksiyon Odası

Hastalara enjeksiyon yolu radyofarmasötik verilen odalardır. Enjeksiyon odasında radyasyon kaynağı hastaya radyofarmasötik enjekte edilene kadar kaynağın kendisi, enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra hastanın kendisidir.

3.3.4 Görüntüleme Odası

Hastadan görüntü almak üzere görüntüleme cihazlarının bulunduğu odalardır. Görüntüleme odasında radyasyon kaynağı radyofarmasötik enjekte edilen hastanın kendisi olmakla birlikte görüntüleme cihazına x-ışını yayan bir cihaz entegre edilmiş ise o cihazdan kaynaklanan x-ışınlarıdır.

3.3.5 Efor Odası

Kalp sintigrafisi çekmek üzere radyoaktif madde enjekte edilmiş hastaya efor testi yapılabilmesi için koşu bandı bulundurulmuş odalardır. Efor odasında radyasyon kaynağı radyofarmasötik enjekte edilen hastanın kendisidir.

3.3.6 Radyoaktif Yetişkin ve Radyoaktif Çocuk Hasta Bekleme Odası

Radyofarmasötik enjekte edilmiş hastaların, görüntüleme öncesinde radyoaktif maddenin hedef organda tutulabilmesi için geçen süre zarfında bekletildiği odalardır. Radyoaktif yetişkin ve çocuk hasta bekleme odasında radyasyon kaynağı radyofarmasötik enjekte edilen hastanın kendisidir. Bu odadaki toplam aktivite miktarı oda içerisinde bulunan hasta sayısına bağlıdır.

Çocuk hastalara verilen radyofarmasötik miktarı yetişkin hastalara verilen miktardan çok düşüktür. Bazı durumlarda çocuk hastalara yetişkin refakati de gerekebilmektedir. Çocuk hastaların ve refakatçılarının radyoaktif yetişkin hastalardan kaynaklanan dış ışınlanmaya maruz kalmalarını önlemek için radyoaktif yetişkin ve radyoaktif çocuk hasta bekleme odalarının bağımsız planlanması gerekmektedir.

3.3.7 Radyoaktif Hasta Tuvaleti

Radyofarmasötik enjekte edilmiş hastaların hastanede buldukları süre zarfında kullanabilmeleri için planlanmış tuvaletlerdir. Radyoaktif hasta tuvaletinde radyasyon kaynağı radyofarmasötik enjekte edilen hastanın kendisidir.

3.3.8 Rayonüklit Tedavi Odası

Radyofarmasötik ile yatarak tedavi gören hastalar için planlanmış içerisinde duş, tuvalet ve lavabo bulunan hasta odalarıdır. Bu odalarda oluşan atık sular, kanalizasyon sistemine verilmeden önce ulusal salım limitlerinin altına düşmesi için tank sisteminde bekletilmektedir. Radyoaktif madde ile tedavi odasında radyasyon kaynağı radyofarmasötik enjekte edilen hastanın kendisidir.

3.3.9 Arınma Duş Sistemi

Nükleer tıp ünitelerinde radyoaktif bulaş olması durumunda hızlı arınma sağlamak amacı ile kullanılan acil duş sistemi bulunan odalardır.

3.3.10 Tiroid Test (Uptake) Odası

Tiroid bezi tarafından tutulan radyoaktif iyodun oranının ölçümünü yapmak üzere planlanmış odalardır.

3.3.11 Ayakta tedavi odası

Taburcu olabilme şartlarının üstünde radyoaktif madde almış hastaların vücutlarında kalan aktivite miktarının izin verilen sınırlara düşüncüye kadar bekletildiği odalardır. Ayakta tedavi odasında radyasyon kaynağı radyonüklit verilen hastanın kendisidir.

3.4 Nükleer Tıp Ünitelerinde Görüntülemeye Kullanılacak Radyofarmasötiklerin Seçimi

Radyofarmaside hazırlanan radyofarmasötikler nükleer tıbbın temel taşıdır. Diğer tıbbi görüntüleme yöntemlerinden farklı olarak, PET ve SPECT görüntülemeleri

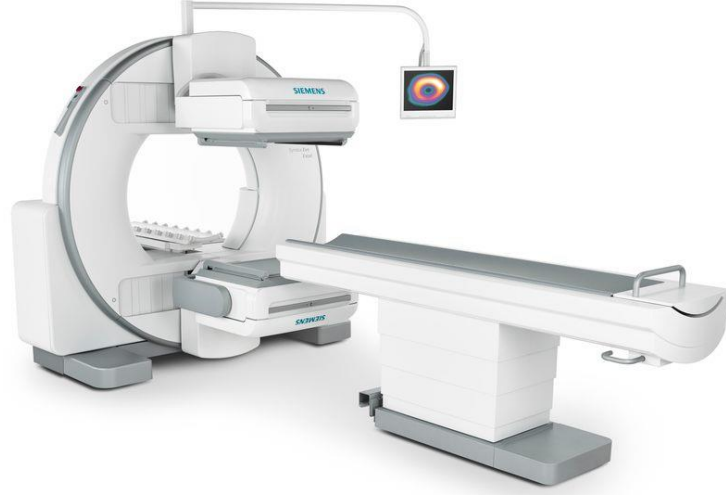
radyofarmasötikler olmadan gerçekleştirilemez. Bir radyofarmasötikin hazırlanmasındaki başlangıç noktası, ne görmek veya neyi tedavi etmek istediğimize bağlıdır. Bu bir organın, bir sistemin, bir hastalığın karakteristik bir belirtisinin veya bir kanser belirtisinin işlevi olabilmektedir.

Radyofarmasötik seçimi ağırlıklı olarak üç faktöre dayanmaktadır:

- a. Radyofarmasötiklerin kullanım amacı
- b. Radyonüklitin vektör molekülü (radyonüklitin bağlandığı ve radyonükliti hedef organa taşıyacak molekül) ile uyumluluğu
- c. Radyonüklitin temin edilme şartları ve fiyatı [2]

4. SPECT ÜNİTESİ

SPECT, bilgisayarlı tek foton tomografi sistemidir. Yaygın olarak SPECT kısaltması kullanılır. Sintilasyon kamerası olarak da adlandırılan gama kamera (γ -kamera), sintigrafi olarak bilinen bir teknikle radyofarmasötik verilmiş bir hastadan yayılan gama radyasyonunu dedekte etmek için kullanılan bir cihazdır (Bakınız Şekil 4.1).

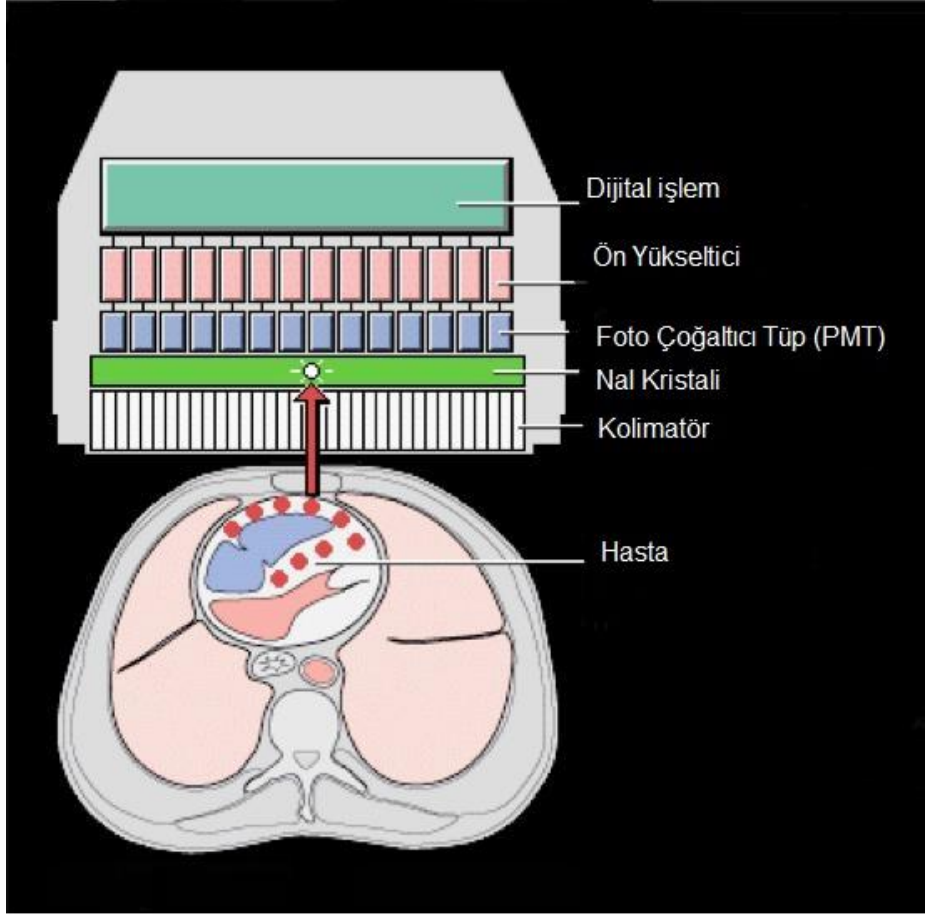


Şekil 4.1 Gama Kamera Cihazı

Hastanelerde veya görüntüleme merkezlerinde gama kamera görüntüleme cihazı ve/veya hibrit sistemleri kullanmak üzere planlanmış radyasyon alanları SPECT ünitesi olarak adlandırılmaktadır.

SPECT görüntülerinin ayırma gücü planar sisteme göre daha kalitesizdir ancak, görüntü alınması istenilen alanda eksen doğrultusundaki belirli bir derinliğe ait kesitte, alttan ve üstten gelen kısımlarda bulunan katmanların etkisi görünmeyeceği için görüntüde kayıp meydana gelmemektedir. Bu sayede hacim, aktivite ve boyut sayısal olarak daha sağlıklı ölçülmektedir [7].

Gamma kamera cihazları, kolimatörler, sintilasyon kristalleri, foto çoğaltıcı tüp, ön yükseltici, yükseltici, elektronik devreler, sinyal yükseklik analizörü, katot ışınları tüpünden oluşmaktadır. Şekil 4.2’de gama kamera cihazı ana ünite ve elemanları gösterilmiştir [7].



Şekil 4.2 Gama Kamera Cihazı ve Elemanları

Hastanelerde SPECT ünitelerinde bulunan alanlar aşağıda verilmiştir.

- Sıcak oda:
- Enjeksiyon odası
- Enjeksiyon yapılmış (radyoaktif) yetişkin ve çocuk hasta bekleme odası
- Görüntüleme odası
- Efor odası
- Katı radyoaktif atık bekletme odası
- Radyoaktif hasta tuvaleti
- Ayakta tedavi odası
- Uptake odası
- Ventilasyon odası
- Dekontaminasyon duş sistemi

4.1 SPECT Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları

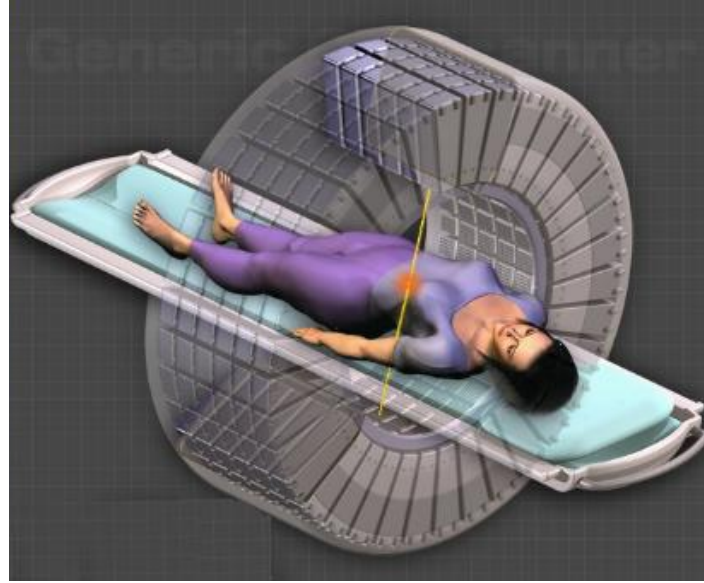
SPECT ünitelerinde kullanılan başlıca radyofarmasötikler ve bunların kullanım amaçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 SPECT Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları

Radyoizotop Cinsi	Yarı Ömrü	Enerjisi (MeV)	Kullanım Amacı	Radyoizotopun üretim şekli
Tc-99m	6 saat	IT, β^- - γ - 0.14	Tüm vücut organ (kardiyak, mide, barsak, mesane, dalak, böbrek), kemik ve tiroid kanseri görüntüleme.	Nükleer Reaktör ile üretilip jeneratörden sağılmaktadır
Tl-201	72,9 saat	EC γ - 0.167	Tümör tarama, kardiyak görüntüleme	Siklotron
In-111	2,8 gün	EC γ - 0.245, 0.171		Siklotron
I-131	8 gün	β^- - 0.606, 0.333	Tiroid kanser tanı	Nükleer Reaktör
I-123	13,2 saat	EC, β^+ γ - 0.158		Siklotron
Ga-67	3.24 gün	EC γ - 0.093	Lenfomanın değerlendirilmesi	Siklotron
Re-186	3,9 gün	EC, β^- γ - 0.137		Nükleer Reaktör
Sr-89	50 gün	β^- γ - 0.91	Kemik ve prostat kanseri palyatif tedavi.	Nükleer Reaktör
Ra-223	11,4 gün	α - 5.71 MeV	Yetişkin hastalarda prostat kanserinde ve semptomatik kemik metaztazlarının tedavisinde	Nükleer Reaktör
I-131	8 gün	β^- 0.606, 0.333	Hipetroidi tedavisi	Nükleer Reaktör
Y-90	64 saat	β^- - 2.28	Karaciğer metastaz, diz ile ilgili hastalıkların tedavisi	Nükleer Reaktör
P-32	14,3 gün	β^- -1.71 ort. 0.7	Kemik metastaz ağrı tedavisi	Nükleer Reaktör
Sm-153	2 gün	β^- - 0.81 ort. 0.22	Kemik metastaz ağrı tedavisi	Nükleer Reaktör
Re-186	3,7 gün	β^- - , 1.07	Kemik metastaz ağrı tedavisi	Nükleer Reaktör

5. PET ÜNİTESİ

Pozitron Emisyon ve Bilgisayarlı Tomografi sistemi olarak da bilinen PET cihazı, aynı anda, aynı yerde oluşup zıt doğrultuda yol alan fotonları dedekte eder. Pozitron yayını gerçekleştiren radyoizotoplar damar yolu ile hastaya verilir. Pozitronlar, pozitif yüklü elektronlardır ve yavaşlarken yolu üzerindeki (-) yüklü elektronlar ile etkileşir. Kütle enerjisi dönüşür. Çarpışan kütleler yok olur ve birbiriyle zıt yönlerde 511 KeV enerjili anihilasyon fotonları açığa çıkar. Bu olaya, anihilasyon; (yok olma) bu şekilde oluşan fotonlara da anihilasyon fotonları denir. Dedektörlere çarpan bu anihilasyon fotonları sintilasyona dönüşür (Bkz. Şekil 5.1). Foto çoğaltıcı tüpler, sintilasyonları elektrik sinyaline dönüştürür. Elektrik sinyalleri ise elektronik devreler sayesinde görüntüye dönüştürülür [7].



Şekil 5.1 PET Cihazında Anihilasyon Fotonlarının Dedektörlere Çarpması

Yeni nesil PET cihazları genellikle CT (Bilgisayarlı Tomografi) ile uyumlu bir biçimde tarama yapmaktadırlar (Bknz. Şekil 5.2). Bu cihazlarda PET görüntüleri ile birlikte aynı anda CT görüntüleri de elde edilir. Böylelikle PET ve CT kesitlerinde zıt kontrast oluşturan renk kodlarının üst üste bindirilmesi sayesinde görüntü oluşturulur. Bu sayede lezyonlar çok daha doğru tespit edilebilir [7].



Şekil 5.2 PET-CT Cihazı

PET ve PET-CT cihazının bulunduğu ünitelere PET/PET-CT üniteleri adı verilmektedir. PET/PET-CT ünitelerinde bulunan alanlar aşağıda verilmiştir.

- Sıcak oda:
- Enjeksiyon ve hasta bekleme odası
- Görüntüleme odası
- Katı radyoaktif atık bekletme odası
- Radyoaktif hasta tuvaleti
- Dekontaminasyon duş sistemi

5.1 PET Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları

PET ünitelerinde kullanılan başlıca radyofarmasötikler ve kullanım amaçları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 PET Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları

Radyoizotop Cinsi	Yarı Ömrü	Enerjisi (MeV)	Kullanım Amacı	Radyoizotopun üretim şekli
F-18	109.8 dakika	EC, $\beta +$ ort. 0.25	Beyin ve vücut kanser tanı	Siklotron
O-15	122,24 saniye	$\beta +$ ort. 0.735		Siklotron
N-13	9,96 dakika	$\beta +$ ort. 0.491		Siklotron
C-11	20,4 dakika	$\beta +$ ort. 0,385		Siklotron
Ga-68	68 dakika	EC, $\beta +$ ort. 0,836	Prostat kanseri tanısı takibinde ve nöroendokrin tümörlerin (pankreas, karaciğer) görüntülenmesinde kullanılır.	Nükleer Reaktör ile üretilip jeneratörden sağılmaktadır

6. RADYONÜKLİT TEDAVİ ÜNİTELERİ

Hastalara yüksek aktivitede radyonüklit tedavisi uygulandığı ve hastanın vücudundaki radyoaktivitenin salım limitlerinin altına düşene kadar bekletilmesi için yataklı tedavi odalarının planlandığı ünitelerdir.

Radyonüklit tedavi odaları farklı tedavi yöntemleri için kullanılsa da en yaygın kullanımı tiroid bezinin tedavisi içindir. Tiroid bezinin normalden fazla çalışması nedeni ile ve kanda tiroid bezi hormonu yükselmesine neden olan guatr hastalıklarında ve tiroid bezindeki bazı kanser türlerinde tedavi amaçlı I-131 kullanılmaktadır. Hastalara kapsül formunda verilen I-131, sindirim sisteminden emilerek tiroid bezi (guatr) hücrelerinde toplanmaktadır. Tiroid bezinin büyümesi ve faaliyeti, bu bölgede I-131 tarafından yayılan radyasyon sayesinde durdurulur. Tiroid bezinin kontrolsüz çalışan fonksiyonu normale döner veya sağlıklı tiroid dokuları yok edilir.

I-131 beta ışınması yapar ve yarılanma süresi 8,025 gündür. Beta partikülü enerjisi 0,61 MeV'dir. Kapsül formunda alınan iyot vücutta tiroid bezi tarafından tutulur. I-131 vücudun diğer bölgelerinde az miktarda tutunur ve dokulara zararı bulunmamaktadır. Vücuttan idrar, tükürük, terleme ve dışkı yolu ile büyük oranda atılır.

Radyonüklit tedavi ünitelerinde hastaya verilen doz, hastalığın özelliğine göre değişiklik gösterebilmektedir. Düşük doz verildiği durumlarda hastanın hastanede yatması gerekmemektedir. Ancak yüksek dozlarda hastanın çevresindekilerin yayılan radyasyondan zarar görmelerinin önlenmesi için hastanede radyonüklit tedavisi için özel olarak hazırlanmış odada yatması gerekir. Hastanede kalış süresi verilen doza ve hastanın belirli bir sürede bu dozun ne kadarının vücuttan atabildiğine göre 3-7 gün arasında değişebilmektedir.

Radyonüklit tedavi odaları genellikle çalışanların ve diğer toplum bireylerinin dış ışınlamaya maruz kalmamaları için tuvaleti içerisinde bulunan tek kişilik odalar olarak planlanmaktadır. Tedavi gören hastanın radyoaktif madde ihtiva eden atıklarının merkezi kanalizasyon sistemine verilmeden önce belirli salım limitlerinin altına düşmesi için bekletilmesi gereken bir atık tank sistemi planlanması önerilir.

Radyoaktif bulaş ihtimali olan mutfak malzemeleri, havlu, çarşaf gibi malzemelerin herhangi bir işlem görmeden önce radyoaktif bulaşının yarılanarak belirli salım limitlerinin altına düşmesi için bekletme odalarında bekletilmesi gereklidir.

Radyonüklit tedavi ünitelerinde bulunan alanlar aşağıda verilmiştir.

- Sıcak oda:
- Radyoaktif hasta yataklı tedavi odası (Odalar tek kişilik olacağı için bir üniteye birden fazla radyoaktif hasta yataklı tedavi odası olabilmektedir.)
- Katı radyoaktif atık bekletme odası
- Radyoaktif hasta tuvaleti
- Kontamine mutfak ve çamaşır malzemesi bekletme alanı
- Dekontaminasyon duş sistemi

6.1 Radyonüklit Tedavi Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler ve Kullanım Amaçları

Radyonüklit tedavi ünitelerinde kullanılan başlıca radyofarmasötikler ve kullanım amaçları Çizelge 6.1’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Radyonüklit Tedavi Ünitelerinde Kullanılan Başlıca Radyofarmasötikler

Radyoizotop Cinsi	Yarı Ömrü	Enerjisi (MeV)	Kullanım Amacı	Radyoizotopun üretim şekli
I-131	8 gün	$\beta -$ 0.606, 0.333	Tiroid kanser tedavi	Nükleer Reaktör
Lu-177	6,68 gün	$\beta -$ 0.496	Nöroendokrin tümör tedavisi	Nükleer Reaktör ile üretilip jeneratörden sağılmaktadır
Sm-153	2 gün	$\beta -$ ort. 0.22	Kemik metastaz ağrı tedavisi	Nükleer Reaktör

7. ZIRHLAMA

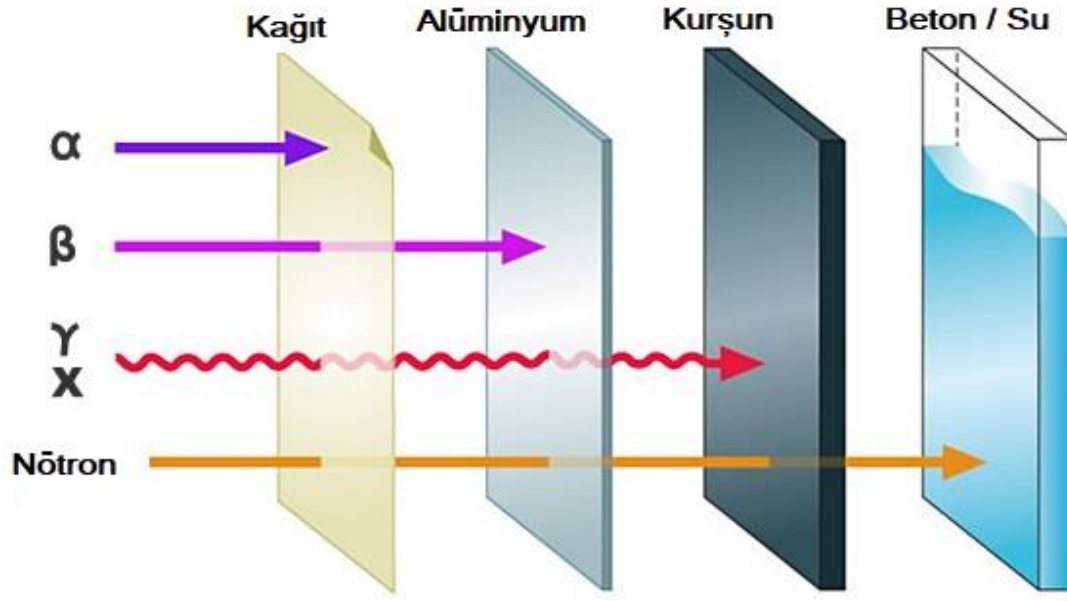
Radyasyonun insan sağlığına olan zararlarının fark edilmesi ile birlikte radyasyondan korunmaya yönelik araştırmalar uzun yıllar devam etmiştir ve etmektedir. Radyasyonun hayatımıza planlı olarak dâhil edilmesi bu çalışmaları artırmıştır.

Zırhlama, radyasyon kaynağının cinsine göre gerekli derecede zayıflatılması için yeterli kalınlıkta bir engel ile kuşatılmasıdır.

Radyasyon uygulamalarının yapıldığı veya faaliyetlerinin yürütüldüğü alanların planlanmasında zırhlamanın öncelikli kriterlerden birisi olması nedeni ile zırhlama yöntemleri ve kullanılacak malzeme seçimi de hala üzerinde çalışılan konulardan birisidir.

Radyasyon kaynaklarının yaygın olarak kullanılması ile birlikte zırhlama malzemelerine talep artmıştır. Bu talebi karşılamak ve radyasyon kaynaklarının cinsleri ve giricilik özellikleri göz önünde bulundurularak uygun zırhlama malzemesi belirlemek için pek çok bilimsel araştırma yapılmaktadır.

Çoğu malzeme radyasyonun gerekli derecede zayıflatılması için yeterli kalınlıkta kullanıldığında korunma amaçlı için kullanılabilir. Şekil 7.1' de radyasyonun türlerine göre farklı malzemelere giricilikleri gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Radyasyon Türlerine Göre Farklı Malzemelerdeki Giricilikleri

Radyasyon kaynağının bulunduğu alanda yapılan zırhlama işleminde amaç, hesabı yapılan engelin arkasındaki meşguliyet alanındaki radyasyon dozunun o alan için belirlenmiş tasarım dozuna eşit olmasını sağlamaktır. Zırhlama malzemesinin radyasyon kaynağına uygunluğuna karar verilirken dikkat edilmesi gereken önemli kriterlerden biri kullanılması düşünülen malzemenin radyasyon kaynağının cinsine göre farklı izotoplarının tesir kesitleridir. Yüksek tesir kesiti, radyasyonun madde ile daha fazla etkileşimini dolayısı ile daha iyi bir zırhlamayı ifade etmektedir.

Zırhlama malzemesini seçerken, aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Radyasyon kaynağı için uygunluğu,
- Zırh malzemesinin yeterli korumayı sağlayacak kalınlığı ve yoğunluğu dolayısı ile ağırlığı,
- Optik şeffaflık (gerektiğinde)
- Kalite kontrol şartları (homojenlik, dayanıklılık, vb.)
- Montaj ve bakım da dahil olmak üzere malzeme maliyeti
- Görünüş

Zırhlama amacıyla kullanılan iki malzeme genellikle kurşun ve beton olmasına rağmen, belirli koşullar altında birinin diğerinden daha avantajlı olduğu durumlar olabilir. Düşük

enerjilerde zırhlama malzemesi olarak kurşun betona göre daha ekonomik olmaktadır; yüksek enerjilerde ise beton kurşuna göre daha ekonomik olmaktadır.

Yapılan zırhlama hesapları her ne kadar doğru olsa da inşaat ve imalat sırasında oluşan muhtemel aksaklıkların tespit edilmesi için radyasyon alanlarında yapılan zırhlamanın yeterli koruma sağlayıp sağlamadığı, radyasyon kaynağı zırhlanmış alan içerisine yerleştirildikten sonra uygun ölçüm aleti ile çevresel radyasyon ölçümü yapılarak kontrol edilmelidir.

7.1 Zırhlamada Kullanılan Başlıca Malzemeler

7.1.1 Beton

Beton; içerik olarak çimento, agrega su ve bazı kimyasal katkı maddelerinin birleştirilmesi ile elde edilen bir yapı malzemesidir. Başlangıçta plastik ya da akıcı kıvamdadır. Akışkan halde iken şekil verilebilmektedir. Zaman içerisinde katılaşıp ve mukavemet kazanır. Hacimsel olarak yaklaşık %75 oranında agrega, %10 oranında çimento ve %15 oranında sudan oluşur. Yapı malzemesi olarak kullanılan betonun yoğunluğu genellikle 2,35 g/cm³'tür [8].

Betonun binalarda taban ve tavan yapı malzemesi olarak halihazırda kullanılıyor olması avantaj sağlamaktadır. Betonun radyasyon zayıflatma katsayısı radyasyon kaynağının cinsine, betonun kalınlığına ve yoğunluğuna göre değişmektedir.

7.1.2 Kurşun

Zırhlama malzemesi olarak yaygın kullanılan bir diğer malzeme kurşundur. Plakalar veya kurşun tuğlalar halinde mevcuttur. Betona göre avantajları ve dezavantajları vardır.

Avantajları:

Beton zırhlamanın yapılamadığı durumlarda alternatif çözüm malzemesidir. Kapı, pencere kasalarında ve pervazlarında kullanılabilir. Mevcut beton kalınlığının yeterli korumayı sağlayamadığı durumlarda zırhlamayı tamamlamak için kullanımı ekonomik açıdan fayda sağlayabilmektedir.

Dezavantajları:

Kolay deforme olabilir, toksik özellik taşır (plakanın üzerine alçı panel, sunta vb. malzeme ile kaplanması gerekir), plakaların montajı sırasında vida delikleri oluşur, bu da süreksizliğe neden olur, montajı iyi yapılmaz ise zamanla düşme/sarkma yapabilir, maliyeti yüksektir.

7.1.3 Tuğla ve Benzer Malzemeler

Betona benzer yapıda ve farklı yoğunluktaki malzemeler zırhlama malzemesi olarak kullanılabilir. Yoğunlukları betona kıyasla daha az oldukları için eş değer beton kalınlığında zırhlama sağlamak için bu malzemelerden daha kalın kullanmak gerekebilir.

7.1.4 Çelik

Betona kıyasla pahalıdır. Ancak kurşun gibi de toksik özelliği bulunmamaktadır. X ve gama ışınlarından kaynaklı radyasyona kurşun ve beton arasında bir zırhlama sağlar. Mevcut binalarda aynı zamanda güçlendirme malzemesi olarak da kullanıldığı için zırhlama yanında güçlendirme de yapılacaksa tercih edilebilir. Ancak mevcut bir binada sadece zırhlama yapılması gerekiyor ise kurşun daha az maliyetli olacaktır. Yeni inşa edilecek bir binada, maliyeti kurşuna göre daha uygun bir çözüm olabilmektedir.

7.1.5 Alçı Panel

Alçı panel hafif olması, işçiliğinin kolay olması ve maliyetinin düşük olması sebebi ile son zamanlarda kullanımı artan bir duvar yapı malzemesidir. Ancak zırh malzemesi olarak x-ışını, beta ve gama radyasyonundan korunmaya bir fayda sağlamamaktadır.

7.1.6 Toprak

Beton ile benzer içerikten oluştuğu için zırh malzemesi olarak kullanılabilir. Ancak formundan dolayı yapı malzemesi olarak kullanımı oldukça zordur. Binaların temelinde veya bodrum kattaki alanların yan cephelerinde bulunur. Bu alanlar zırhlama gerektirmeyen alanlardır.

7.1.7 Cam

Cam, aşırı soğutulmuş alkali ve toprak alkali metal oksitleriyle, diğer bazı metal oksitlerin çözülmesinden oluşan bir sıvıdır. Ana maddesi silisyumdur. Farklı kimyasal sistemlerle cam oluşturmak mümkünse de, bunlardan en önemlisi SiO₂'dir. Saydam olması nedeni kullanılması zaruri olan alanlar vardır. Tesir kesitinin düşük olmasından dolayı zırhlama malzemesi olarak kullanılması gereken durumlarda içeriğine kurşun oksit (PbO) eklenmektedir.

7.2 Nükleer Tıp Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Planlı bir radyasyon ışınlamasına maruz kalınacak ise bu ışınlamanın neden olacağı radyasyon maruziyetinden korunmak için de iyi bir korunma planlaması yapmak gerekmektedir.

Nükleer tıp uygulaması planlı bir radyasyon maruziyetidir. Bu nedenle nükleer tıp ünitelerinin planlaması yapılırken hem çalışanların hem de hastaların radyasyondan en az etkilenmeleri için zaman, mesafe ve zırhlama unsurları göz önünde bulundurulmalıdır.

Radyasyonun çıplak gözle görülemiyor olması ve sadece uygun ölçüm aletleri ile varlığının tespit ediliyor olması radyasyondan korunmada birçok problemi de beraberinde getirmektedir. Çıplak gözle görülemeyen bu tehlikeden toplum bireylerinin korunabilmesi için pek çok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede radyasyon kaynaklarının bulundurulması, kullanılması, taşınması, depolanması, ithal/ihraç edilmesi, satış/devir yapılması, bertaraf edilmesi için yasal düzenlemeler yapılmaktadır. Bu yasal düzenlemeler radyasyon kaynaklarının takibinin yapılabilmesini sağlamak ve kullanımı sınırlandırmaktadır.

Ülkemizde, nükleer tıp ünitelerinin tasarımı yapılmadan önce düzenleyici kuruluş tarafından belirlenen düzenlemeleri incelemek ve asgari koşulları sağlayacak bir alan tasarımı yapmak önem arz etmektedir. Birden fazla radyasyon kaynağı içeriyor olması nedeni ile nükleer tıp ünitelerinin faaliyet göstermesi, bu hizmetin verilmesine karar verilme aşamasından ünitelerin hizmetlerinin sona erdirilmesine kadar yasal düzenlemelere göre yapılmaktadır.

Bununla birlikte nükleer tıp ünitelerinin bulunacağı bina seçimi de çok önemlidir. Mümkünse müstakil bir yapı olarak bu sağlanamıyor ise, planlanan binanın zemin/bodrum katında, bağımsız, insan trafiğinin en az olduğu yerlerde kurulması önerilmektedir. Giriş çıkışların kontrol altında tutulabilecek şekilde planlanması; ünite alanları planlanırken de ilgili alanlarda bulundurulması öngörülen radyoaktivite miktarlarına göre alanların yerleştirme işleminin en düşük aktiviteli alanlar girişte en yüksek aktiviteli alanlar iç kısımlarda olacak şekilde yapılması tavsiye edilmektedir.

Zırhlamada kullanılan beton ve kurşun gibi malzemelerin yoğunlukları yüksektir. Kalın bir beton veya kurşun zırhlaması gerektiğinde de ağırlık artacağı için binanın statik dengesini etkileyebileceği unutulmamalıdır. Mevcut bir binada sonradan beton ve kurşun plakalar ile zırhlama yapılırken binanın yük taşıma kapasitesinin bu ilave yük için uygun olup olmadığının kontrol edilmesi fayda sağlayacaktır.

Yeni inşa edilecek binalarda ise inşaata zırhlama hesapları yapıldıktan sonra başlanması avantaj sağlamaktadır. İnşaatın daha önceden belirlenmiş beton zırhlama kalınlıklarına göre yapılması hem ekonomik açıdan hem de zaman tasarrufu açısından fayda sağlayabilmektedir.

7.3 Nükleer Tıp Ünitelerinde Zırhlama Hesaplamaları

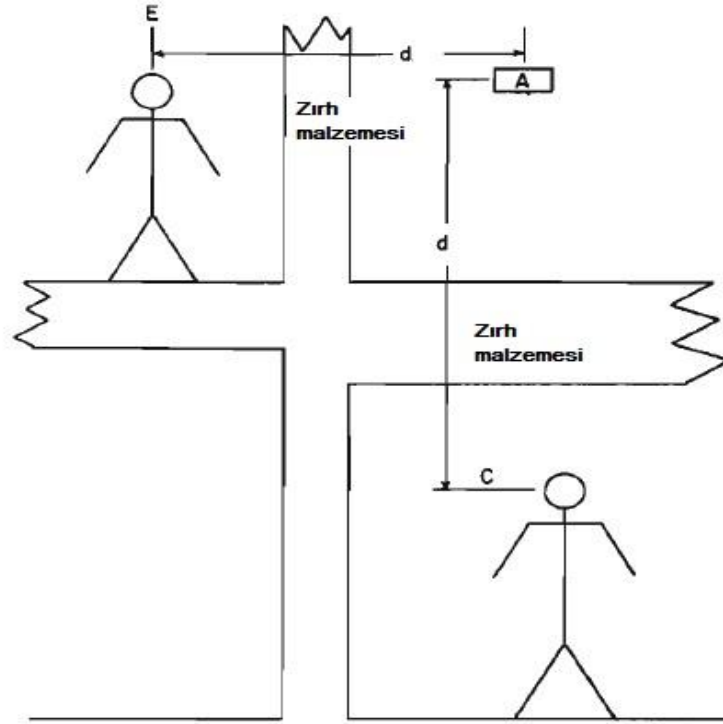
Nükleer tıp ünitelerinde zırhlama hesaplamaları iki kategoride düşünülmelidir: radyasyon kaynaklarının bulunduğu alanların zırhlanması ve kullanılan radyasyon kaynaklarının kendilerinin zırhlanması.

Görüntüleme odaları, radyoaktif hasta bekleme odaları ve tuvaletleri gibi radyoaktif hastaların bulunduğu alanlarda, kullanılan radyoaktif kaynağın cinsi ile birlikte bu alanlarda aynı anda bulunan hasta sayısı, her bir hastanın geçirdiği süre, alanın ünite içerisinde bulunduğu konum ve bitişik alanlarının kullanım amacı zırhlamayı etkileyen başlıca unsurlardır.

Nükleer tıp ünitelerinin zırhlama hesapları yapılırken radyasyon kaynağı olarak, ünite

kullanılan radyofarmasötiklerden kaynaklanan gama ışınları ve hibrit görüntüleme sisteminden kaynaklanan x-ışınları dikkate alınmaktadır. Bu nedenle de zırhlama malzemesinde genel olarak beton ve kurşun kullanılmaktadır. Binalarda tavanın ve tabanın betondan yapılıyor olması ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır. Tavanda ve tabanda beton kalınlıklarının yeterli gelmediği durumlarda kurşun tamamlayıcı zırh malzemesi olarak kullanılabilir.

Şekil 7.2’ de A noktasında bulunan radyasyon kaynağından d mesafede uzakta alt katta C noktasında ve yine d mesafe uzaklıkta E noktasında bitişik alanda bulunan toplum bireyleri gösterilmiştir. Radyasyon kaynaklarının türüne ve enerjisine göre bulunduğu alanların duvarlarında, tavanında ve tabanında kesintisiz zırhlama yapılması gerekebilir.



Şekil 7.2 A Noktasında Bulunan Radyasyon Kaynağından d Mesafede Uzakta Bulunan Toplum Bireyleri [9]

Zırhlama hesaplaması yapılırken temel prensip, radyasyonunun enerjisinin kullanılan zırh malzemesinin içinden geçerken çarpışmalar yaparak tüketecek kalınlıkta ve yoğunlukta zırh malzemesi seçmektir.

Teknoloji ve endüstrinin sürekli gelişiyor olması farklı bileşenlerden oluşan farklı malzemelerin de radyasyondan korunmada kullanılıp kullanılmayacağı sorularını beraberinde getirmekte ve bu sorulara cevap bulmak üzere akademik çalışmalar devam etmektedir. Ancak nükleer tıp uygulamalarında zırhlama yapılacak alanların geniş olması ve zırh malzemesi seçiminde maliyetin önemli bir faktör olması nedeni ile ergonomik olmalarından dolayı en çok kullanılan malzemeler günümüzde beton ve kurşundur.

7.3.1 Zırhlama Hesaplamalarında Kullanılan Parametreler

7.3.1.1 Tasarım dozu (P)

Radyasyon çalışanları ve toplum bireyleri için belirlenmiş haftalık etkin doz değeridir. Birimi $\mu\text{Sv/hafta}$ 'dır.

Radyasyon çalışanları için etkin dozun ardışık beş yılın ortalaması 20 mSv'i, herhangi bir yılda ise 50 mSv'i geçmesi beklenmemektedir. Ancak bu kişiler, görevleri gereği birden fazla radyasyon alanında bulunabilir ve ışınlanmaya maruz kalabilir. Bu nedenle radyasyondan korunma sisteminin optimizasyon prensibi gereğince ilave sınırlamalar uygulanır. Bu alanlardaki zırhlama hesaplamalarında tasarım dozu yıllık 5 mSv, haftalık 100 μSv olarak kabul edilir [10].

Toplum bireylerinin buldukları alanlarda etkin doz yılda 1 mSv'i geçemediğinden haftalık tasarım dozu bu alanlarda 20 μSv alınır [10].

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Zırhlama Hesaplamaları Kılavuzu, RSGD-KLV-006, Ankara, 2016'da yer alan ve zırhlama hesaplamalarında kullanılan tasarım dozları Çizelge 7.1'de verilmiştir.

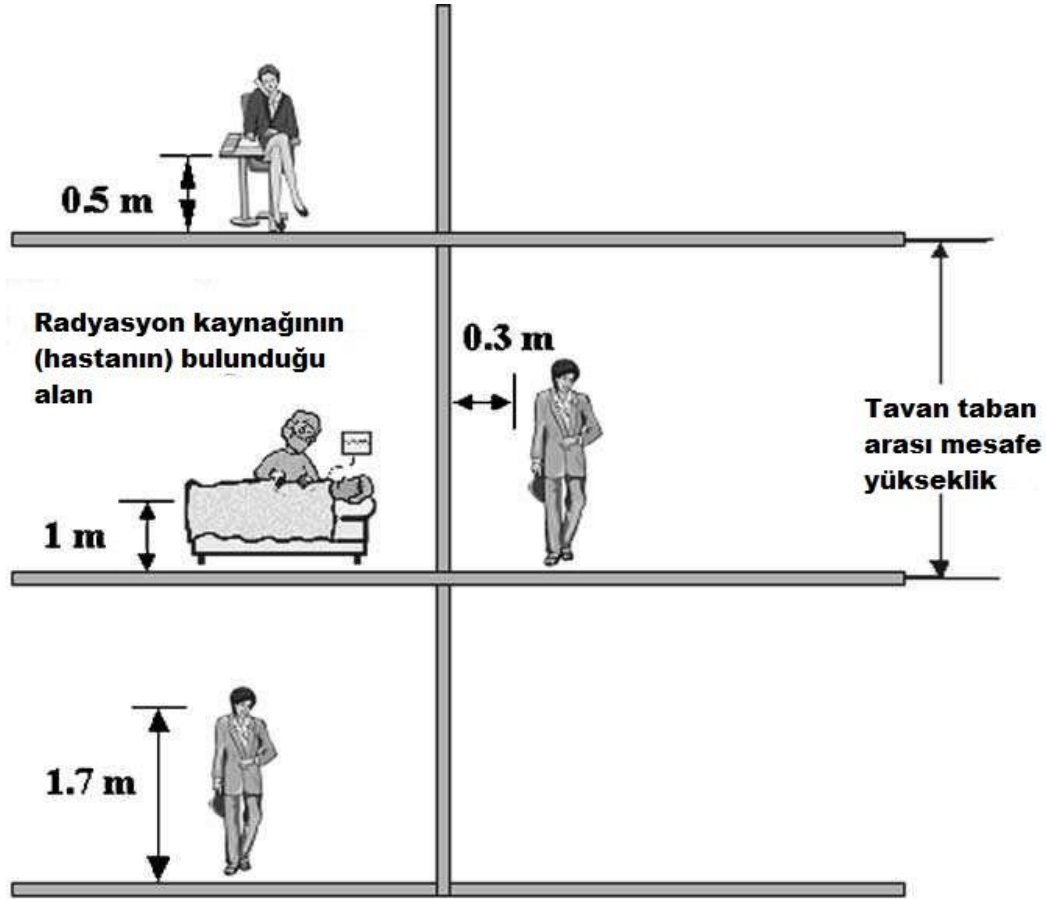
Çizelge 7.1 Alanlara Göre Tasarım Dozları [11]

	Alanlar	Tasarım Dozları
Radyasyon Alanları	Teşhis/tedavi cihazı bulunan oda, yataklı tedavi odası, kumanda ünitesi0F/paravan, PET/nükleer tıp ünitesinde bulunan enjeksiyon+hasta bekleme odası, radyoaktif hasta bekleme odası, efor odaları, hasta tuvaleti/banyosu, radyofarmasi araştırma/kalite kontrol laboratuvarları, radyoaktif atık odası	100 μ Sv/hafta (10 mrem/hafta)
Toplum Üyesi Kişilerin Bulunabilecekleri Alanlar	Nükleer tıp görüntüleme cihazı odası, ofis, rapor odası, danışma/hasta kayıt alanı, laboratuvar, poliklinik, doktor /hemşire /muayene odası, ameliyathane, yoğun bakım ünitesi, çocuk oyun alanı, mesken, işyeri/dükkân, derslik, boş oda, kafe/restoran, mutfak, çamaşırhane, hasta gözlem odası, bekleme yapılan salon/koridor, konferans/eğitim salonu, personel dinlenme odası, tuvalet, depo, asansör, hasta karşılama/geçiş koridoru, bahçe/avlu, teknik oda, bina içi merdiven, arşiv, otopark, trafiğe açık cadde/sokak/yol, yangın merdiveni, çatı/teras, soyunma kabinleri	20 μ Sv/hafta (2 mrem/hafta)

7.3.1.2 Uzaklık (d)

Radyasyondan korunmadaki önemli gerekliliklerden biri radyasyon kaynağı ile araya mesafe koymaktır. Nükleer tıp ünitelerinin alanlarının geniş planlanması doğal bir radyasyon koruması sağlamaktadır. Ancak bunun mümkün olmadığı veya radyasyon kaynağının enerjisinin yüksek olduğu durumlarda radyasyondan korunmayı sağlamak için zırlama yapılmaktadır.

Zırlama hesaplamalarında uzaklık ölçümünde, hesap yapılan engel arkasında bulunan kişinin radyasyona hassas organlarının engele en yakın olduğu nokta temel alınmalıdır. Birimi metredir. Şekil 7.3’de radyasyon kaynağı olarak radyoaktif madde almış bir hastanın bulunduğu odanın zırlama hesaplamalarında bitişik alanlarına olan mesafesi gösterilmiştir [10].



Şekil 7.3 Radyoaktif Madde Almış Bir Hastanın Bulunduğu Odanın Zırhlama Hesaplamalarında Bitişik Alanlarına Olan Mesafesi [10]

Zırhlama hesaplamalarında, engel arkasındaki kişinin kaynağın dışındaki alanda engelden/duvardan 0,3 m uzakta bulunacağı kabul edilir. Zırhlama hesabı yapılan alanın, radyasyon kaynağı bulunan alanın alt katında olduğu durumlarda, alt kattaki kişinin boyunun ortalama 1,70 m olduğu ve baş bölgesinin radyasyon hassasiyetinin fazla olduğu öngörülerek radyasyon kaynağı ile alt kat zemininin 1,70 m yukarısı arasındaki mesafeyi almak gerekir. Meşgul edilen alan radyasyon kaynağının üst katında ise, radyasyon kaynağı ile üst kat zemininin 0,5 m yukarısı arasındaki mesafenin esas alınması öngörülmüştür [11]. Kaynaktan tavana/tabana olan mesafeye tavan/tabana yapı malzemesi kalınlığı eklenir.

Nükleer tıp ünitelerinde radyonüklit verilmiş hastanın da radyasyon kaynağı olduğu; bu durumda radyasyon kaynağının hareketli olduğu unutulmamalıdır. Zırhlama hesaplamalarında mesafe belirlenirken:

Kaynağın oda içerisinde sabit olduğu durumlarda (sıcak oda, radyoaktif katı atık odası), kaynağın hesap yapılan duvara en yakın olduğu durumda gerçek mesafe ile birlikte duvar yapı malzemesi kalınlığı ve 0.3 m bitişik alan mesafesi, kaynağın hesap yapılan duvara uzak olduğu durumda koruyucu bir yaklaşım ile oda ortasından duvara olan mesafe, duvar yapı malzemesi kalınlığı ve 0.3 m bitişik alan mesafesi belirlenir.

Görüntüleme odasında hastanın oda içerisinde görüntüleme cihazı ile aynı konumda olduğu düşünülür. Zırhlama yapılan duvar mesafesi belirlenirken, radyoaktif madde verilmiş hastanın yatar pozisyonda radyasyon kaynağı olarak bulunur. Mesafe belirlenirken görüntüleme cihazının yatağının hesap yapılan duvara en yakın olduğu mesafeler esas alınmalıdır. Hibrit görüntüleme sistemlerinde bilgisayarlı tomografiden kaynaklı x-ışını zırhlamasında ise mesafe belirlenirken, x-ışını kaynağı gantrinin hesap yapılan duvarlara olan mesafesi esas alınır. Duvar yapı malzemesi kalınlığı ve bitişik alan mesafesi 0.3 m ölçülen mesafeye eklenmelidir.

Kaynağın oda içerisinde hareketli olduğu durumlarda (enjeksiyon odaları, efor odası, bekleme odası, tuvalet) kaynağın hesap yapılan duvara en yakın olma ihtimali olan gerçek mesafe ile birlikte duvar yapı malzemesi kalınlığı ve 0.3 m bitişik alan mesafesi, kaynağın hesap yapılan duvara uzak olma ihtimali olduğu durumda koruyucu bir yaklaşım ile oda ortasından duvara olan mesafe, duvar yapı malzemesi kalınlığı ve 0.3 m bitişik alan mesafesi belirlenir. Örneğin enjeksiyon odası zırhlama hesaplamalarında, hastanın enjeksiyon koltuğunda daha çok vakit geçireceği düşünülerek, enjeksiyon koltuğuna en yakın duvar hesabında gerçek mesafe, en uzak duvar hesabında oda ortasından ölçüm alınmalıdır. Duvar yapı malzemesi kalınlığı ve 0.3 m bitişik alan mesafesi eklenmelidir.

7.3.1.3 Kullanım Faktörü (U)

Zırhlama hesabı yapılan engele/duvara birincil ışın demetinin yönlendirilme oranıdır. Nükleer tıp ünitelerinde radyoaktif madde olan radyasyon kaynakları noktasal kaynak davranışı gösterdiği için kaynaktan çıkan en yüksek enerjili radyasyonun karşılaştığı ilk zırhlama engelene yönelme oranı 1'dir [10].

7.3.1.4 Meşguliyet faktörü (T)

Zırhlama hesabı yapılan duvarın/engelin arkasında en çok vakit geçiren kişi için meşgul edilme oranı olarak tanımlanmıştır [12]. Zırhlamada amaç alanları zırhlamak değil, o alanda bulunan kişiler için zırhlama sağlamaktır. Zırhlama yapılırken maliyetler de göz önünde bulundurulduğunda meşguliyet faktörüne bağlı olarak radyasyon kaynağına bitişik hiç meşgul edilmeyen bir alanın zırh kalınlığının sürekli meşgul edilen bir alanın zırh kalınlığından daha az olması beklenmektedir. Tam meşgul edilen alanlar için meşguliyet faktörü 1; meşgul edilmeyen alanlar için 1/40 olarak tanımlanmıştır. Diğer alanlar meşguliyetlerine göre bu iki değer arasında meşguliyet faktörü ile tanımlanmıştır. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Zırhlama Hesaplamaları Kılavuzu, RSGD-KLV-006, Ankara, 2016'da yer alan ve nükleer tıp ünitelerinde bulunan meşguliyet faktörleri Çizelge 7.2' de verilmiştir. Ancak zırhlama hesabı yapılırken her bir alanın meşguliyeti uygulamaya özgü gözden geçirilmeli ve uygun bir meşguliyet faktörü seçilmelidir [9-11].

Çizelge 7.2 Alanlara göre meşguliyet faktörleri [11]

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, trafiğe açık cadde/sokak/yol, yangın merdiveni, çatı/teras

7.3.1.5 Gama sabiti (Γ)

Gama sabiti, gama ışınması yapan belirli bir aktivitedeki noktasal bir kaynaktan 1 m uzaklıktaki doz şiddetidir. Her radyoaktif çekirdek için farklıdır. Radyoaktif kaynaklar için

birimi $\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.sa}$ at'dir. Hem zırhlama hesaplamaları için hem de hasta dozu hesaplamalarında kullanılan önemli bir parametredir. Gama sabiti Denklem 7.1 kullanılarak hesaplanabilmektedir [13].

$$\Gamma = (1/4\pi R^2) \sum_i^n S_i D(E_i) \quad (7.1)$$

"Neutron and Gamma-ray Flux-to-Dose-Rate Factors," ANSI/ANS-6.1.1-1977, American Nuclear Society, La Grange Park, IL 60525 referans alındığına:

R= 1 m,

n= Radyonüklit tarafından yayılan gama ışını sayısı,

S_i = Her bir gama ışınının gerçekleşme olasılığı

$D(E_i)$ = Her bir akı yoğunluğu için eş değer doz, ($\mu\text{Sv m}^2$)

E=Gama ışını enerjisi MeV,

Gama ışını akı yoğunlukları Denklem 7.2'den elde edilebilmektedir.

$$\ln D(E) = A + B(\ln E) + C(\ln E)^2 + F(\ln E)^3 \quad (7.2)$$

Denklem 7.2' de kullanılan katsayılar Çizelge 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.3 Denklem 7.2'de kullanılan katsayılar [14]

Foton Enerjisi (MeV)	A	B	C	F
0.01 – 0.03	-20.477	-1.7454		
0.03 – 0.5	-13.626	-0.57117	-1.0954	-0.24897
0.5 – 5.0	-13.133	-0.72008	-0.033603	
5.0 – 15.0	-12.791	-0.28309	0.10873	

Daha güncel bir kaynak olan "Radiation Protection Dosimetry (2018), Vol. 178, No. 3, pp. 310–321 doi:10.1093/rpd/ncx112 Advance Access Publication, 31 Ağustos 2017" referans alındığında:

R= 100 cm,

n= Radyonüklit tarafından yayılan gama ışını sayısı,

S_i= Her bir gama ışınının gerçekleşme olasılığı

D(E_i)= Her bir akı yoğunluğu için eş değer doz, (pSv cm²)

E= Gama ışını enerjisi, MeV,

Gama ışını akı yoğunlukları aşağıdaki denklemden elde edilebilmektedir.

$$\ln D(E) = C_{i,0} + C_{i,1} (\ln E) + C_{i,2} (\ln E)^2 + C_{i,3} (\ln E)^3 + C_{i,4} (\ln E)^4 \quad (7.3)$$

Denklem 7.3'de kullanılan polinom katsayıları anteroposteriyor (ön arka eksen) ışınlanmalar için Çizelge 7.4' de verilmiştir.

Çizelge 7.4 Denklem 7.3'de kullanılan katsayılar [15]

Foton Enerjisi (MeV)	C _{i,4}	C _{i,3}	C _{i,2}	C _{i,1}	C _{i,0}
0.01 – 0.03	1.79206e-02	5.07505e-01	3.51950e+00	9.58716e+00	8.34462e+00
0.03 – 0.15	2.72646e-02	7.21895e-02	- 4.00876e-02	7.89978e-01	1.49025e+00
0.15 – 40	- 8.73781e-03	6.67348e-02	- 1.93658e-01	8.63207e-01	1.48715e+00
40.0 – 10000	- 2.52906e-06	5.21780e-03	- 1.30408e-01	1.12864e+00	1.11776e+00

Gama sabiti, aktivitesi bilinen bir noktasal kaynaktan d mesafe uzaklıktaki doz hızı biliniyor ise

$$D = \frac{A \times \Gamma}{r^2} \quad (7.4)$$

bağıntısından da bulunabilir [16]. Burada:

Γ , Gama sabiti (μSv.m²/MBq.saatt)

A, aktivite (MBq)

r, kaynak ile hassas dedektör merkezi arasındaki doğrusal mesafe (m)

D, Doz hızı (μSv / saat)

Denklem 7.4 kullanılarak gama sabitleri şu şekilde hesaplanır:

$$\Gamma = \frac{r^2 \times D}{A} \quad (7.5)$$

Radyonüklitler için gama sabitleri hesaplamalarında farklı yöntemler kullanılıyor olması literatürde farklı değerler ile karşılaşılmasına neden olmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan hesaplamalarda kullanılan gama sabitleri Çizelge 7.5’ de verilmiştir.

Çizelge 7.5 Nükleer Tıpta Yaygın Olarak Kullanılan Radyonüklitlerin Gama Sabitleri [11]

Radyoaktif Kaynak	Gama Sabiti, Γ ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.saat}$)
Tc-99m	0,0190
I-131	0,0590
Ga-68	0,1450
Ge-68	0,1450
Lu-177	0.00760
In-111	0,0870
Tl-201	0,0120
F-18	0,1430

7.3.1.6 Yarı Değer Kalınlığı (HVL-Half Value Layer) ve Onda Bir Değer Kalınlığı (TVL- Tenth Value Layer)

Onda bir değer kalınlığı (TVL), X-ışını veya gama ışını radyasyonundan kaynaklanan hava kerma doz hızı, ışınlanma doz hızı veya soğurulma doz hızının herhangi bir malzeme olmadan bilinen bir noktadaki ölçülen değerini aynı noktada onda birine kadar düşüren belirli malzeme kalınlığını ifade eder.

Yarı değer kalınlığı (HVL), X-ışını veya gama ışını radyasyonundan kaynaklanan hava kerma doz hızı, ışınlanma doz hızı veya soğurulma doz hızının herhangi bir malzeme olmadan bilinen bir noktadaki ölçülen değerini aynı noktada yarısına kadar düşüren belirli malzeme kalınlığını ifade eder. HVL ile TVL arasında $1 \text{ HVL} = 0,301 \text{ TVL}$ bağıntısı vardır [17].

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Zırhlama Hesaplamaları Kılavuzu, RSGD-KLV-006, Ankara, 2016’da yer alan ve nükleer tıpta kullanılan bazı radyoaktif kaynaklar için beton ve kurşun TVL değerleri Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.6 Radyoaktif kaynakların TVL değerleri [11]

Radyoizotop	TVL Değeri	
	Kurşun (cm)	Beton (cm)
Tc-99m	0,10	6,6
I-131	1,10	18,0
Ga-68	1.66	17.6
Ge-68	3.7	-
Lu-177	0.21	9.0
In-111	0.3	-
F-18	1,66	17,6
Ir-192	2,00	14,7

7.3.1.7 Kaynak Aktivitesi (A)

Nükleer tıp ünitelerinde kullanılan radyoaktif kaynağın aktivitesidir. Birimi mCi veya MBq'dir. Zırhlama hesaplamaları yapılırken korumacı bir yaklaşımla zırhlama yapılacak alanın, o alanda açıkta bulunan veya bulunması muhtemel olan en yüksek aktiviteli radyasyon kaynağına göre zırhlanmasını sağlamak gereklidir. Kullanılan radyoizotoplar her ne kadar kısa yarı ömürlü olsa da tasarımda başlangıç aktivitesi esas alınmalıdır.

7.3.1.8 Azaltma Faktörleri

Nükleer tıp ünitelerinde kullanılan bazı radyonüklitlerin çok kısa yarı ömürlü olmaları veya ünite içerisinde radyonüklit verilmiş hastaların uzun bekliyor olmaları nedeni ile ilgili alanların zırhlama hesaplamaları yapılırken kaynak aktivitesi radyoaktif bozunma, soğurulma veya vücuttan atılma gibi faktörler sebebi ile başlangıç aktivitesinden daha düşük olmaktadır. Zırhlama işlemlerinin maliyetli olması nedeni ile azaltma faktörleri kullanılan radyoizotopun cinsine göre zırh malzemesi kalınlığında tasarruf sağlayabilmektedir. Nükleer tıp üniteleri zırhlama hesaplamalarında dikkate alınan azaltma faktörleri aşağıda verilmiştir. Azaltma faktörü hesaplamalarında radyoizotopların biyolojik yarı ömürleri değil fiziksel yarı ömürleri kullanılmıştır.

Soğurulma Faktörü (SF): Nükleer tıp ünitelerinde radyonüklit ile birlikte radyonüklit enjekte edilmiş/yutturulmuş/solutulmuş hasta da radyasyon kaynağı olabilmektedir.

Radyonüklit hastanın vücuduna girdiğinde bir kısmı hasta tarafından soğurulmaktadır. Belirli bir aktivite ve ölçüm mesafesi için, hastanın vücudunun farklı bölgelerinden doz şiddetinin ölçüldüğü çalışmalar yapılarak geçen süredeki radyoaktif bozunma da dikkate

alınarak normalize edilmiştir. Yapılan bu çalışmaya göre 0.36 oranında bir soğurulma faktörü bulunmuştur [10].

Doz azaltma faktörü (DAF): Nükleer tıp ünitelerinde kullanılan radyonüklitler kısa yarı ömürlüdür. Bu nedenle bir t süre sonrasında radyasyon dozu başlangıç zamanındaki doz hızından daha düşüktür. Radyasyon dozu azaltma faktörü (DAF) Denklem 7.6'dan hesaplanabilir [10].

$$DAF = \frac{D_t}{\dot{D}_0 \cdot t} = 1,443 \cdot \frac{T_{1/2}}{t} \cdot \left[1 - e^{\left(-0,693 \cdot \frac{t}{T_{1/2}} \right)} \right] \quad (7.6)$$

D_t , t süresi için toplam doz, (μSv)

\dot{D}_0 , Başlangıç doz hızı, ($\mu\text{Sv/saat}$)

F-18 için doz azaltma faktörleri 30, 60 ve 90 dakika için sırası ile 0,91, 0,83 ve 0,76 olarak bulunmuştur [10].

Bozunma faktörü (BF): Radyoaktif bozunmaya bağlı olarak bir t süre sonundaki aktivitenin başlangıç aktivitesinden daha düşük olması beklenmektedir. Radyoizotopun fiziksel bozunumunu dikkate almak üzere kullanılan bozunma faktörü (BF),

$$BF = e^{\left(-0,693 \cdot \frac{t}{T_{1/2}} \right)} \quad (7.7)$$

Bağıntısından bulunmaktadır. Örneğin F-18 radyoizotopu için 55 dakikalık bir bekleme süresi sonrası için (F-18 $T_{1/2}=109,8$ dakika) bozunma faktörü 0,707 olarak hesaplanır. Radyoizotop başlangıçtaki aktivitesinin yaklaşık %30' unu bozunarak kaybetmiştir [10].

Vücuttan atılma faktörü (VAF): Radyonüklit, enjekte edilmiş/yutturulmuş/solutulmuş hasta vücudundan bir t süresi içerisinde ter veya idrar yolu ile vücuttan atılarak aktivitesi başlangıç değerinden daha düşük olabilmektedir. PET ünitesinde görüntüleme işlemi

öncesinde hasta vücudundaki radyoaktif izotop %15-%20 oranında ter ve idrar yolu vücuttan atılmaktadır [10].

Ortalama Azaltma Faktörü (OAF): SPECT ve PET ünitelerinde hastalar işlem sonrasında hastaneden ayrılmaktadırlar. Ancak yataklı tedavi ünitelerinde hastaya verilen radyoaktif maddenin aktivitesinin azalması, hastadan belirli bir mesafede okunan doz hızının taburcu limitlerinin altına düşmesi beklenmektedir. I-131 için bu süre ortalama 4 gündür.

Tedavi odaları hastalar tarafından 7 gün 24 saat meşgul edilmektedir. Tedavi odasına 4 günde bir yeni hasta geldiği düşünülürse radyoaktif bozunma nedeni ile dördüncü gündeki aktivitenin birinci gündeki aktiviteden daha az olması beklenmektedir. Bu azalma iş yükü hesaplamalarına ortalama azaltma faktörü ile yansıtılmaktadır [11].

Hastanın t süresi boyunca 1m mesafeden çevreye yayacağı doz hızı

$$D_0(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \dot{D}_0(0) \cdot e^{\left(-0,693 \cdot \frac{t'}{T_{1/2}}\right)} dt' \quad (7.8)$$

bağıntısından bulunmaktadır.

I-131 ($T_{1/2}=8$ gün) tedavisi gören bir hastanın 4 günlük bir taburcu süresi için hastanın yayacağı ortalama doz hızı,

$$D_0(4 \text{ gün}) = \frac{1}{4 \text{ gün}} \int_0^{4 \text{ gün}} \dot{D}_0(0) \cdot e^{\left(-0,693 \cdot \frac{t'}{T_{1/2}}\right)} dt' \quad (7.9)$$

$$D_0(4 \text{ gün}) = \dot{D}_0(0) \frac{8 \text{ gün}}{4 \text{ gün} \cdot \ln 2} \left(1 - 2^{-\frac{4 \text{ gün}}{8 \text{ gün}}}\right) \quad (7.10)$$

$$\text{OAF}(4 \text{ gün}) = \frac{8 \text{ gün}}{4 \text{ gün} \cdot \ln 2} \left(1 - 2^{-\frac{4 \text{ gün}}{8 \text{ gün}}}\right) = 0.84 \quad (7.11)$$

$$D_0(4 \text{ gün}) = \dot{D}_0(0) \text{OAF}(4 \text{ gün}) \quad (7.12)$$

olarak bulunur. [11]

7.3.1.9 İş yükü (W)

Radyasyon kaynağından 1 m uzaklıkta belirli bir süre içerisinde maruz kalınan ışınlanma miktarıdır [17]. Nükleer tıpta kullanılan birimleri, radyoaktif maddeler için Gy/hafta, $\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$ ve hibrit sistemlerde tomografi cihazından kaynaklı x-ışını için mA.dakika/hafta'dır. X-ışını kaynaklarında işyükü aşağıdaki şekilde hesaplanır.

W (mA.dak/hafta) = çekim başına ışınlama süresi (dak) x mak. tüp akımı (mA) x hasta başına çekim sayısı x hasta sayısı (haftalık)

Nükleer tıp ünitelerinde ise

$$W = \Gamma . A . t \quad (7.13)$$

Bağıntısından hesaplanır.

Γ , Gama Sabiti ($\mu\text{Sv.m}^2 / \text{MBq.saat}$)

A, kaynak aktivitesi (mCi, MBq)

t, süre (saat/hafta)

Zırlama hesaplamalarında süre, radyasyon kaynağının bulunduğu alana bitişik alanda bulunan kişilerin bir hafta boyunca saat cinsinden bu radyasyona maruz kalma süresi olarak tanımlanabilir. Süre, radyasyon kaynağının aktif konumda olduğu süre olabildiği gibi bitişik alanın hafta boyunca meşgul edilme süresi de olabilmektedir. Bu süre aynı zamanda bitişik alanda bulunan kişilerin bu kaynağa maruz kalabileceği maksimum süredir.

Örneğin bir sıcak odada, bir hafta boyunca (5 gün) her gün 1 saat kullanıldığında, sıcak odaya komşu alanların zırlama hesaplamalarında $5 \times 1 = 5$ saat/hafta kullanım süresi bulunur.

Başka bir örnekte, 7 gün 24 saat boyunca radyasyon kaynağı bulunma ihtimali olan radyoaktif katı atık odasını düşündüğümüzde, bu alana birleşik bir ofis için süre, bir hafta boyunca (5 gün) her gün 8 saat (mesai saati) kullanıldığında $5 \times 8 = 40$ saat/hafta kullanım süresi bulunur. Yine radyoaktif katı atık odasına bitişik bir yatan hasta odasını düşünürsek:

yatan hasta odasının 7 gün 24 saat boyunca meşgul edilme ihtimali olduğu için $7 \times 24 = 168$ saat/hafta kullanım süresi bulunur.

PET ünitelerinde ve yataklı tedavi ünitelerinde kullanılan radyonüklitler çok kısa yarı ömürlü oldukları ve hastanın radyofarmasötik verildikten sonra ünite içerisinde bekleme süreleri uzun olduğu için iş yükü hesaplanırken azaltma faktörleri de dikkate alınmalıdır.

PET ünitelerinde enjeksiyon ve bekleme odası, Görüntüleme odası ve radyoaktif hasta tuvaleti iş yükü hesaplanırken,

$$W = \Gamma . A . t . SF . DAF . BF . VAF \quad (7.14)$$

bağıntısı,

Radyonüklit tedavi ünitesinde tedavi odası iş yükü hesaplanırken,

$$W = \Gamma . A . t . OAF \quad (7.15)$$

bağıntısı kullanılmalıdır. [10]

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Zırhlama Hesaplamaları Kılavuzu, RSGD-KLV-006, Ankara, 2016'da yer alan ve nükleer tıpta kullanılan radyasyon kaynakları için yaygın olarak kullanılan iş yükü değerleri Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7.7 Nükleer Tıpta Kullanılan Radyasyon Kaynakları İçin Yaygın Olarak Kullanılan İş Yükü Değerleri [11]

Nükleer Tıp Ünitesi	Alanlar	Aktivite miktarı A (MBq)*	Kullanım Süresi (saat/hafta)	İşyükü (μ Sv. M ² /hafta)	CT İşyükü (mA.dak/hafta)
SPECT/SPECT-CT ÜNİTESİ (Hesaplamalar Tc-99'a göre yapılmaktadır)	Sıcak oda /radyofarmasi laboratuvarı	37000	10	7030	-
	Enjeksiyon odası	1110	40	844	-
	Radyoaktif hasta bekleme odası	11100	40	8440	-
	Görüntüleme odası	1110	40	844	2000
	Efor odası	1110	10	211	-
	Radyoaktif	1110	15	317	-

	hasta tuvaleti				
			40	1406	-
	Radyoaktif atık yeri	1850	168	5905	yan alanın yataklı tedavi odası olduğu durumlarda
PET/PET-CT ÜNİTESİ (Hesaplamalar F-18'e göre yapılmaktadır)					
	F-18 Sıcak oda / Radyofarmasi laboratuvarı	740	10	1058	-
	Ga-68 Sıcak oda / Radyofarmasi laboratuvarı	1850	2	2683	-
	Enjeksiyon-bekleme odası	555	40	1697	-
	Görüntüleme odası	555	40	1119	4000
	Radyoaktif hasta tuvaleti	555	10	322	-
			40	211	-
	Radyoaktif atık yeri	37	168	889	yan alanın yataklı tedavi odası olduğu durumlarda
YATAKLI TEDAVİ ÜNİTESİ (Hesaplamalar I-131'e göre yapılmaktadır)					
	Sıcak oda	7400	1	437	-
			40	14680	-
	Tedavi odası	6220*	168	61650	yan alanın yataklı tedavi odası olduğu durumlarda
			40	437	-
	Radyoaktif atık yeri	185	168	1834	yan alanın yataklı tedavi odası olduğu durumlarda

7.3.1.10 Geçiş Faktörü

Radyasyonun malzeme içerisinden geçerken kaybettiği enerjiye göre zırh malzemesi kalınlığı belirlenirken geçiş faktörü parametresi kullanılmaktadır.

Geçiş faktörü,

$$k = \frac{P d^2}{W U T} \quad (7.16)$$

P, Tasarım dozu ($\mu\text{Sv/hafta}$)

d, kaynak ile duvar mesafesi (m)

W, iş yükü ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)

U, kullanım faktörü

T, meşguliyet faktörü

denklemleri ile bulunur. Bu geçiş faktörleri ile zırhlama kalınlığı x arasındaki bağıntı,

$$x = TVL \times TVLn \quad (7.17)$$

denklemleri ile verilmektedir (NCRP, 1976). Burada yeterli derecede zırhlama yapmak için kaç onda bir değer kalınlığına ihtiyaç duyulduğu

$$TVLn = \log\left(\frac{1}{k}\right) \quad (7.18)$$

bağıntısı ile verilmektedir [10, 11].

7.4 Zırhlama Hesabı İçin Yazılım Geliştirilmesi

Bu tez kapsamında nükleer tıp ünitelerinde bulunan alanların zırhlama hesaplamalarının

yapılması için yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda C# programlama dili ile bir yazılım geliştirilmiştir.

Yazılım sayesinde nükleer tıp ünitesinde bulunan alanların zırhlanması için gerekli kurşun ve beton kalınlıkları hesaplanabilmektedir.

Program çalıştırılmadan önce yapılması gerekli hususlar şunlardır:

- Zırhlama hesabı yapılacak nükleer tıp ünitesinin mimari projesinin incelenmesi, alan yerleşim uygunluğunun kontrol edilmesi,
- Zırhlama hesabı yapılacak odanın belirlenmesi,
- Zırhlama yapılacak odada bulunacak radyoizotopun belirlenmesi (Standart uygulamalar için yazılım tarafından seçilmektedir. Farklı bir değer olması durumunda elle girilmesi gereklidir)
- Radyoizotopun aktivitesinin, gama sabitinin belirlenmesi (Sık kullanılan radyoizotoplar için yazılım tarafından otomatik seçilmektedir. Farklı bir değer olması durumunda elle girilmesi gereklidir.)
- Bitişik alanlarının kullanım amaçlarının belirlenmesi (komşu alanlar, alt kat, üst kat),
- Zırhlama hesabı yapılacak her yüzeyin harflendirilmesi:

Harflendirme işlemi yapılırken hesap girdileri aynı olan duvarlar için aynı harf kullanılabilir ancak hesap girdilerinden en az bir tanesi farklı ise yeni bir harf kullanılması gereklidir. Aynı yöndeki duvarlar için aynı harf ve farklı alt indis tercih edilebilir (örneğin A_1 duvarı, A_2 duvarı gibi),

- Harflendirilmiş her yüzey için tasarım dozu, meşguliyet faktörü, kullanım süresinin belirlenmesi (Yazılımda seçilen bitişik alanlara göre bu değerler otomatik belirlenmektedir. Farklı bir değer olması durumunda elle girilmesi gereklidir)
- Harflendirilmiş her yüzey için kaynağa olan mesafenin belirlenmesi. Bu işlem yapılırken ölçekli proje çıktısı üzerinden ölçekli cetvel ile ölçüm yapılmalı veya bilgisayar ortamındaki ölçekli görüntü üzerinden ölçü alınmalıdır. Ayrıca 7.3.1.2 başlığı altında belirtilen hususlar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Programın çalıştırılması için gerekli veriler şunlardır:

- Zırhlama yapılacak alan seçimi

- Zırhlama yapılacak alan radyonüklit seçimi. Tanımlı radyonüklit dışında başka bir radyoizotop kullanımı var ise gama sabiti ($(\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.sa})$), TVL beton (cm) ve TVL kurşun (cm) değeri, Aktivitesi (Mbq),
- Zırhlama yapılacak alan için yazılım tarafından belirlenmiş çalışma süresinden farklı bir çalışma süresi var ise bu çalışma süresi
- Hesap yapılacak duvarın bitişik alan kullanımlarının seçimi (Seçilen bitişik alan için yazılım tarafından belirlenmiş tasarım dozu ve meşguliyet faktöründen farklı bir değer var ise bu değerler
- Kaynağın zırhlama hesabı yapılacak yüzeylere olan mesafelerinin belirlenmesi
- Hesap yapılacak duvarda mevcutta beton var ise mevcut beton kalınlığı değerinin girilmesi (Beton yoğunluğu en az 2.35 g/cm^3 olmalıdır.)

Programın çalıştırılması sonucu elde edilen veriler şunlardır:

Yazılım, veriler belirlendiğinde istenilen yüzeyler için istenilen tasarım dozunu aşmamayı sağlayacak gerekli beton ve kurşun zırh kalınlığını cm cinsinden hesaplamaktadır. Hesap yapılan duvar için mevcut beton kalınlığı girilmiş ve zırh malzemesi olarak kalınlığı yetersiz görülmüş ise söz konusu duvarın ilave ne kadar kalınlıkta kurşun ile kaplanması gerektiği de hesaplamaktadır.

Nükleer tıp ünitelerinde zırhlama hesabı yapılan ortak duvarlar için hesaplanan en yüksek kalınlıkta zırh malzemesi ile tek taraftan zırhlama yapmak gerekli korumayı sağlayacaktır. Birden fazla radyasyon kaynağının bulunduğu alanlarda farklı radyonüklitler için hesap yapılmalı ve en yüksek zırh kalınlığını veren radyonüklite göre zırh malzemesi ve kalınlığı belirlenmelidir.

7.4.1 Nükleer Tıp Zırhlama Hesaplamalarında Monte Carlo Yönteminin Kullanımı

Nükleer tıp alanında kullanılan radyoaktif maddelerden kaynaklı zırhlama hesaplarında kullanılan yöntemler iki şekilde irdelenebilir. Bu yöntemlerden birincisi, Monte Carlo yöntemini kullanarak radyonüklitlerden kaynaklı doz hesaplarının tüm tanımlı alanlar için geometrik ve malzeme özelliklerini kullanarak foton transport denkleminin benzeşimi sonucu elde edilmesidir. Bu hesaplamalar, zaman ve iş yükü açısından pahalı olmakla birlikte, analitik teknikler kullanılarak yapılan hesapların doğrulanmasında

kullanılabilmektedir. Bir diğ er yöntem ise, analitik olarak yapılan hesaplamalarda kullanılan fiziksel parametrelerin Monte Carlo yöntemi kullanılarak oluşturulmasıdır. Bu parametrelerden en önemlisi, radyonüklitler için kullanılan doz dönüştürme sabitleridir. Kullanılan radyonüklitlerin fiziksel özellikleri ve salınan farklı enerji ve bazen de tiplerde radyasyon yaymalarından dolayı, kaynak terimi hesaplamalarında bu özellikler dikkate alınmalıdır. Çizelge 7.8’de yaygın olarak kullanılan PET radyonüklitlerinin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 7.8 Yaygın Olarak Kullanılan PET Radyonüklitlerinin Fiziksel Özellikleri [10]

Radyonüklit	Yarı ömür	Bozunma Şekli	En Yüksek Pozitron Enerjisi	Foton Salımı	Foton / Bozunma
C-11	20.4 dak.	$\beta +$	0.96	511	2
N-13	10.0 dak	$\beta +$	1.19	511	2
O-15	2.0 dak	$\beta +$	1.72	511	2
F-18	109.8 dak	$\beta +$, EC	0.63	511	1.93
Cu-64	12.7 saat	$\beta -$, $\beta +$, EC	0.65	511, 1346	0.38, 0.005
Ga-68	68.3 dak	$\beta +$, EC	1.9	511	1.84
Rb-82	76 s	$\beta +$, EC	3.35	511, 776	1.90, 0.13
I-124	4.2 gün	$\beta +$, EC	1.54, 2.17	511, 603, 1693	0.5, 0.62, 0.3

Bu sabitler farklı şekillerde tanımlanmış olup, literatürde tanımlı doz dönüştürme sabitlerine bir örnek olarak PET sistemlerinde kullanılan radyonüklitler için tanımlı sabitler Çizelge 7.9’da sunulmuştur.

Çizelge 7.9 Yaygın Olarak Kullanılan PET Radyonüklitleri için Etkin Doz Eşdeğer Doz Hızı Sabitleri [10]

Radyonüklit	Gama Sabiti ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.saat}$)	1 saat alınan doz $\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq}$
C-11	0.148	0.063
N-13	0.148	0.034
O-15	0.148	0.007
F-18	0.143	0.119
Cu-64	0.029	0.024
Ga-68	0.134	0.101
Rb-82	0.159	0.006
I-124	0.185	0.184

Çizelge 7.9’da tanımlı radyonüklitler için rapor edilen doz hızı sabitleri, 1991 ANSI / ANS-6.1.1 raporunda sağlanan etkin doz eşdeğeri hesaplamalarından alınmıştır. F-18 için, $0.143 \mu\text{Sv m}^2 / \text{MBq-saat}$ değeri, düzenleyici kuruluşlar tarafından da etkin doz eşdeğeri sınırlamalarda kullanıldığı için, zırlama hesaplamalarında kullanılacak en uygun değer olarak kabul edilmiştir [10].

Çizelge 7.10 F-18 için Rapor Edilen Doz Hızı Sabitleri [10]

F-18 Hız Sabitleri	Değeri	Birimi
Hız sabiti	15.4	$\mu\text{R.m}^2/\text{MBq saat}$
Hava kerma hız sabiti	0.134	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq saat}$
Etkin doz eşdeğeri (ANS-1991)	0.143	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq saat}$
Organ doz sabiti ^a	0.148	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq saat}$
Derin doz eşdeğeri (ANS-1977)	0.183	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq saat}$
En yüksek doz (ANS-1977)	0.188	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq saat}$

^aHavadaki 1 cm^3 organ için doz

Literatür verileri, F-18 için Çizelge 7.10’da çeşitli doz hızı değerlerinin bir listesini vermektedir. Bu değerler 0.135 ila $0.188 \mu\text{Sv m}^2 / \text{MBq-saat}$ arasındadır. En düşük değer,

0.135 $\mu\text{Sv m}^2 / \text{MBq-saat}$ hava kerma değeridir. 1 kübik cm birim hacime sahip doku için doz oranı sabiti 0.148 $\mu\text{Sv m}^2 / \text{MBq-saat}$ 'dir. En büyük değer, 0.188 $\mu\text{Sv m}^2 / \text{MBq-saat}$ değeri, 511 keV anihilasyon fotonunun geniş bir ışınına maruz bırakılan 30 cm'lik bir doku levhasında alınan maksimum doz olarak verilmiştir. Bu değer doku doz değerinden daha yüksektir. Bunun nedeni ise, doz değerinin saçılmalardan kaynaklı bileşenleri de içermesidir. Maksimum dozun elde edildiği doku derinliği 3 mm'dir. 0.183'ün derin doz değeri, benzer bir sistem için 1 cm derinlikteki doza karşılık gelir ve zayıflama nedeniyle dozun maksimum değerinden biraz daha azdır [10].

Bu çalışmada, bu doz dönüştürme çarpanının hesabına yönelik olarak, iki farklı yöntem öngörülmüştür. Birinci yöntem doz hızının doğrudan hesaplanmasıdır. Bunun için referans olarak Radiation Protection Dosimetry (2018), Vol. 178, No. 3, pp. 310–321 Advance Access Publication 31 August 2017 kullanılacak olursa, referanstaki Çizelge-7.8'de verilen doz dönüşüm faktörleri kullanarak, 1 m uzaklıkta, F-18 radyonüklid içeren 1 MBq aktiviteye sahip nokta kaynaktan dolayı maruz kalınan eşdeğer etkin doz değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Çizelge 7.8' de foton için verilen doz dönüşüm çarpanını anteroposteriyör ışınlama geometrisi için kullanarak, 0.511 MeV'lik fotonlar için, 2.523 pSv-cm² değeri elde edilir. Bu değer, aktivitesi 1MBq olan F-18 kaynak için, 1 m mesafedeki etkin eşdeğer doz hesabında kullanıldığında

$$2.523 \text{ pSv} - \text{cm}^2 \cdot \frac{10^6}{4\pi \cdot 100^2 \text{ cm}^2 \text{ MBq-s}} * 1.93 * 3600 \frac{\text{s}}{\text{saat}} * 10^{-6} \mu\text{Sv/pSv} =$$

$$0.140 \mu\text{Sv} - \text{m}^2/\text{MBq-saat} \quad (7.19)$$

elde edilir.

Bu değer 0.140 $\mu\text{Sv} - \text{m}^2/\text{MBq-saat}$, Çizelge 7.10'da verilen değerle uyumlu olup, Çizelgede verilen doz dönüştürme faktörleri bu şekilde hesaplanabilir. Annals of the ICRP: ICRP Publication 116 dokümanında ise, 0.511 MeV lik fotonlar için 2.523 pSv – cm² değeri verilmiştir. [18] Farklı enerjilere sahip fotonlar radyoaktif bozunum sonucu yayımlanıyorsa, her bir enerji ve yayımlanma oranları da dikkate alınarak bu hesaplamalar tekrar edilmektedir. Gamma doz dönüştürme çarpanları, 1 m mesafede 1 MBq aktiviteye sahip radyonüklidin bozunumu sonucu maruz kalınan etkin eşdeğer doz değerini verecektir.

Çizelge 7.10 değerleri ya da analitik formüller (bu Çizelge değerleri kullanılarak tanımlanan) Gamma faktörlerinin hesaplanmasında kullanılabilir.

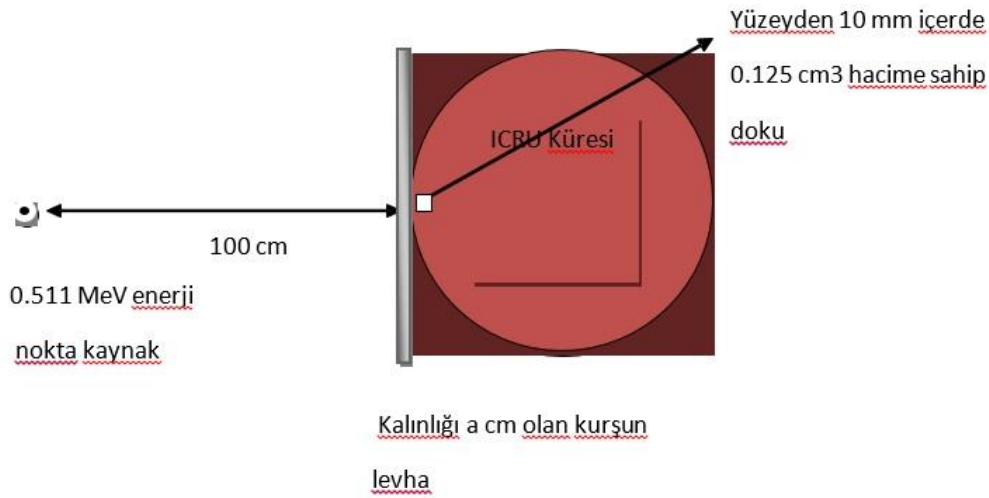
Bir diğer önemli fiziksel parametre ise, doz hızlarının yarı değerine ve onda-bir değerine düşürülmesi için gerekli olan malzeme kalınlıklarının hesabına dair olup, farklı zırhlama malzemeleri için Çizelge değerleri literatürde mevcuttur. Fakat farklı enerjilerde foton yayımlayan, ya da birden fazla radyonüklit içeren radyoaktif kaynaklar için bu değerlerin hesaplanması gerekmektedir. Hesaplamalarda doz hızı referans alındığı için, bu radyoaktif kaynaklar varken hesaplamaların yapılması ve doz değerini yarı ve onda-bir oranında azaltan malzeme kalınlıklarının hesaplanması gerekmektedir. Çizelge değerleri mevcut olmayan malzemeler ve birden fazla elementin kullanıldığı ve Çizelgede bulunmayan yapısal malzemeler için de bu hesaplamalar gereklidir.

7.4.1.1 Tripoli Monte Carlo Kodu Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

Monte Carlo yöntemi ile doz hesaplamaları ve yarı-değer kalınlığı ile onda bir değerine düşürme kalınlığı hesaplamaları F-18 radyonükliti için örnek olarak aşağıda sunulmuştur.

H_p(10) doz değerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemlerden biri ICRU-küre'sini kullanmak olup, doku ya da sudan oluşmuş, 15 cm yarıçaplı kürenin yüzeyden 10 mm içerisindeki dokudan oluşan hacim elemanında doz değerleri hesaplanmıştır. Zırhlama malzemesi varken, hesaplanan doz hızlarının, malzeme kalınlığına göre değişimi hesaplanarak, yarı değer kalınlığı ve onda-bir değer kalınlığı bulunmaktadır.

Tripoli Monte Carlo kodunu kullanarak, Şekil 7.4'de de tanımlı geometri ve malzeme özellikleri için yapılan hesaplamalar sonucunda, 0.511 Mev enerjiye sahip nokta kaynaktan salınan fotondan kaynaklı ICRU küresi içindeki doku bölgesinde depolanan enerji hesaplanmıştır.



Şekil 7.4 Nokta Kaynak İçin Işınlama Geometrisi

7.4.1.2 Tripoli Sonuçları

Zırhlama Elemanı Olmadan Yapılan Hesaplamalar

Tripoli kod sisteminden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

```

scoring mode : LOCAL_ENERGY_DEPOSITION
scoring zone : Volume num of volume : 3
Volume in cm3: 1.250000e-01

```

```

SPECTRUM RESULTS
number of first discarded batches : 0

```

Units:	group	score	sigma_%	score/lethargy
	MeV	MeV.cm ⁻³ .s ⁻¹	%	MeV.cm ⁻³ .s ⁻¹
	1.000000e-11 - 5.110000e-01	1.426291e-07	1.721751e+00	5.784517e-09

```

ENERGY INTEGRATED RESULTS

```

```

number of first discarded batches : 0

```

```

number of batches used: 10142 1.426291e-07 1.721751e+00

```

$$\dot{D} = \frac{\Delta \dot{E}_D}{\Delta m} = \frac{1.426291 \cdot 10^{-7} \cdot 0.125 \text{ cm}^3 \cdot 1.60217662 \times 10^{-13}}{0.125 \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{saat}} = 8.2266 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Gy}}{\text{hr}} \quad (7.20)$$

$$Q = 1 \text{ (Foton için kalite çarpanı)}$$

$$H_{10_0}^* = Q \cdot \dot{D} = 8.2266 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{hr}} \quad (7.21)$$

Bu hesaplanan doz değeri, nokta kaynaktan yayımlanan 0.511 MeV enerjili bir fotondan kaynaklanan 1 m mesafedeki doz hızı olup, 1 MBq aktiviteye sahip F-18 radyonükliti için dönüşüm çarpanını bulacak olursak, bu değeri $1.93 \cdot 10^6$ ile çarpmamız gerekmektedir. Bu çarpım sonucu bulunan değer ise, $0.159 \mu\text{Sv} - \text{m}^2/\text{MBq} \cdot \text{h}$ elde edilir. Bu değer literatürde verilen farklı hesaplamalarla karşılaştırıldığında, verilen değerler aralığında yer almaktadır. Farklı kurşun levha kalınlıkları için yapılan hesaplamaların sonucu ve zırh kalınlığına göre doz hızının değişimi Şekil 7.5’de verilmiştir. Bulunan yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları literatürde verilen değerlerle örtüşmektedir. 3mm zırh kalınlığı için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

a. 3 mm zırh kalınlığı için

```

scoring mode : LOCAL_ENERGY_DEPOSITION
scoring zone : Volume num of volume : 3
Volume in cm3: 1.250000e-01

```

```

SPECTRUM RESULTS
number of first discarded batches : 0

```

Units:	group	score	sigma_%	score/lethargy
	MeV	MeV.cm ⁻³ .s ⁻¹	%	MeV.cm ⁻³ .s ⁻¹
	1.000000e-11 - 5.110000e-01	9.501485e-08	1.774261e+00	3.853456e-09

```

ENERGY INTEGRATED RESULTS

```

```

number of first discarded batches : 0

```

```

number of batches used: 113389 9.501485e-08 1.774261e+00

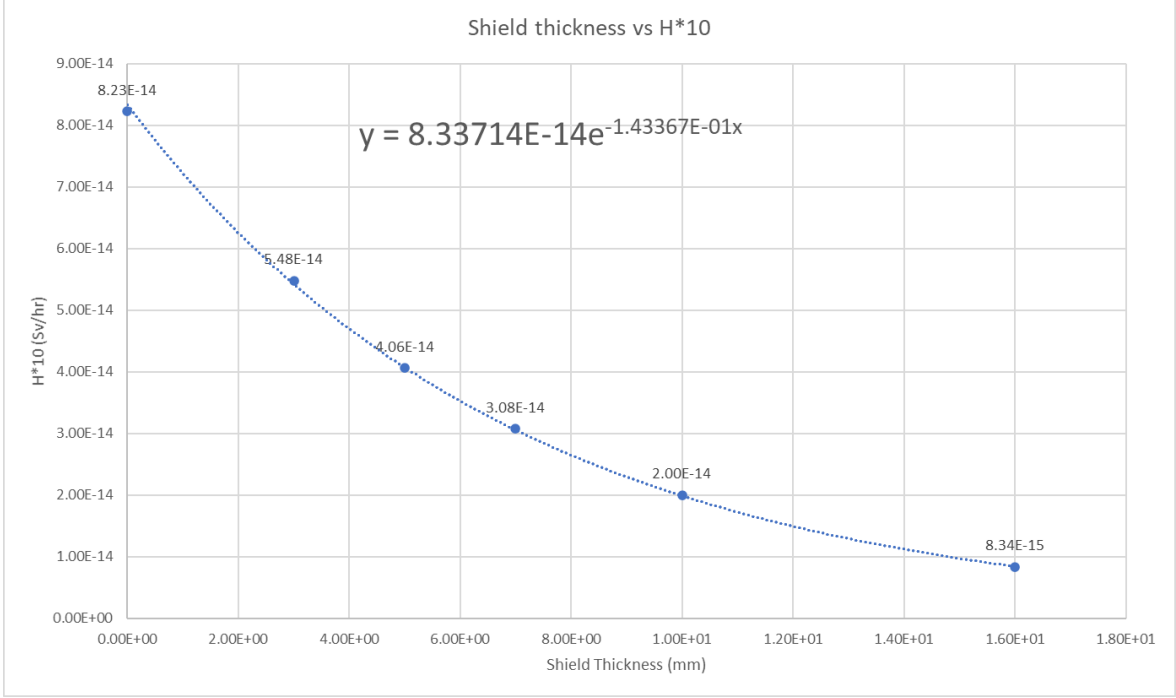
```

$$\dot{D} = \frac{\Delta \dot{E}_D}{\Delta m} = \frac{9.501485 \times 10^{-8} \times 0.125 \text{ cm}^3 \times 1.60217662 \times 10^{-13}}{0.125 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}} \times 3600 \frac{\text{sec}}{\text{hr}} = 5.4803 \times 10^{-14} \frac{\text{Gy}}{\text{hr}} \quad (7.22)$$

$$Q = 1 \text{ (Foton için kalite çarpanı)}$$

$$H^*_{10_{3mm}} = Q \cdot \dot{D} = 5.4803 \times 10^{-14} \frac{\text{Sv}}{\text{hr}} \quad (7.23)$$

olarak bulunmuştur.



Şekil 7.5 Doz Hızının Zırh Kalınlığına Göre Değişimi

elde edilen verilerin 4 üncü derece fonksiyona yerleştirdiğimizde elde edilen sonuç

$$H^*10(x) = 8.33714 \times 10^{-14} \times \exp(-1.43367 \times 10^{-1}x) \quad (7.24)$$

$$H^*10_0 = 8.2266 \times 10^{-14} \frac{\text{Sv}}{\text{hr}} \quad (7.25)$$

$$\text{HVL thickness } T_{HVL} \rightarrow \text{when } H^*10(T_{HVL}) = \frac{H^*10_0}{2} = 4.1133 \times 10^{-14}$$

$$\text{TVL thickness } T_{TVL} \rightarrow \text{when } H^*10(T_{TVL}) = \frac{H^*10_0}{10} = 8.2266 \times 10^{-15}$$

Denklem 7.24 kullanıldığında;

Yarı değer kalınlığı $T_{HVL} = 4.9278 \text{ mm}$

Onda bir değer kalınlığı $T_{TVL} = 16.1539 \text{ mm}$

olarak bulunur.

Bu doğrultuda, nükleer tıpta kullanımı olası yeni radyonüklitler ve farklı zırlama malzemeleri için, Monte Carlo yöntemi kullanılarak veri üretmek ve bu tez kapsamındaki yazılımda girdi olarak kullanmak mümkün olacaktır.

7.4.2 Görüntüleme odalarında bilgisayarlı tomografi cihazından yayılan x-ışınları için zırlama hesabı

X ışınları için zayıflatma (geçiş) faktörü;

$$k = \frac{P d^2}{W U T} \quad (7.26)$$

P, Tasarım dozu (mrem/hafta, R/hafta)

d, kaynak ile duvar mesafesi (m)

W, iş yükü (mA.dak/hafta, 1 m mesafedeki R/hafta)

U, kullanım faktörü,

T, meşguliyet faktörü

Bağıntısı ile verilmektedir.

Zırlama hesabı yapılacak yüzey için tasarım dozu, mesafe ve bitişik alana göre meşguliyet faktörü seçilerek geçiş faktörü hesaplanır [12].

Tomografi cihazlarında tüp voltajı 140 kVp' dir [11].

X-ışınları için tüp voltajına göre hesaplanan geçiş faktörüne karşılık gelen kurşun ve beton

zırh malzemesi kalınlığı grafiklerinden belirlenmektedir.

Örnek: SPECT cihazı ile entegre bilgisayarlı tomografi cihazının X-ışını tüpünden 3 m uzaklıkta, arkasında ofis alanında bulunan duvar için gerekli zırh kalınlığını bulunuz.

Gerekli parametreler için;

- W, 2000 mA.dakika/hafta (1 m mesafedeki haftalık R/dakika)
- P, 2 (mrem/hafta, R/hafta, [9])
- T, 1,
- U, 1,
- $d = 3,0 + 0,3 = 3,3$ m

alınmalıdır. Denklem 7.26'dan geçiş faktörü $1,1089 \times 10^{-2}$ bulunur.

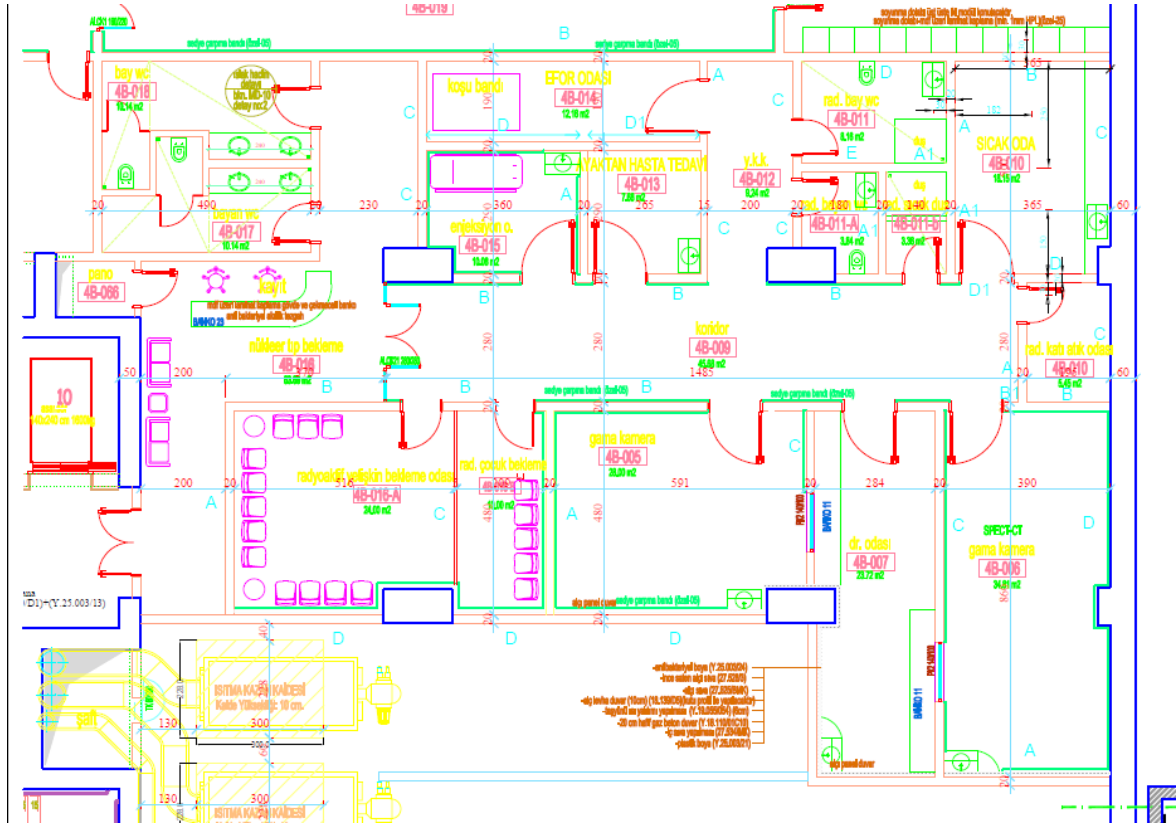
X-ışınları için tüp voltajına göre hesaplanan geçiş faktörüne karşılık gelen kurşun ve beton zırh malzemesi kalınlığı grafiklerinden den bu geçiş faktörüne karşılık gelen beton kalınlığı yaklaşık 8 cm ve kurşun kalınlığı yaklaşık 0,84mm olarak okunur [9].

8. NÜKLEER TIP ÜNİTELERİ ÖRNEK ZIRHLAMA HESAPLARI

8.1 SPECT Ünitesi Örnek Zırhlama Hesabı Yapılması

SPECT ünitelerinde kullanılan Tc-99 radyoizotopu üniteye jeneratör içerisinde gelmektedir. Sıcak odaya gelen jeneratörden sağım yapılan Tc-99 sıcak hücre içerisinde radyasyon görevlisi tarafından şırıngalara çekilerek hasta dozlarına ayrılmakta ve kalibrasyonu yapıldıktan sonra enjeksiyon odası içerisinde hastalara enjekte edilmektedir. Radyoaktif madde enjekte edilmiş hastalar radyoaktif hasta bekleme odası içerisinde bir süre bekletildikten sonra görüntüleme işlemi için görüntüleme odasına alınmaktadırlar. Görüntüleme işlemi tamamlanan hastalar üniteden ayrılmaktadırlar.

Şekil 8.1'de alan yerleşimi gösterilen SPECT ünitesine ait zırhlama hesabı hem matematiksel olarak elle hem de yazılım ile yapılmıştır.



Şekil 8.1 SPECT Ünitesi genel yerleşim planı

SPECT ünitelerinde zırhlama hesabı üniteye bulunan en yüksek enerjili radyoizotop olan Tc-99m'ye göre yapılmaktadır. Ünite içerisinde yüksek enerjili farklı bir radyoizotopun kullanıldığı alan var ise o alanda hesaplamalar o radyoizotopa göre yapılmalıdır.

Tc-99m Yarı Ömrü	6	saat
Tc-99m TVL Kurşun	0,1	cm
Tc-99m TVL Beton	6,6	cm
Tc-99m Γ (Gama sabiti)	0,019	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.sa}$

P Halk	20	$\mu\text{Sv/hafta}$
P Radyasyon Çalışanı	100	$\mu\text{Sv/hafta}$
U kullanma faktörü = 1		

W (İş yükü) = $\Gamma.A.t$

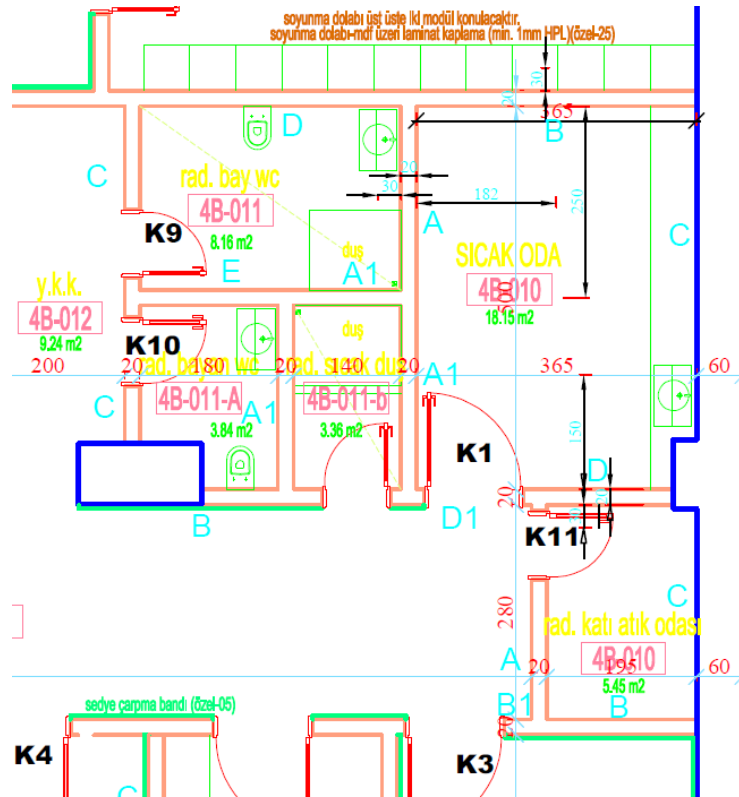
k (geçiş faktörü) = $P \cdot d^2 / W.T.U$

$\text{TVLn} = \log (1 / k)$

Zırh kalınlığı = $\text{TVLn} \times \text{TVL}$

8.1.1 Sıcak Oda Zırhlama Hesabı

Şekil 8.2’de sıcak oda, radyoaktif hasta tuvaleti ve radyoaktif katı atık odası için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği alan yerleşimi verilmiştir.



Şekil 8.2 Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Sıcak Oda, Radyoaktif Hasta Tuvaleti ve Radyoaktif Katı Atık Odası Alan Yerleşimi

Bu hesaplamada ünite sıcak odasında 1000 mCi aktiviteli Tc-99m jeneratörünün bulunduğu düşünülmektedir. Jeneratörden yapılan ilk sağımda jeneratör aktivitesine yakın aktivitede ürün elde edilmektedir.

A (Maksimum

Aktivite) 1000 mCi 37000 MBq

t (5 gün 2 saat) 10 saat/hafta

W (İş yükü) = $\Gamma.A.t$ 7030 ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)

Çizelge 8.1 SPECT Ünitesi Sıcak Oda Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı*	Radyoaktif hasta tuvaleti	100	2,3	0,05	7030	-0,02	-1,17
A1 Duvarı	Tuvalet / Acil Duş	100	2,2	0,05	7030	-0,01	-0,92
B Duvarı	Personel Dinlenme Odası	20	3	0,2	7030	0,09	5,89
C Duvarı	Toprak						
D Duvarı**	Radyoaktif Atık Odası	100	2	0,025	7030	-0,04	-2,36
D1 Duvarı	Koridor	20	2	0,2	7030	0,12	8,22
Kapı K1	Koridor	20	2	0,125	7030	0,10	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	7030	0,13	8,86
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	7030	0,01	0,72

*A duvarı zırhlama hesabı radyoaktif hasta tuvaleti tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**D duvarı zırhlama hesabı radyoaktif katı atık odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi sıcak oda yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.3' de verilmiştir.

NUKLEER TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT UNİTESİ Gama Sabiti : 0,019 Aktivite(mCi) : 1000 Tasarım Dozu : 1

Oda Tipi : SICAK ODA TVL Beton : 6,6 Zaman : 10 Azaltma Faktörü : 1

Radyoizotopi Cinsi : Tc-99m TVL Kuruşun : 0,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kuruşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kuruşun Kalınlığı
A Duvar	Radyoaktif hasta tuvaleti	2,30	100	0,05	7,030,00	-0,02	0,00	-1,17	+
A1 Duvar	Tuvalet	2,20	100	0,05	7,030,00	-0,01	0,00	-0,92	+
B Duvar	Personel dinlenme odası	3,00	20	0,2	7,030,00	0,09	0,00	5,89	0,09 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Toprak	0,00	20	0,025	7,030,00	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Radyoaktif atık odası	2,00	100	0,025	7,030,00	-0,04	0,00	-2,36	+
D1 Duvar	Koridor	2,00	20	0,2	7,030,00	0,12	0,00	8,22	0,12 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K1	Kontrollü alandaki korid...	2,00	20	0,125	7,030,00	0,10	0,00	6,87	0,1 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	7,030,00	0,13	0,00	8,86	0,13 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Otopark	3,70	20	0,05	7,030,00	0,01	0,00	0,72	0,01 Kadar ekleme yapılmalı

Şekil 8.3 SPECT Ünitesi Sıcak Oda Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.2 Radyoaktif Katı Atık Odası Zırhlama Hesabı

A (Maksimum Aktivite)	50	mCi	1850	MBq
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t$	1406	($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)		

Çizelge 8.2 SPECT Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Koridor	20	0,8	0,2	1406	0,13	8,86
B Duvarı*	SPECT-CT Görüntüleme Odası	20	0,8	1	1406	0,20	13,47
C Duvarı	Toprak						
D Duvarı**	Sıcak Oda	100	0,8	0,2	1406	0,06	4,24
Kapı K11	Koridor	20	0,8	0,125	1406	0,11	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	1406	0,06	4,24
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	1406	-0,06	-3,90

*B duvarı zırhlama hesabı SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**D duvarı zırhlama hesabı Sıcak Oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi radyoaktif katı atık odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.4'de verilmiştir.

NÜKLEER TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT UNİTESİ Gama Sabiti : 0,019 Aktivite(mCi) : 50 Tasarım Dozu : 1
Oda Tipi : RADYOAKTİF ATIK ODASI TVL Beton : 6,6 Zaman : 40 Azaltma Faktörü : 1
Radıyoizotopi Cinsi : Tc-99m TVL Kırınım : 0,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yüğü	Hesaplanan Kırınım	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kırınım Kalınlığı
A Duvar	Koridor	0,80	20	0,2	1.406,00	0,13	0,00	8,86	0,13 Kadar eklemeli yapılmalı
B Duvar	Nükleer Tip görüntülem...	0,80	20	1	1.406,00	0,20	0,00	13,47	0,2 Kadar eklemeli yapılmalı
C Duvar	Toprak	0,00	20	0,025	1.406,00	=	0,00	=	NaN Kadar eklemeli yapılmalı
D Duvar	Sıcak oda	0,80	100	0,2	1.406,00	0,06	0,00	4,24	0,06 Kadar eklemeli yapılmalı
Kapı K11	Koridor	0,80	20	0,2	1.406,00	0,11	0,00	7,51	0,11 Kadar eklemeli yapılmalı
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	1.406,00	0,06	0,00	4,24	0,06 Kadar eklemeli yapılmalı
Tavan	Otopark	3,70	20	0,05	1.406,00	-0,06	0,00	-3,90	+

Şekil 8.4 Radyoaktif Katı Atık Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.3 Radyoaktif Hasta Tuvaleti Zırhlama Hesabı

Nükleer tıp ünitelerinde radyoaktif hasta tuvaleti zırhlama hesabı yapılırken tuvaletin dış duvarları için zırhlama hesabı yapılır, tuvalet içerisinde yer alan bölme duvarlar için zırhlama hesabı yapılmaz. Bu duvarlar oda içerisinde değerlendirilir.

$$A \text{ (Maksimum Aktivite)} = 30 \text{ mCi} = 1110 \text{ MBq}$$

$$t \text{ (5 gün 3 saat)} = 15 \text{ saat/hafta}$$

$$W \text{ (İş yükü)} = \Gamma \cdot A \cdot t = 316 \text{ (}\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\text{/hafta)}$$

Çizelge 8.3 SPECT Ünitesi Radyoaktif Hasta Tuvaleti Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\text{/hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı*	Sıcak Oda	100	1	0,2	316	-0,02	-1,31
A1 Duvarı	Tuvalet / Acil Duş	20	1	0,05	316	-0,01	-0,67
B Duvarı	Koridor	20	0,8	0,2	316	0,07	4,58
C Duvarı	Koridor	20	1,7	0,2	316	0,00	0,26
D Duvarı	Personel dinlenme odası	20	0,8	0,2	316	0,07	4,58
E Duvarı	Oda içerisinde değerlendirilmiştir.						
Kapı K9	Koridor	20	1,7	0,125	316	-0,02	
Kapı K10	Koridor	20	1,7	0,125	316	-0,02	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	316	0,00	-0,03
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	316	-0,12	-8,17

*A duvarı zırhlama hesabı Sıcak Oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırhlama kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

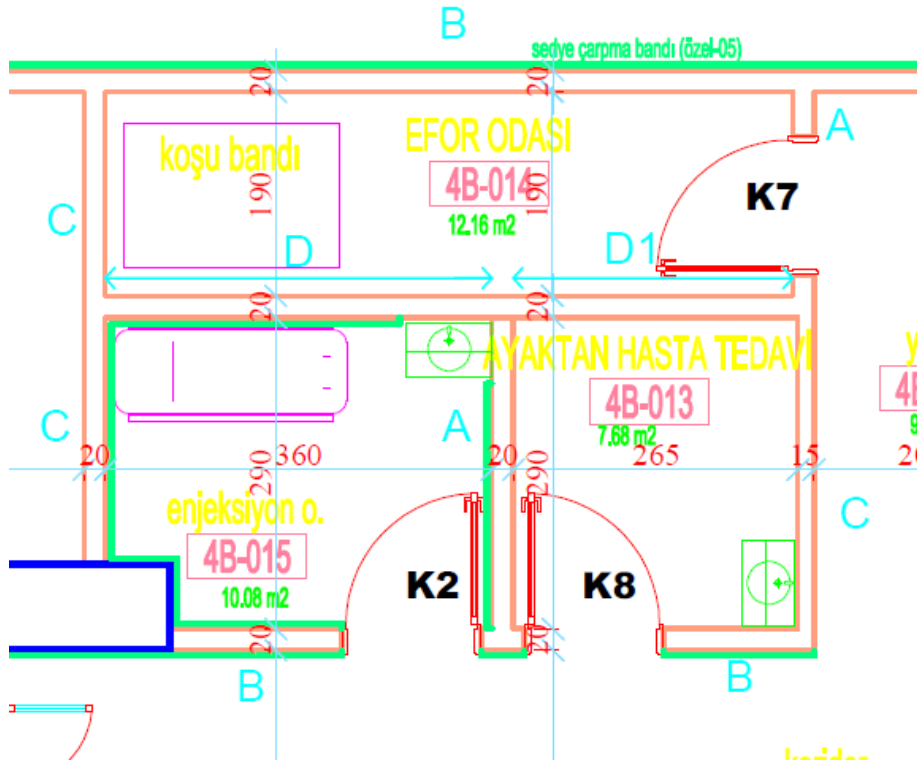
SPECT ünitesi radyoaktif hasta tuvaleti yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.5’de verilmiştir.

NÜKLEER TIP										
Ünite :	SPECT/SPECT-CT ÜNİTESİ	Gama Sabiti :	0,019	Aktivite(mCi) :	30	Tasarru Dozu :	1			
Oda Tipi :	RADYOAKTİF HASTA WC	TVL Beton :	6,6	Zaman :	15	Azaltma Faktörü :	1			
Radyoizotopi Cinsi :	Tc-99m	TVL Kuruşun :	0,1	Hesapla						
Yan Duvar Bilgiler										
Açıklama	Btığk Alan	d mesafe (m)	P	T	Iğ Yüğü	Hesaplanan Kuruşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kuruşun Kalınlığı	
A Duvar	Sıcak oda	1,00	100	0,2	316,35	-0,02	0,00	-1,31	+	
A1 Duvar	Tuvalet	1,00	20	0,05	316,35	-0,01	0,00	-0,67	+	
B Duvar	Koridor	0,80	20	0,2	316,35	0,07	0,00	4,58	0,07 Kadar ekleme yapılmalı	
C Duvar	Koridor	1,70	20	0,2	316,35	0,00	0,00	0,26	+	
D Duvar	Personel dinlenme odası	0,80	20	0,2	316,35	0,07	0,00	4,58	0,07 Kadar ekleme yapılmalı	
E Duvar	Radyoaktif hasta tuvaleti	0,00	100	0,05	316,35	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı	
Kapı K9	Kontrolü alandaki kord...	1,70	20	0,125	316,35	-0,02	0,00	-1,09	+	
Kapı K10	Kontrolü alandaki kord...	1,70	20	0,125	316,35	-0,02	0,00	-1,09	+	
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	316,35	0,00	0,00	-0,03	+	
Tavan	Otopark	3,70	20	0,05	316,35	-0,12	0,00	-8,17	+	

Şekil 8.5 Radyoaktif Hasta Tuvaleti Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.4 Enjeksiyon Odası Zırhlama Hesabı

Şekil 8.6’da enjeksiyon odası, efor odası ve ayakta hasta tedavi odası için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği alan yerleşimi verilmiştir.



Şekil 8.6 Harflendirilen Ve Mesafelerin Gösterildiği Efor Odası, Enjeksiyon Odası ve Ayaktan Hasta Tedavi Odası Alan Yerleşimi

Ünite içerisinde enjeksiyon odasında tek bir hastaya maksimum 30 mCi aktiviteli Tc-99 enjekte edilmektedir.

A (Maksimum Aktivite)	30	mCi	1110	MBq
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t$	844	($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)		

Çizelge 8.4 SPECT Ünitesi Enjeksiyon Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı*	Ayaktan Hasta Tedavi Odası	100	2	0,5	844	0,00	0,15
B Duvarı	Koridor	20	1	0,2	844	0,09	6,11
C Duvarı	Koridor	20	1	0,2	844	0,09	6,11
D Duvarı**	Efor Odası	100	1	0,5	844	0,06	4,13
Kapı K2	Koridor	20	1	0,125	844	0,07	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	844	0,04	2,78
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	844	-0,08	-5,36

*A duvarı zırhlama hesabı ayaktan hasta tedavi odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**D duvarı zırhlama hesabı efor odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi enjeksiyon odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.7'de verilmiştir.

NUKLEER.TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT UNİTESİ Gama Sabiti : 0,019 Aktivite(Ci) : 30 Tasarım Dozu : 1

Oda Tipi : ENJEKSİYON ODASI TVL Beton : 6,6 Zaman : 40 Azaltma Faktörü : 1

Radyoizotopi Cinsi : Tc-99m TVL Kursun : 0,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kırınım	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kırınım Kalınlığı
A Duvarı	Teknik oda	2,00	100	0,5	843,60	0,00	0,00	0,15	+
B Duvarı	Koridor	1,00	20	0,2	843,60	0,09	0,00	6,11	0,09 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvarı	Koridor	1,00	20	0,2	843,60	0,09	0,00	6,11	0,09 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvarı	Efor odası	1,00	100	0,5	843,60	0,06	0,00	4,13	0,06 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K2	Kontrolü alandaki korid...	1,00	20	0,125	843,60	0,07	0,00	4,77	0,07 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	843,60	0,04	0,00	2,78	0,04 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Otopark	3,70	20	0,05	843,60	-0,08	0,00	-5,36	+

Şekil 8.7 SPECT Ünitesi Enjeksiyon Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.5 Efor Odası Zırhlama Hesabı

Ünite içerisinde efor odasında tek bir hastaya efor testi öncesinde veya efor testi esnasında maksimum 30 mCi aktiviteli Tc-99 enjekte edilmektedir.

A (Maksimum Aktivite)	30	mCi	1110	MBq
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma.A.t$	844	($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)		

Çizelge 8.5 SPECT Ünitesi Efor Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Koridor	20	3	0,2	844	0,00	-0,19
B Duvarı	Koridor	20	1	0,2	844	0,09	6,11
C Duvarı	Koridor	20	1	0,2	844	0,09	6,11
D Duvarı*	SPECT Enjeksiyon Odası	100	1	0,5	844	0,06	4,13
D1 Duvarı**	Ayaktan Hasta Tedavi Odası	100	1,5	0,5	844	0,03	1,80
Kapı K7	Nükleer Tıp Koridor	20	3	0,125	844	-0,02	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	844	0,04	2,78
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	844	-0,08	-5,36

*D duvarı zırhlama hesabı enjeksiyon odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**D1 duvarı zırhlama hesabı ayaktan hasta tedavi odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi Efor Odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.8'de verilmiştir.

NUKLEER TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT ÜNİTESİ Gama Sabiti : 0,019 Aktivite(mCi) : 30 Tasarım Dozu : 1

Oda Tipi : EFOR ODASI TVL Beton : 6,6 Zaman : 40 Azaltma Faktörü : 1

Radionüklid Cinsi : Tc-99m TVL Kuruşun : 0,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yüğü	Hesaplanan Kuruşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kuruşun Kalınlığı
A Duvar	Koridor	3,00	20	0,2	843,60	0,00	0,00	-0,19	+
B Duvar	Koridor	1,00	20	0,2	843,60	0,09	0,00	6,11	0,09 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Koridor	1,00	20	0,2	843,60	0,09	0,00	6,11	0,09 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	SPECT enjeksiyon odası	1,00	100	0,5	843,60	0,06	0,00	4,13	0,06 Kadar ekleme yapılmalı
D1 Duvar	Muayene odası	1,50	100	0,5	843,60	0,03	0,00	1,80	0,03 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K7	Kontrolü alandaki korid...	3,00	20	0,125	843,60	-0,02	0,00	-1,53	+
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	843,60	0,04	0,00	2,78	0,04 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Otopark	3,70	20	0,05	843,60	-0,08	0,00	-5,36	+

Şekil 8.8 SPECT Ünitesi Efor Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.6 Ayaktan Hasta Tedavi Odası Zırhlama Hesabı

Ayaktan tedavi odası zırhlama hesabında kullanılması planlanan en yüksek enerjili radyoizotopa göre hesap yapılmalıdır. Bu ünite 20 mCi I-131'e göre hesap yapılmıştır.

I-131

Yarı Ömrü	8	gün		
TVL Kurşun	1,1	cm		
TVL Beton	18	cm		
Γ (Gama sabiti)	0,059	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.sa}$		
A (Maksimum Aktivite) - 5 hastaya göre	20	mCi	740	MBq
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma.A.t$	1746	$(\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta})$		

Çizelge 8.6 SPECT Ünitesi Ayaktan Hasta Tedavi Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı*	Enjeksiyon Odası	100	1,6	0,5	1746	0,59	9,59
B Duvarı	Koridor	20	2,1	0,2	1746	0,66	10,76
C Duvarı	Koridor	20	1,6	0,2	1746	0,92	15,01
D1 Duvarı**	Efor Odası	100	2,1	0,5	1746	0,33	5,34
Kapı K8	Koridor	20	2,1	0,12 5	1746	0,43	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	1746	0,81	13,27
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	1746	-0,55	-8,93

*A duvarı zırhlama hesabı enjeksiyon odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**D1 duvarı zırhlama hesabı efor odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi ayakta tedavi odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.9'da verilmiştir.

NÜKLEER TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT UNİTESİ Gama Sabiti : 0,059 Aktivite(mCi) : 20 Tasarım Dozu : 1
Oda Tipi : AYAKTA TEDAVİ ODASI TVL Beton : 18 Zaman : 40 Azaltma Faktörü : 1
Radyoizotopi Cinsi : I-131 TVL Kırınım : 1,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgileri

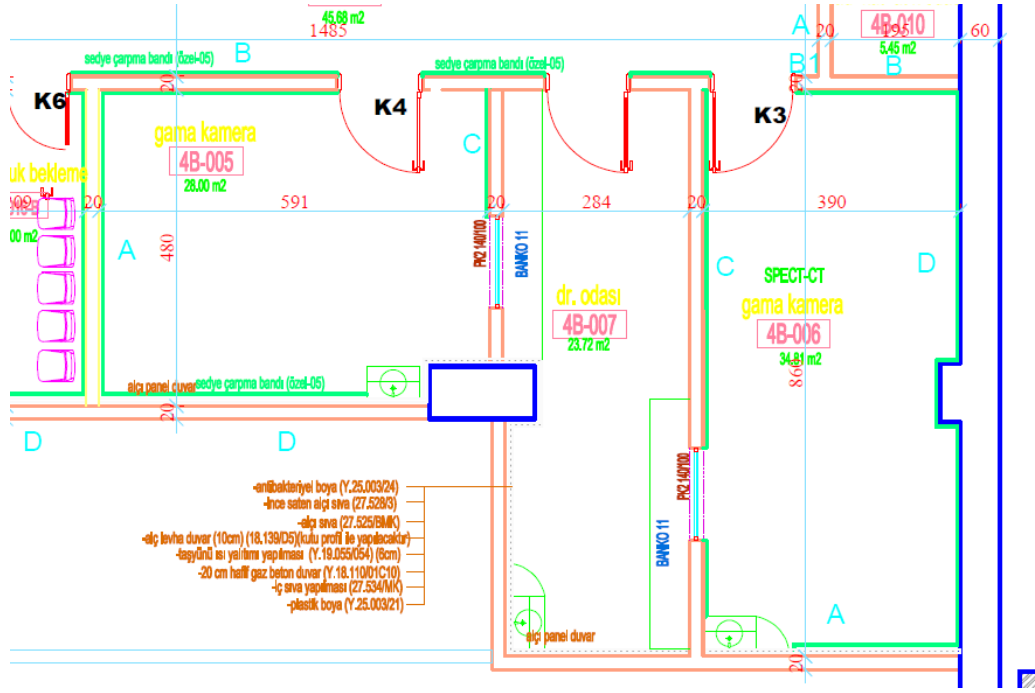
Açıklama	Büyük Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yüğü	Hesaplanan Kırınım	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kırınım Kalınlığı
A Duvar	SPECT enjeksiyon odası	1,60	100	0,5	1.746,40	0,59	0,00	9,59	0,59 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Koridor	2,10	20	0,2	1.746,40	0,66	0,00	10,76	0,66 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Koridor	1,60	20	0,2	1.746,40	0,92	0,00	15,01	0,92 Kadar ekleme yapılmalı
D1 Duvar	Efor odası	2,10	100	0,5	1.746,40	0,33	0,00	5,34	0,33 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı KB	Kontrolü alandaki korid...	2,10	20	0,125	1.746,40	0,43	0,00	7,08	0,43 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	1.746,40	0,81	0,00	13,27	0,81 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Otopark	3,70	20	0,05	1.746,40	-0,55	0,00	-8,93	+

Şekil 8.9 SPECT Ünitesi Ayakta Tedavi Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.7 Görüntüleme Odaları Zırhlama Hesabı

Şekil 10'da görüntüleme odaları için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği alan yerleşimi verilmiştir. Ünite içerisinde iki adet görüntüleme cihazı vardır. Bunlardan bir tanesi bilgisayarlı tomografi cihazı ile entegre edilmiş hibrit bir görüntüleme cihazıdır. Hibrit görüntüleme cihazı için zırhlama hesabı radyofarmasötik verilmiş hasta ile birlikte aynı zamanda tomografi cihazından kaynaklanan x-ışınları da düşünülerek yapılmalıdır.

Ünite içerisinde görüntüleme odalarında maksimum 30 mCi aktiviteli Tc-99 enjekte edilmiş tek bir hastanın görüntüleme işlemi yapılmaktadır.



Şekil 8.10 Harflendirilen Ve Mesafelerin Gösterildiği Görüntüleme Odaları Alan Yerleşimi

A (Maksimum Aktivite)	30	mCi	1110	MBq
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma.A.t$	844	($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)		

Çizelge 8.7 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Toprak						
B Duvarı*	Radyoaktif Atık Odası	100	3	0,025	844	-0,16	-10,76
B1 Duvarı	Koridor	20	3	0,2	844	0,00	-0,19
C Duvarı	Kontrol Odası	100	1,5	1	844	0,06	3,79
D Duvarı	Otopark	20	2	0,05	844	-0,03	-1,83
Kapı K3	Koridor	20	3	0,125	844	-0,02	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	844	0,04	2,78
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	844	-0,08	-5,36

*B duvarı zırhlama hesabı radyoaktif katı atık odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT-CT hibrit görüntüleme odasının bilgisayarlı tomografi cihazından kaynaklanan x-

ışınları için yapılmış zırhlama hesabı Çizelge 8.8' de verilmiştir.

Çizelge 8.8 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Toprak					
B Duvarı	Rad. Katı Atık Odası	100	3	0,025	0,04	5,00
B1 Duvarı	Koridor	20	3	0,2	0,17	15,00
C Duvarı	Kumanda Ünitesi	100	1,5	1	0,22	19,00
D Duvarı	Otopark	20	2	0,05	0,15	14,00
Kapı K3	Nükleer Tıp Koridor	20	3	0,125	0,15	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	0,20	18,00
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	0,10	10,00

SPECT-CT Hibrit Görüntüleme odası için x-ışınlarından kaynaklanan ve radyofarmasötik verilmiş hastanın bulunmasından kaynaklı zırhlama hesapları karşılaştırıldığında x-ışınından kaynaklı zırhlama kalınlığının daha yüksek olduğu Çizelge 8.9'da görülmektedir. Bu durumda esas alınması gereken zırhlama kalınlığı x-ışını için bulunan değer olmalıdır.

Çizelge 8.9 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını kaynaklı ve radyofarmasötik verilmiş hasta kaynaklı Zırhlama Hesabı karşılaştırması

Parametreler					Radyoaktif Hasta kaynaklı		X-ışını kaynaklı		Dikkate alınması gereken	
Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	Pb (cm)	Beton (cm)	Pb (cm)	Beton (cm)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Toprak									
B Duvarı*	Rad. Katı Atık Odası	100	3	0,025	-0,16	-10,76	0,04	5,00	0,04	5,00
B1 Duvarı	Koridor	20	3	0,2	0,00	-0,19	0,17	15,00	0,17	15,00
C Duvarı	Kontrol Odası	100	1,5	1	0,06	3,79	0,22	19,00	0,22	19,00
D Duvarı	Otopark	20	2	0,05	-0,03	-1,83	0,15	14,00	0,15	14,00
Kapı K3	Koridor	20	3	0,125	-0,02		0,15		0,15	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	0,04	2,78	0,20	18,00	0,20	18,00
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	-0,08	-5,36	0,10	10,00	0,10	10,00

*B duvarı zırhlama hesabı radyoaktif katı atık odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi görüntüleme odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.11’de verilmiştir.

NÜKLEER TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT ÜNİTESİ Gama Sabiti : 0,019 Aktivite(mCi) : 30 Tasarım Dozu : 1
Oda Tipi : GÖRÜNTÜLEME ODASI TVL Beton : 6,6 Zaman : 40 Azaltma Faktörü : 1
Radilyozotopi Cinsi : Tc-99m TVL Kuruşun : 0,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgileri

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kuruşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kuruşun Kalınlığı
A Duvar	Toprak	0,00	20	0,025	843,60	=	0,00	=	NaN Kadar eklemeye yapılmalı
B Duvar	Radyoaktif atık odası	3,00	100	0,025	843,60	-0,16	0,00	-10,76	+
B1 Duvar	Koridor	3,00	20	0,2	843,60	0,00	0,00	-0,19	+
C Duvar	Kumanda ünitesi	1,50	100	1	843,60	0,06	0,00	3,79	0,06 Kadar eklemeye yapılmalı
D Duvar	Otopark	2,00	20	0,05	843,60	-0,03	0,00	-1,83	+
Kapı K3	Kontrolü alandaki korid...	3,00	20	0,125	843,60	-0,02	0,00	-1,53	+
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	843,60	0,04	0,00	2,78	0,04 Kadar eklemeye yapılmalı
Taban	Otopark	3,70	20	0,05	843,60	-0,08	0,00	-5,36	+

Şekil 8.11 SPECT Ünitesi SPECT-CT Hibrit Görüntüleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

Çizelge 8.10 SPECT Ünitesi SPECT Görüntüleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı*	Rad. Çocuk Hasta Bekleme	100	1	0,2	844	0,02	1,50
B Duvarı	Koridor	20	1,5	0,2	844	0,06	3,79
C Duvarı	Kumanda Ünitesi	100	1,5	1	844	0,06	3,79
D Duvarı	Otopark	20	1,5	0,05	844	0,00	-0,19
Kapı K4	Nükleer Tıp Koridor	20	1,5	0,125	844	0,04	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	844	0,04	2,78
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	844	-0,08	-5,36

*A duvarı zırhlama hesabı radyoaktif çocuk hasta bekleme odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi SPECT görüntüleme odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.12’de verilmiştir.

NÜKLEER TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT UNİTESİ Gama Sabiti : 0,019 Aktivite(mCi) : 30 Tasarım Dozu : 1
 Oda Tipi : GÖRÜNTÜLEME ODASI TVL Beton : 6,6 Zaman : 40 Azaltma Faktörü : 1
 Radyoizotopi Cinsi : Tc-99m TVL Kırınım : 0,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgileri

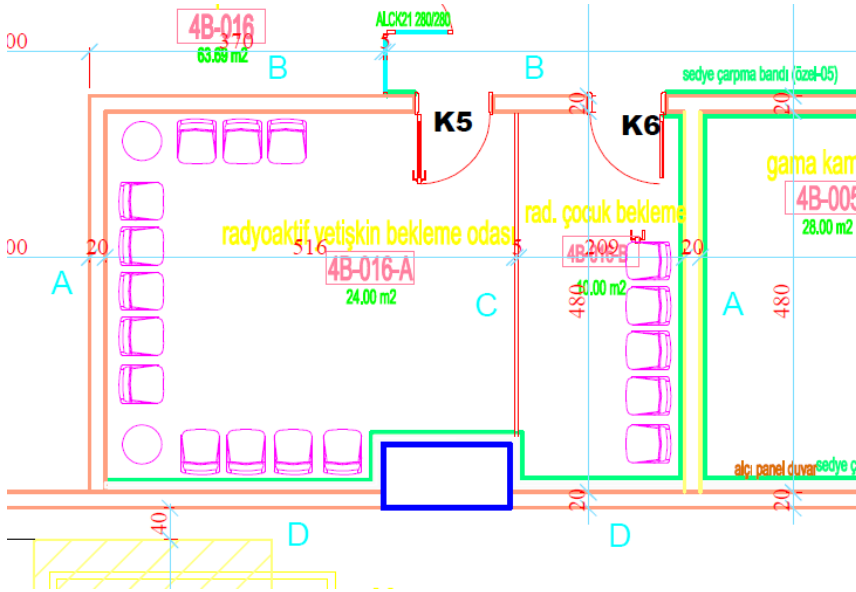
Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yüklü	Hesaplanan Kırınım	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kırınım Kalınlığı
A Duvar	Radyoaktif hasta bekle...	1,00	100	0,2	843,60	0,02	0,00	1,50	0,02 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Koridor	1,50	20	0,2	843,60	0,06	0,00	3,79	0,06 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Kumanda ünitesi	1,50	100	1	843,60	0,06	0,00	3,79	0,06 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Otopark	1,50	20	0,05	843,60	0,00	0,00	-0,19	+
Kapı K4	Kontrolü alandaki korid...	1,50	20	0,125	843,60	0,04	0,00	2,44	0,04 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	843,60	0,04	0,00	2,78	0,04 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Otopark	3,70	20	0,05	843,60	-0,08	0,00	-5,36	+

Şekil 8.12 SPECT Ünitesi SPECT Görüntüleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.8 Radyoaktif Yetişkin Hasta Bekleme Odası Zırhlama Hesabı

Ünite içerisinde bekleme odalarında maksimum 30 mCi aktiviteli Tc-99 enjekte edilmiş birden fazla hasta bekletilebilmektedir. Oda içerisinde bulunacak maksimum aktivite bekletilmesi planlanan maksimum hasta sayısı ile maksimum hasta dozu olan 30 mCi'nin çarpılması ile bulunur.

Şekil 8.13'de radyoaktif yetişkin ve radyoaktif çocuk hasta bekleme odaları için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği alan yerleşimi verilmiştir.



Şekil 8.13 Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Radyoaktif Hasta Bekleme Odaları Alan Yerleşimi

A (Maksimum Aktivite) - 12 hastaya

360 mCi 13320 Mbq

göre

t (5 gün 8 saat)

40 saat/hafta

W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t$

10123 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)

Çizelge 8.11 SPECT Ünitesi Radyoaktif Yetişkin Hasta Bekleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Koridor	20	0,8	0,2	10123	0,22	14,51
B Duvarı	Koridor	20	0,8	0,2	10123	0,22	14,51
C Duvarı*	Rad. Çocuk Hasta Bekleme	100	0,8	1	10123	0,22	14,51
D Duvarı	Otopark	20	0,8	0,05	10123	0,16	10,54
Kapı K5	Koridor	20	0,8	0,125	10123	0,20	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	10123	0,15	9,90
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	10123	0,03	1,76

*C duvarı zırhlama hesabı radyoaktif çocuk hasta bekleme odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

SPECT ünitesi radyoaktif yetişkin hasta bekleme odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.14’de verilmiştir.

NÜKLEER TIP

Ünite : SPECT/SPECT-CT ÜNİTESİ Gama Sabiti : 0,019 Aktivite(mCi) : 360 Tasarım Dozu : 1

Oda Tipi : RADYOAKTİF YETİŞKİN HASTA BEKLEME TVL Beton : 6,6 Zaman : 40 Azalma Faktörü : 1

Radyoizotopi Cinsi : Tc-99m TVL Kursun : 0,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kurgun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurgun Kalınlığı
A Duvar	Koridor	0,80	20	0,2	10.123,20	0,22	0,00	14,51	0,22 Kadar eklemeye yapılmalı
B Duvar	Koridor	0,80	20	0,2	10.123,20	0,22	0,00	14,51	0,22 Kadar eklemeye yapılmalı
C Duvar	Radyoaktif hasta bekle...	0,80	100	1	10.123,20	0,22	0,00	14,51	0,22 Kadar eklemeye yapılmalı
D Duvar	Otopark	0,80	20	0,05	10.123,20	0,16	0,00	10,54	0,16 Kadar eklemeye yapılmalı
Kapı K5	Kontrolü alandaki kond...	0,80	20	0,125	10.123,20	0,20	0,00	13,17	0,2 Kadar eklemeye yapılmalı
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	10.123,20	0,15	0,00	9,90	0,15 Kadar eklemeye yapılmalı
Taban	Otopark	3,70	20	0,05	10.123,20	0,03	0,00	1,76	0,03 Kadar eklemeye yapılmalı

Şekil 8.14 SPECT Ünitesi Radyoaktif Yetişkin Hasta Bekleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.1.9 Radyoaktif Çocuk Hasta Bekleme Odası Zırhlama Hesabı

A (Maksimum Aktivite) - 5 hastaya göre	50 mCi	1850 MBq
t (5 gün 8 saat)	40 saat/hafta	
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t$	1406 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)	

Çizelge 8.12 SPECT Ünitesi Radyoaktif Çocuk Hasta Bekleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı*	SPECT Görüntüleme Odası	20	0,8	1	1406	0,20	13,47
B Duvarı	Koridor	20	0,8	0,2	1406	0,13	8,86
C Duvarı**	Rad. Yetişkin Hasta Bekleme	100	0,8	1	1406	0,13	8,86
D Duvarı	Otopark	20	0,8	0,05	1406	0,07	4,88
Kapı K6	Koridor	20	0,8	0,125	1406	0,11	
Tavan	Ameliyathane	20	4	1	1406	0,06	4,24
Taban	Otopark	20	3,7	0,05	1406	-0,06	-3,90

*A duvarı zırhlama hesabı SPECT görüntüleme odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**C duvarı zırhlama hesabı radyoaktif yetişkin hasta bekleme odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

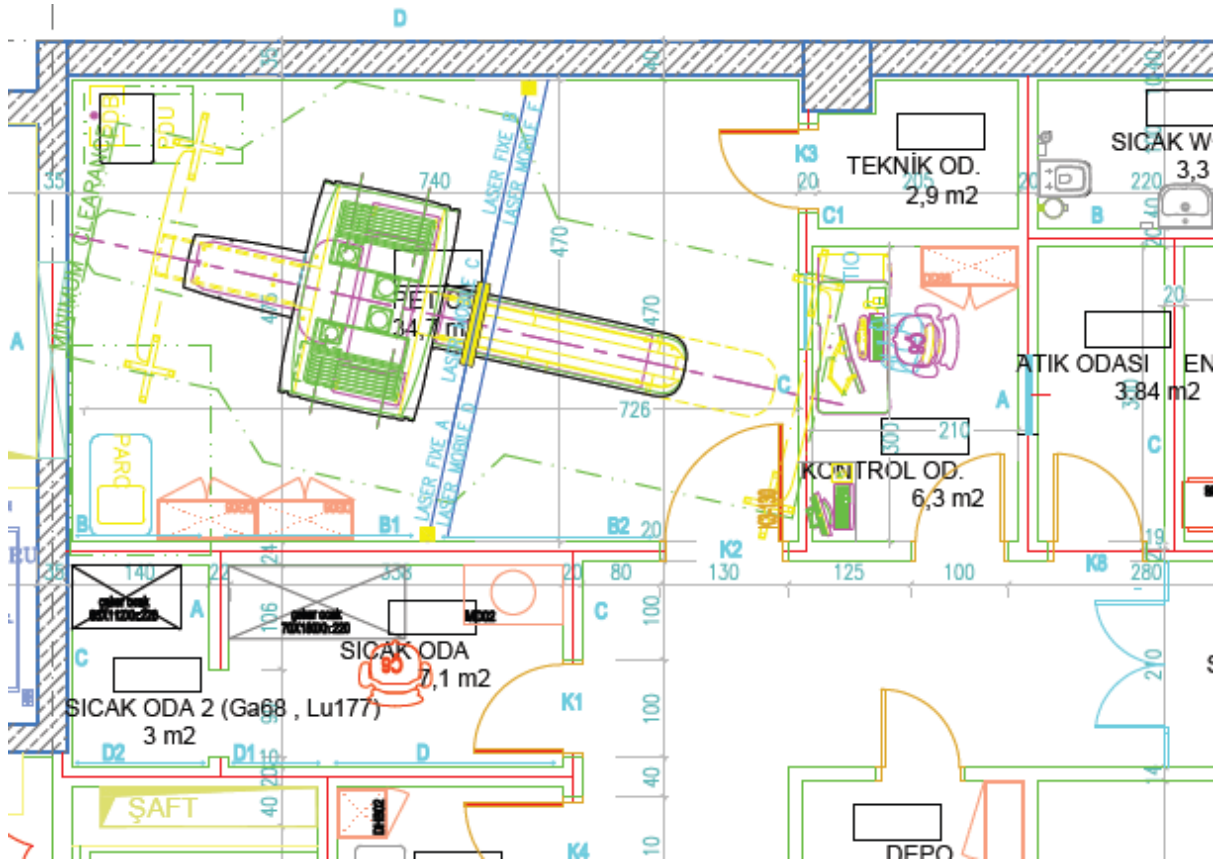
SPECT ünitesi radyoaktif çocuk hasta bekleme odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.15’de verilmiştir.

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kurgun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurgun Kalınlığı
A Duvar	Nükleer Tip görüntülem...	0,80	20	1	1.406,00	0,20	0,00	13,47	0,2 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Koridor	0,80	20	0,2	1.406,00	0,13	0,00	8,86	0,13 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Radyoaktif hasta bekle...	0,80	100	1	1.406,00	0,13	0,00	8,86	0,13 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Otopark	0,80	20	0,05	1.406,00	0,07	0,00	4,88	0,07 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K6	Kontrolü alandaki korid...	0,80	20	0,125	1.406,00	0,11	0,00	7,51	0,11 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Ameliyathane	4,00	20	1	1.406,00	0,06	0,00	4,24	0,06 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Otopark	3,70	20	0,05	1.406,00	-0,06	0,00	-3,90	+

Şekil 8.15 SPECT Ünitesi Radyoaktif Çocuk Hasta Bekleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

içerisinde F-18 ile birlikte 30 mCi aktiviteli Ga-68 jeneratörü için de sıcak oda planlanmıştır. Ga-68'in PET ünitelerinde uygulama yöntemi ve hastaya verilen dozu benzerdir. Zırhlama parametreleri benzerlik gösterse de Ga-68 Sıcak Odasında bulunabilecek maksimum aktivite F-18'den daha yüksektir

Şekil 8.17'de F-18 Sıcak Oda, Ga-68 Sıcak Oda, Görüntüleme Odası ve radyoaktif katı atık odası için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği alan yerleşimi verilmiştir.



Şekil 8.17 F-18 Sıcak Oda, Ga-68 Sıcak Oda , Görüntüleme Odası ve Radyoaktif Katı Atık Odası İçin Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi

F-18 Yarı Ömrü	109,8	dakika
F-18 TVL Kurşun	1,66	cm
F-18 TVL Beton	17,6	cm
F-18 Γ (Gama sabiti)	0,143	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.sa}$
Ga-68 Yarı Ömrü	109,8	dakika
Ga-68 TVL Kurşun	1,66	cm
Ga-68 TVL Beton	17,6	cm

Ga-68 Γ (Gama sabiti)	0,145	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.sa}$
P Halk	20	$\mu\text{Sv/hafta}$
P Radyasyon Çalışanı	100	$\mu\text{Sv/hafta}$
U kullanma faktörü = 1		

$$W (\text{İş yükü}) = \Gamma .A.t.SF.DAF.BF.VAF$$

bağıntısında bulunmaktadır. F-18'in yarı ömrünün kısa olması nedeni ile zırhlama hesaplamaları yapılırken azaltma faktörlerini kullanmak bulunan zırh kalınlıklarını önemli ölçüde etkilemektedir. Zırhlama maliyeti yüksek bir işlem olabilmektedir. Bu sebeple korumacı yaklaşımla hesaplar yapılırken, azaltma faktörleri de göz önünde bulundurulmaktadır. Azaltma faktörlerinin hesaplara nasıl dâhil edildiği örnek hesaplamada gösterilmiştir.

8.2.1 F-18 Sıcak Oda Zırhlama Hesabı

F-18 sıcak odasında maksimum aktivite sıcak hücre içerisinden alınan bir hasta dozu 15 mCi aktivite esas alınmaktadır.

A (Maksimum Aktivite)	20	mCi	740	MBq
t (5 gün 2 saat)	10	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma.A.t$	1058	$(\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta})$		

Çizelge 8.13 PET Ünitesi Sıcak Oda Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı*	Ga-68 Sıcak Oda	100	1,4	0,2	1058	0,06	0,59
B1 Duvarı**	PET Görüntüleme Odası	20	1,2	1	1058	2,60	27,55
C Duvarı	Nükleer Tıp Koridoru	20	2,4	0,2	1058	0,44	4,65
D Duvarı***	Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I	100	1,3	0,5	1058	0,82	8,72
D1 Duvarı	Çamaşırhane	20	1,3	0,05	1058	0,32	3,43
Kapı K1	Nükleer Tıp Koridoru	20	2,4	0,125	1058	0,10	
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	1058	0,97	10,33
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	1058	-0,68	-7,17

*A duvarı zırhlama hesabı Ga-68 sıcak oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**B1 duvarı zırhlama hesabı PET görüntüleme odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

***D duvarı zırhlama hesabı Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

PET ünitesi F-18 sıcak odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.18'de verilmiştir.

NÜKLEER TIP

Ünite : PET/PET-CT ÜNİTESİ Gama Sabiti : 0,143 Aktivite(mCi) : 20 Tasarım Dozu : 1
 Oda Tipi : F-18 SICAK ODA TVL Beton : 17,6 Zaman : 10 Azaltma Faktörü : 1
 Radyoizotopi Cinsi : F-18 TVL Kurşun : 1,66 Hesapla

Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yüğü	Hesaplanan Kurşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurşun Kalınlığı
A Duvar	Sıcak oda	1,40	100	0,2	1.058,20	0,06	0,00	0,59	0,06 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Nükleer Tip görüntülem...	1,20	20	1	1.058,20	2,60	0,00	27,55	2,6 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Koridor	2,40	20	0,2	1.058,20	0,44	0,00	4,65	0,44 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Radyoaktif hasta bekle...	1,30	100	0,5	1.058,20	0,82	0,00	8,72	0,82 Kadar ekleme yapılmalı
D1 Duvar	Çamaşhanesi	1,30	20	0,05	1.058,20	0,32	0,00	3,43	0,32 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K1	Kontrolü alandaki korid...	2,40	20	0,125	1.058,20	0,10	0,00	1,06	0,1 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Yoğun bakım ünitesi	3,70	20	1	1.058,20	0,97	0,00	10,33	0,97 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Teknik oda	2,60	20	0,05	1.058,20	-0,68	0,00	-7,17	+

Şekil 8.18 PET Ünitesi F-18 Sıcak Oda Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.2.2 Ga-68 Sıcak Oda Zırhlama Hesabı

Ga-68 sıcak odasında bulunması muhtemel maksimum aktivite jeneratörden sağılan maksimum aktivite miktarı kadardır.

Hesaplamalar Ga-68'e göre yapılmıştır.

Yarı Ömrü	109,8	dakika
TVL Kurşun	1,66	cm
TVL Beton	17,6	cm
Γ (Gama sabiti)	0,145	μSv.m ² /MBq.sa
A (Maksimum Aktivite)	30	mCi 1110 MBq
t (5 gün 2 saat)	10	saat/hafta
W (İş yükü) = Γ.A.t	1610	(μSv.m ² /hafta)

Çizelge 8.14 PET Ünitesi Ga-68 Sıcak Oda Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	F-18 Sıcak Oda	100	1,3	0,2	1610	0,46	4,93
B Duvarı	PET Görüntüleme Odası	20	1,2	1	1610	2,90	30,75
C Duvarı	Asansör	20	1,2	0,05	1610	0,74	7,85
D1 Duvarı	Çamaşırhane	20	1,3	0,05	1610	0,63	6,63
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	1610	1,28	13,54
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	1610	-0,37	-3,97

*A duvarı zırhlama hesabı F-18 sıcak oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**B duvarı zırhlama hesabı PET görüntüleme odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

PET ünitesi Ga-68 sıcak odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.19'da verilmiştir.

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kurgun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurgun Kalınlığı
A Duvar	Sıcak oda	1.30	100	0.2	1.609.50	0.46	0.00	4.93	0.46 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Nükleer Tip görüntülem...	1.20	20	1	1.609.50	2.90	0.00	30.75	2.9 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Asansör	1.20	20	0.05	1.609.50	0.74	0.00	7.85	0.74 Kadar ekleme yapılmalı
D1 Duvar	Çamaşırhane	1.30	20	0.05	1.609.50	0.63	0.00	6.63	0.63 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Yoğun bakım ünitesi	3.70	20	1	1.609.50	1.28	0.00	13.54	1.28 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Depo	2.60	20	0.05	1.609.50	-0.37	0.00	-3.97	+

Şekil 8.19 PET Ünitesi Ga-68 Sıcak Oda Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.2.3 PET-CT Görüntüleme Odası Zırhlama Hesabı

Ünite içerisinde görüntüleme odalarında maksimum 15 mCi aktiviteli F-18/Ga-68 enjekte edilmiş tek bir hastanın görüntüleme işlemi yapılmaktadır.

A (Maksimum Aktivite)	15	mCi	555	MBq
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta	(0,5 saat çekim süresi, günde 16 hasta, 5 gün)	
Soğurulma Faktörü (SF)	0,64			
Doz azaltma Faktörü (DAF)	0,91	(30 dakika işlem süresi için)		
Bozunma Faktörü (BF)	0,71	(Hasta yaklaşık 55 dakika beledikten sonra bu odaya alınmaktadır)		

Vücuttan Atılma Faktörü (VAF) 0,85 (Hasta yaklaşık 55 dakika bekledikten sonra bu odaya alınmaktadır)

$$W = \Gamma \cdot A \cdot t \cdot SF \cdot DAF \cdot BF \cdot VAF = 1116 \text{ } (\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / \text{hafta})$$

Çizelge 8.15 PET/PET-CT Ünitesi Görüntüleme Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W (μSv.m ² /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Şaft	20	2,5	0,05	1116	-0,58	-6,17
B Duvarı*	Ga-68 Sıcak Oda	100	2,5	0,2	1116	-0,74	-7,87
B1 Duvarı**	F-18 Sıcak Oda	100	2,5	0,2	1116	-0,74	-7,87
B2 Duvarı	Nükleer Tıp Koridor	20	2,5	0,2	1116	0,42	4,43
C Duvarı	Kontrol Odası	100	2,5	1	1116	0,42	4,43
C1 Duvarı	Teknik Oda	20	2,5	0,05	1116	-0,58	-6,17
D Duvarı	Toprak						
Kapı K2	Nükleer Tıp Koridor	20	2,5	0,125	1116	0,08	
Kapı K3	Teknik Oda	20	2,5	0,05	1116	-0,58	
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	1116	1,01	10,74
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	1116	-0,64	-6,77

*A duvarı zırhlama hesabı Ga-68 sıcak oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**B1 duvarı zırhlama hesabı F-18 sıcak oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

PET ünitesi görüntüleme odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 20'de verilmiştir.

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	Iğ Yüğü	Hesaplanan Kurşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurşun Kalınlığı
A Duvar	Teknik oda	2,50	20	0,05	1.115,80	-0,58	0,00	-6,17	+
B Duvar	Sıcak oda	2,50	100	0,2	1.115,80	-0,74	0,00	-7,87	+
B1 Duvar	Sıcak oda	2,50	100	0,2	1.115,80	-0,74	0,00	-7,87	+
B2 Duvar	Koridor	2,50	20	0,2	1.115,80	0,42	0,00	4,43	0,42 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Kumanda ünitesi	2,50	100	1	1.115,80	0,42	0,00	4,43	0,42 Kadar ekleme yapılmalı
C1 Duvar	Teknik oda	2,50	20	0,05	1.115,80	-0,58	0,00	-6,17	+
D Duvar	Toprak	0,00	20	0,025	1.115,80	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K2	Kontrolü alandaki kont...	2,50	20	0,125	1.115,80	0,08	0,00	0,84	0,08 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K3	Teknik oda	2,50	20	0,05	1.115,80	-0,58	0,00	-6,17	+
Tavan	Yoğun bakım ünitesi	3,70	20	1	1.115,80	1,01	0,00	10,74	1,01 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Depo	2,50	20	0,05	1.115,80	-0,64	0,00	-6,77	+

Şekil 8.20 PET Ünitesi Görüntüleme Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

PET-CT hibrit görüntüleme odasının bilgisayarlı tomografi cihazından kaynaklanan x-ışınları için yapılmış zırhlama hesabı Çizelge 8.16’ da verilmiştir.

Çizelge 8.16 PET Ünitesi PET-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Şaft	20	2,5	0,05	0,12	11,46
B Duvarı	Ga-68 Sıcak Oda	100	2,5	0,2	0,1	10,8
B1 Duvarı	F-18 Sıcak Oda	100	2,5	0,2	0,1	10,8
B2 Duvarı	Nükleer Tıp Koridor	20	2,5	0,2	0,20	15,50
C Duvarı	Kontrol Odası	100	2,5	1	0,19	17,40
C1 Duvarı	Teknik Oda	20	2,5	0,025	0,15	12,80
D Duvarı	Toprak					
Kapı K2	Nükleer Tıp Koridor	20	2,5	0,125	0,15	
Kapı K3	Teknik Oda	20	2,5	0,05	0,12	
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	0,17	15,90
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	0,12	11,20

Hem PET’ten kaynaklı hem de CT’den kaynaklı zırh çıkması durumunda; zırh kalınlığı şu şekilde bulunur:

Kurşun hesabı: PET’te bulunan beton kalınlığından CT hesabında bulunan beton kalınlığı çıkarılır. Çıkan beton değerinin ne kadar kurşuna karşı geldiği ise CT’de bulunan beton ve kurşun kalınlıklarından orantı kurularak bulunur. Bulunan zırhlama değeri PET için yapılan hesapta bulunan kurşun kalınlığına ilave edilir. Toplam sonucu elde edilen kurşun kalınlığı aradığımız zırh kalınlığını verir.

Beton Hesabı: Hesap sonucu çıkan en yüksek beton kalınlığı zırh kalınlığını verir [11].

Çizelge 8.17 PET Ünitesi PET-CT Hibrit Görüntüleme Odası X-ışını kaynaklı ve radyofarmasötik verilmiş hasta kaynaklı Zırhlama Hesabı karşılaştırması

Parametreler					Radyoaktif Hasta kaynaklı		X-ışını kaynaklı		Dikkate alınması gereken	
Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	Pb (cm)	Beton (cm)	Pb (cm)	Beton (cm)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Şaft	20	2,5	0,05	-0,58	-6,17	0,12	11,46	0,12	11,46
B Duvarı	Ga-68 Sıcak Oda	100	2,5	0,2	-0,74	-7,87	0,1	10,8	0,1	10,8
B1 Duvarı	F-18 Sıcak Oda	100	2,5	0,2	-0,74	-7,87	0,1	10,8	0,1	10,8
B2 Duvarı	Nükleer Tıp Koridor	20	2,5	0,2	0,42	4,43	0,20	15,50	0,56	15,50
C Duvarı	Kontrol Odası	100	2,5	1	0,42	4,43	0,19	17,40	0,56	17,40
C1 Duvarı	Teknik Oda	20	2,5	0,025	-0,58	-6,17	0,15	12,80	0,15	12,80
D Duvarı	Toprak									
Kapı K2	Nükleer Tıp Koridor	20	2,5	0,125	0,08		0,15		0,15	
Kapı K3	Teknik Oda	20	2,5	0,05	-0,58		0,12		0,12	
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	1,01	10,74	0,17	15,90	1,07	15,90
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	-0,64	-6,77	0,12	11,20	0,12	11,20

8.2.4 Radyoaktif Katı Atık Odası Zırhlama Hesabı

A (Maksimum Aktivite)	1	mCi	37	MBq
t (5 gün 2 saat)	40	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t$	212	($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)		

Çizelge 8.18 PET Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Kontrol Odası	100	0,8	1	212	0,86	9,14
B Duvarı	Tuvalet	20	0,8	0,05	212	-0,14	-1,45
C Duvarı	Enjeksiyon Odası	100	0,8	0,5	212	0,36	3,84
D Duvarı	Nükleer Tıp Koridoru	20	0,8	0,2	212	0,86	9,14
Kapı K1	Nükleer Tıp Koridoru	20	0,8	0,125	212	0,52	
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	212	-0,19	-1,97
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	212	-1,84	-19,47

PET ünitesi radyoaktif katı atık odası yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 21’de verilmiştir.

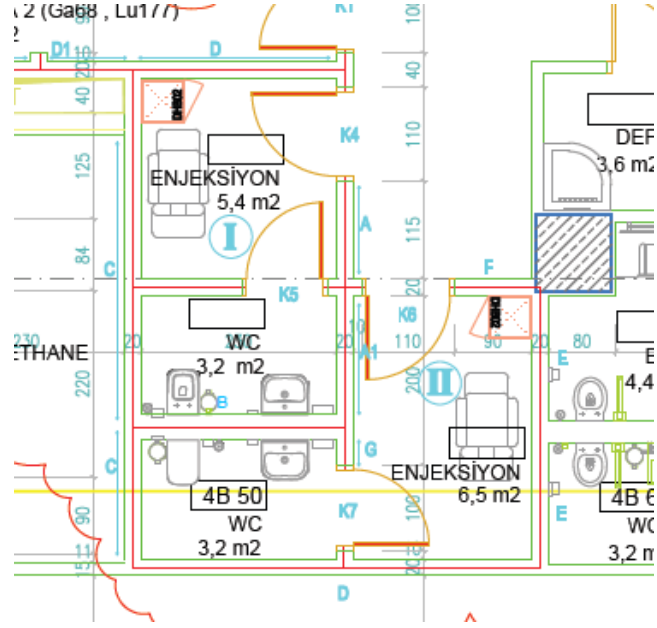
Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	Iş Yüğü	Hesaplanan Kurşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurşun Kalınlığı
A Duvar	Kumanda Ünitesi	0.80	100	1	211.64	0.86	0.00	9.14	0.86 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Tuvalet	0.80	20	0.05	211.64	-0.14	0.00	-1.45	+
C Duvar	SPECT enjeksiyon odası	0.80	100	0.5	211.64	0.36	0.00	3.84	0.36 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Koridor	0.80	20	0.2	211.64	0.86	0.00	9.14	0.86 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K1	Kontrolü alandaki kond...	0.80	20	0.125	211.64	0.52	0.00	5.55	0.52 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Yoğun bakım ünitesi	3.70	20	1	211.64	-0.19	0.00	-1.97	+
Taban	Depo	2.60	20	0.05	211.64	-1.84	0.00	-19.47	+

Şekil 8.21 PET Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.2.5 Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odaları Zırhlama Hesabı

Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I Zırhlama Hesabı:

Ünite içerisinde Enjeksiyon ve Hasta Bekleme odalarında maksimum 15 mCi aktiviteli F-18/Ga-68 enjekte edilmiş tek bir hasta bekleme yapmaktadır. Şekil 8.22’de Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I ve Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği alan yerleşimi verilmiştir.



Şekil 8.22 Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I ve Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II için Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi

A (Maksimum Aktivite)	15	mCi	555	MBq
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta	(1 saat bekleme süresi, 1 günde 8 hasta, 5 gün)	
Soğurulma Faktörü (SF)	0,64			
Doz azaltma Faktörü (DAF)	0,83	(Yaklaşık 1 saat bekleme süresi için)		
Bozunma Faktörü (BF)	1	(Hastaya ilk aktivite bu odada verilmektedir)		
Vücuttan Atılma Faktörü (VAF)	1	(Hastaya ilk aktivite bu odada verilmektedir)		
$W = \Gamma .A.t.SF.DAF.BF.VAF$	1686	$(\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta})$		

Çizelge 8.19 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W (μSv.m ² /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Nükleer Tıp Koridor	20	1,7	0,2	1686	1,27	13,48
A1 Duvarı*	Enjeksiyon ve hasta bekleme odası II	100	1,3	1	1686	1,66	17,58
B Duvarı**	Enjeksiyon ve hasta bekleme odası II tuvaleti	100	1	0,05	1686	-0,12	-1,30
C Duvarı	Çamaşırhane	20	0,8	0,05	1686	1,36	14,41
D Duvarı***	F-18 Sıcak Oda	100	1,5	0,2	1686	0,29	3,09
E Duvarı							
Kapı K4	Nükleer Tıp Koridor	20	1,7	0,125	1686	0,93	
Kapı K5							
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	1686	1,31	13,90
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	1686	-0,34	-3,61

*A1 duvarı zırhlama hesabı Enjeksiyon ve hasta bekleme odası II tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**B duvarı zırhlama hesabı Enjeksiyon ve hasta bekleme odası II tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

***D duvarı zırhlama hesabı F-18 Sıcak Oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

PET ünitesi enjeksiyon ve hasta bekleme odası I yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.23’de verilmiştir.

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	Iγ YGÜ	Hesaplanan Kurgun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurgun Kalınlığı
A Duvar	Koridor	1,70	20	0,2	1.686,35	1,27	0,00	13,48	1,27 Kadar ekleme yapılmalı
A1 Duvar	PET enjeksiyon odası	1,30	100	1	1.686,35	1,66	0,00	17,58	1,66 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Radyoaktif hasta tuvaleti	1,00	100	0,05	1.686,35	-0,12	0,00	-1,30	+
C Duvar	Çamaşırhane	0,80	20	0,05	1.686,35	1,36	0,00	14,41	1,36 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Sıcak oda	1,50	100	0,2	1.686,35	0,29	0,00	3,09	0,29 Kadar ekleme yapılmalı
E Duvar	Tuvalet	0,00	20	0,05	1.686,35	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K4	Kontrolü alandaki kond...	1,70	20	0,125	1.686,35	0,93	0,00	9,89	0,93 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K5	Tuvalet	0,00	20	0,05	1.686,35	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Yoğun bakım ünitesi	3,70	20	1	1.686,35	1,31	0,00	13,90	1,31 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Depo	2,60	20	0,05	1.686,35	-0,34	0,00	-3,61	+

Şekil 8.23 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası I Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II Zırhlama Hesabı:

Çizelge 8.20 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W (μSv.m ² /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A1 Duvarı	Enjeksiyon ve hasta bekleme odası I	100	1,8	1	1686	1,19	12,61
B Duvarı	Enjeksiyon ve hasta bekleme odası I tuvaleti	100	1	0,05	1686	-0,12	-1,30
C Duvarı	Çamaşırhane	20	0,8	0,05	1686	1,36	14,41
D Duvarı	Koridor	20	1,5	0,2	1686	1,45	15,40
E Duvarı	Tuvaletler	20	1	0,2	1686	2,04	21,59
F Duvarı	Nükleer Tıp Koridor	20	2	0,2	1686	1,04	11,00
G Duvarı					1686		
Kapı K6	Nükleer Tıp Koridor	20	2	0,125	1686	0,70	
Kapı K7					1686		
Tavan	KVC Yoğun Bakım	20	3,7	1	1686	1,31	13,90
Taban	UPS Depo	20	2,6	0,05	1686	-0,34	-3,61

*A1 duvarı zırhlama hesabı Enjeksiyon ve hasta bekleme odası I tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

**B duvarı zırhlama hesabı Enjeksiyon ve hasta bekleme odası I tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

PET ünitesi enjeksiyon ve hasta bekleme odası II yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.24'de verilmiştir.

NÜKLEER TİP

Ünite : PET/PET-CT ÜNİTESİ Gama Sabiti : 0,143 Aktivele(mCi) : 15 Tasarım Dozu : 1

Oda Tipi : ENJEKSİYON VE HASTA BEKLEME ODASI TVL Beton : 17,6 Zaman : 40 Azaltma Faktörü : 0,5312

Radyoizotopi Cinsi : F-18 TVL Kırınım : 1,66 Hesapla

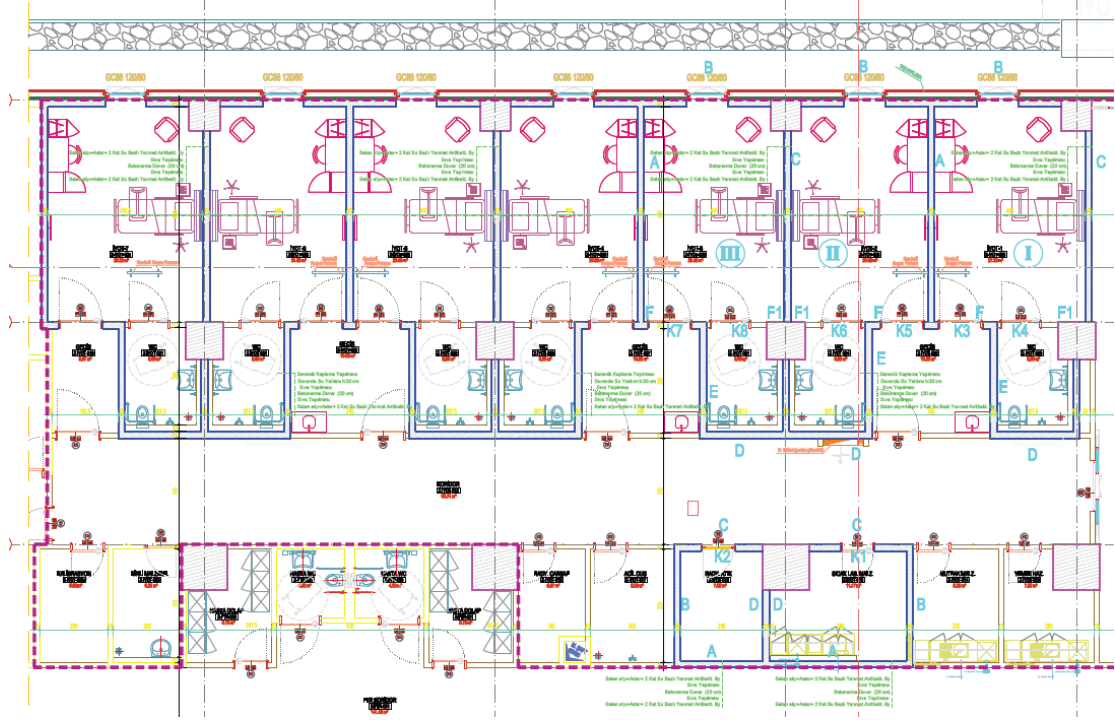
Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kırınım	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kırınım Kalınlığı
A1 Duvar	PET enjeksiyon odası	1,80	100	1	1.686,35	1,19	0,00	12,61	1,19 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Radyoaktif hasta tuvaleti	1,00	100	0,05	1.686,35	-0,12	0,00	-1,30	+
C Duvar	Çamaşırhane	0,80	20	0,05	1.686,35	1,36	0,00	14,41	1,36 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Koridor	1,50	20	0,2	1.686,35	1,45	0,00	15,40	1,45 Kadar ekleme yapılmalı
E Duvar	Tuvalet	1,00	20	0,2	1.686,35	2,04	0,00	21,59	2,04 Kadar ekleme yapılmalı
F Duvar	Koridor	2,00	20	0,2	1.686,35	1,04	0,00	11,00	1,04 Kadar ekleme yapılmalı
G Duvar	Radyoaktif hasta tuvaleti	0,00	100	0,05	1.686,35	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K6	Kontrolü alandaki kond.	2,00	20	0,125	1.686,35	0,70	0,00	7,41	0,7 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K7	Radyoaktif hasta tuvaleti	0,00	100	0,05	1.686,35	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Yoğun bakım ünitesi	3,70	20	1	1.686,35	1,31	0,00	13,90	1,31 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Depo	2,60	20	0,05	1.686,35	-0,34	0,00	-3,61	+

Şekil 8.24 PET Ünitesi Enjeksiyon ve Hasta Bekleme Odası II Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.3 Yataklı Tedavi Ünitesi Örnek Zırhlama Hesabı Yapılması

Şekil 8.25’de alan yerleşimi gösterilen 7 odalı yataklı tedavi ünitesine ait zırhlama hesabı sıcak oda, radyoaktif atık odası ve bir tedavi odası için hem matematiksel olarak elle hem de yazılım ile yapılmıştır.

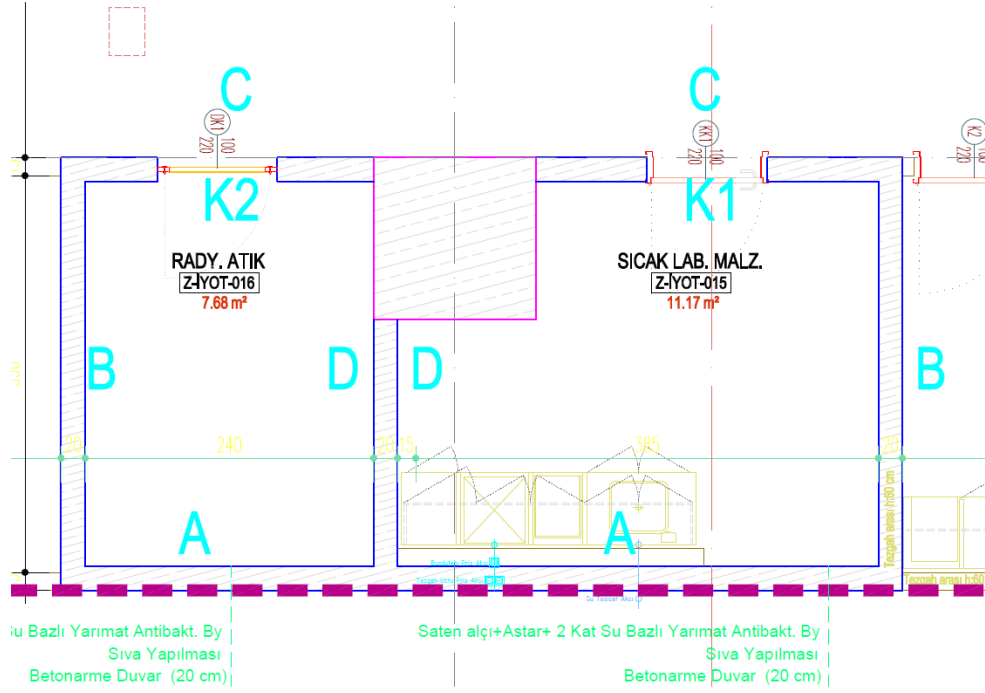


Şekil 8.25 Örnek Yataklı Tedavi Ünitesi Alan Yerleşimi

Yataklı tedavi ünitesinde zırhlama hesabı, en yüksek aktiviteli I-131’e göre yapılmıştır. Maksimum 200 mCi aktiviteli kapsül halinde I-131 hastaya tedavi odasında oral yolla verilmektedir. Hasta ortalama 4 gün içerisinde taburcu edilmektedir. I-131’in yarı ömrü 8 gündür. Hasta vücudundaki aktivitenin büyük bir kısmı ter ve idrar yolu ile atılmaktadır. Yataklı tedavi ünitelerinde tedavi gören hastaların kullandıkları nevresim, havlu, çarşaf vb malzemeler ile mutfak malzemeleri kullanıldıktan sonra radyoaktif bulaş olmaları nedeni ile belirli bir süre ünite içerisinde planlanmış bir alanda bekletilmekte ve bertaraf edilmektedir. Tercihen tek kullanımlık malzemeler kullanılmaktadır.

8.3.1 Yataklı Tedavi Ünitesi Sıcak Oda Zırhlama Hesabı

Şekil 8.26'da sıcak oda ve radyoaktif katı atık odası için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği alan yerleşimi verilmiştir.



Şekil 8.26 Sıcak Oda ve Radyoaktif Katı Atık Odası için Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi

Hesaplamalar I-131 'e göre yapılmıştır.

I-131 Yarı Ömrü	8	gün
I-131 TVL Kurşun	1,1	cm
I-131 TVL Beton	18	cm
I-131 Γ (Gama sabiti)	0,059	$\mu\text{Sv.m}^2/\text{MBq.saat}$
PH	20	$\mu\text{Sv/hafta}$
PG	100	$\mu\text{Sv/hafta}$

$$W (\text{İş yükü}) = \Gamma.A.t$$

$$k = P . d^2 / W . T . U$$

$$\text{TVLn} = \log (1 / k)$$

$$\text{Zırh kalınlığı} = \text{TVLn}$$

$$x \text{ TVL}$$

$$U \text{ kullanma faktörü} = 1$$

A (Maksimum Aktivite)	200	mCi	7400	MBq
t (5 gün 1 saat)	1	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t$	437	($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)		

Çizelge 8.21 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Koridor	20	2,1	0,2	437	0,00	-0,08
B1 Duvarı	Mutfak	20	2,5	0,5	437	0,27	4,36
C Duvarı	Nükleer Tıp Koridoru	20	0,7	0,2	437	1,04	17,10
D Duvarı*	Radyoaktif Katı Atık Odası	100	1,5	0,025	437	-1,45	-23,65
Kapı K1	Nükleer Tıp Koridoru	20	2,1	0,125	437	-0,23	
Tavan	Muayene Odası	20	5,5	1	437	-0,16	-2,55
Taban	Medikal Sığınak / Depo	20	4,2	0,05	437	-1,33	-21,75

*D duvarı zırlama hesabı radyoaktif katı atık odası tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

Radyonüklit tedavi ünitesi sıcak oda yazılım zırlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.27’de verilmiştir.

NÜKLEER TİP

Ünite : YATAKLI RADYOAKTİF HASTA TEDAVİ OD... Gama Sabiti : 0,059 Aktivite(mCi) : 200 Tasarım Dozu : 1
 Oda Tipi : SICAK ODA TVL Beton : 18 Zaman : 1 Azaltma Faktörü : 1
 Radyoizotopi Cinsi : I-131 TVL Kurşun : 1,1 Hesapla

Yan Duvar Bilgiler

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yüğü	Hesaplanan Kurşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurşun Kalınlığı
A Duvar	Koridor	2,10	20	0,2	436,60	0,00	0,00	-0,08	+
B1 Duvar	Mutfak	2,50	20	0,5	436,60	0,27	0,00	4,36	0,27 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Koridor	0,70	20	0,2	436,60	1,04	0,00	17,10	1,04 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Radyoaktif atık odası	1,50	100	0,025	436,60	-1,45	0,00	-23,65	+
Kapı K1	Kontrollü alandaki korid...	2,10	20	0,125	436,60	-0,23	0,00	-3,75	+
Tavan	Muayene odası	5,50	20	1	436,60	-0,16	0,00	-2,55	+
Taban	Depo	4,20	20	0,05	436,60	-1,33	0,00	-21,75	+

Şekil 8.27 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Sıcak Oda Yazılım ile Zırlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.3.2 Yataklı Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Zırhlama Hesabı

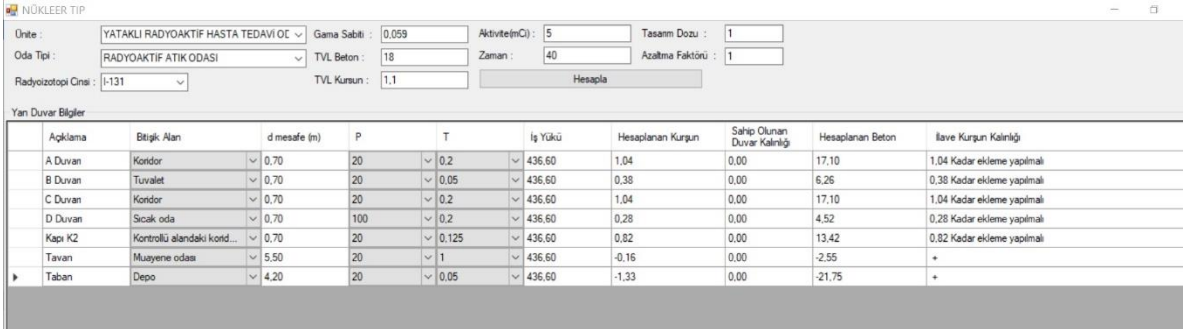
A (Maksimum Aktivite)	5	mCi	185	MBq
t (5 gün 2 saat)	40	saat/hafta		
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t$	437	($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)		

Çizelge 8.22 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2$ /hafta)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Koridor	20	0,7	0,2	437	1,04	17,10
B Duvarı	Tuvalet	20	0,7	0,05	437	0,38	6,26
C Duvarı	Koridor	20	0,7	0,2	437	1,04	17,10
D Duvarı	Sıcak Oda	100	0,7	0,2	437	0,28	4,52
Kapı K2	Nükleer Tıp Koridoru	20	0,7	0,125	437	0,82	
Tavan	Muayene Odası	20	5,5	1	437	-0,16	-2,55
Taban	Medikal Sığınak / Depo	20	4,2	0,05	437	-1,33	-21,75

*D duvarı zırhlama hesabı sıcak oda tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

Radyonüklit tedavi ünitesi sıcak oda yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.28’de verilmiştir.



The screenshot shows a software interface for calculating the shielding of a radioactive waste room. The interface includes input fields for activity (5 mCi), time (40 hours/week), and shielding parameters (Gamma constant: 0.059, TVL of concrete: 18, TVL of lead: 1.1, Azaltma Faktörü: 1). Below the input fields is a table with the following columns: Açıklama, Bitişik Alan, d mesafe (m), P, T, İş Yüğü, Hesaplanan Kurşun, Sahip Olunan Duvar Kalınlığı, Hesaplanan Beton, and İlave Kurşun Kalınlığı. The table contains data for various parts of the room, including walls (A, B, C, D), a door (Kapı K2), ceiling (Tavan), and floor (Taban).

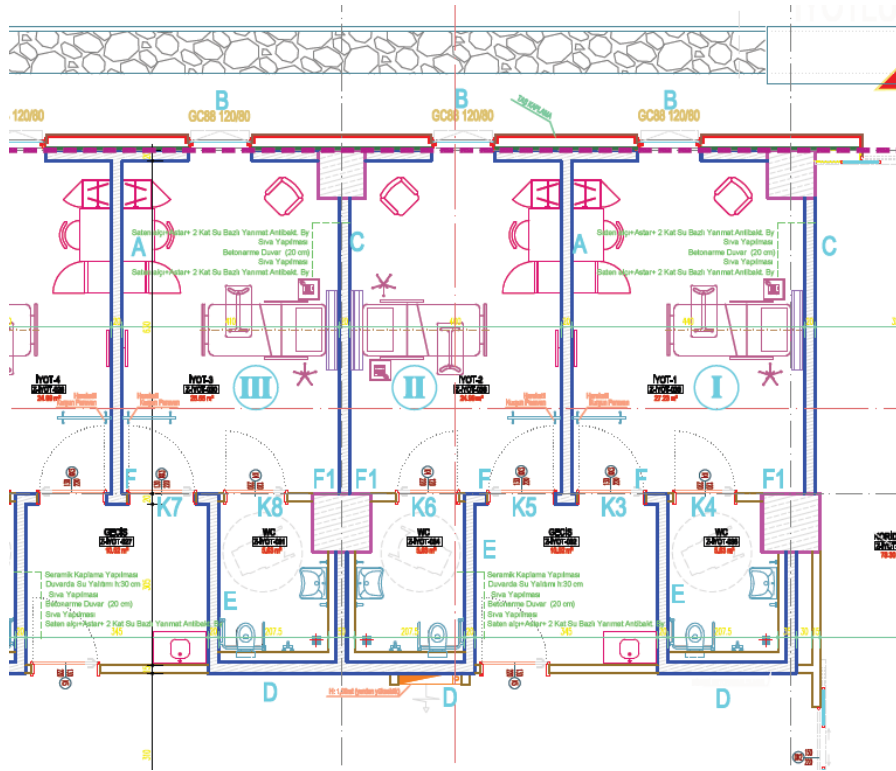
Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yüğü	Hesaplanan Kurşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurşun Kalınlığı
A Duvarı	Koridor	0,70	20	0,2	436,60	1,04	0,00	17,10	1,04 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvarı	Tuvalet	0,70	20	0,05	436,60	0,38	0,00	6,26	0,38 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvarı	Koridor	0,70	20	0,2	436,60	1,04	0,00	17,10	1,04 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvarı	Sıcak oda	0,70	100	0,2	436,60	0,28	0,00	4,52	0,28 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K2	Kontrolü alandaki korid...	0,70	20	0,125	436,60	0,82	0,00	13,42	0,82 Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Muayene odası	5,50	20	1	436,60	-0,16	0,00	-2,55	+
Taban	Depo	4,20	20	0,05	436,60	-1,33	0,00	-21,75	+

Şekil 8.28 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Radyoaktif Katı Atık Odası Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.3.3 Radyonüklit Tedavi Odası I Zırhlama Hesabı

Şekil 8.29’da Radyonüklit Tedavi Odası I için harflendirilen ve mesafelerin gösterildiği

alan yerleşimi verilmiştir.



Şekil 8.29 Radyonüklit Tedavi Odası I için Harflendirilen ve Mesafelerin Gösterildiği Alan Yerleşimi

A (Maksimum Aktivite)	200	mCi	7400	MBq	
t (7 gün 24 saat)	168	saat/hafta			
t (5 gün 8 saat)	40	saat/hafta			
OAF	0,84				
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t \cdot OAF$	14670	($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)			Yan alan yataklı tedavi odası ise
W (İş yükü) = $\Gamma \cdot A \cdot t \cdot OAF$	61613	($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{hafta}$)			Yan alan yataklı tedavi odası ise

Çizelge 8.23 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Yataklı Tedavi Odası I Matematiksel Zırhlama Hesabı

Duvar	Bitişik Alan	P	d (m)	T	W ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{hafta}$)	Pb (cm)	Beton (cm)
A Duvarı	Yataklı Tedavi Odası II	100	2,5	1	61613	2,19	35,89
B Duvarı	Bahçe	20	3,8	0,05	14670	0,45	7,29
C Duvarı	Koridor	20	1	1	14670	2,38	39,00
D Duvarı	Koridor	20	1	1	14670	2,38	39,00
E Duvarı	Geçiş Koridoru	20	1,6	0,2	14670	1,93	31,65
F Duvarı	Geçiş Koridoru	20	3,5	0,2	14670	1,19	19,41
F1 Duvarı	Radyoaktif Hasta Tuvaleti						
Kapı K3	Koridora Açılan Kapı	20	2,1	0,125	14670	1,45	
Kapı K4	Radyoaktif Hasta Tuvaletine Açılan Kapı						
Tavan	Muayene Odası	20	5,5	1	14670	1,52	24,92
Taban	Medikal Sığınak / Depo	20	4,2	0,05	14670	0,35	5,72

*A duvarı zırhlama hesabı Yataklı Tedavi Odası II tarafından da yapıldığında iki hesap karşılaştırılmalı ve yüksek zırh kalınlığı bulunan hesaba göre zırhlama duvarın tek bir tarafından yapılmalıdır.

Radyonüklit tedavi ünitesi sıcak oda yazılım zırhlama hesabı ekran görüntüsü Şekil 8.30'da verilmiştir.

Açıklama	Bitişik Alan	d mesafe (m)	P	T	İş Yükü	Hesaplanan Kurşun	Sahip Olunan Duvar Kalınlığı	Hesaplanan Beton	İlave Kurşun Kalınlığı
A Duvar	Yataklı tedavi odası	2,50	100	1	14.669,76	1,51	0,00	24,67	1,51 Kadar ekleme yapılmalı
B Duvar	Bahçe	3,80	20	0,05	14.669,76	0,45	0,00	7,29	0,45 Kadar ekleme yapılmalı
C Duvar	Koridor	1,00	20	0,2	14.669,76	2,38	0,00	39,00	2,38 Kadar ekleme yapılmalı
D Duvar	Koridor	1,00	20	0,2	14.669,76	2,38	0,00	39,00	2,38 Kadar ekleme yapılmalı
E Duvar	Koridor	1,60	20	0,2	14.669,76	1,93	0,00	31,65	1,93 Kadar ekleme yapılmalı
F Duvar	Koridor	3,50	20	0,2	14.669,76	1,19	0,00	19,41	1,19 Kadar ekleme yapılmalı
F1 Duvar	Radyoaktif hasta tuvaleti	0,00	100	0,05	14.669,76	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K3	Koridöre alandaki korid...	2,10	20	0,125	14.669,76	1,45	0,00	23,72	1,45 Kadar ekleme yapılmalı
Kapı K4	Radyoaktif hasta tuvaleti	0,00	100	0,05	14.669,76	=	0,00	=	NaN Kadar ekleme yapılmalı
Tavan	Muayene odası	5,50	20	1	14.669,76	1,52	0,00	24,92	1,52 Kadar ekleme yapılmalı
Taban	Depo	4,20	20	0,05	14.669,76	0,35	0,00	5,72	0,35 Kadar ekleme yapılmalı

Şekil 8.30 Radyonüklit Tedavi Ünitesi Yataklı Tedavi Odası I Yazılım ile Zırhlama Hesabı Ekran Görüntüsü

8.4 Zırhlama Yapılırken Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar

Nükleer tıp ünitesi içerisinde yer alan bir odada, zırhlama yapılması gereken yüzeylerin zırh malzemesi kalınlıkları belirlendikten sonra maliyet ve uygulanabilirlik faktörlerine göre kurşun veya beton ile zırhlama yapılacağına karar verilmelidir.

Nükleer tıp ünitelerinde radyasyon kaynağının noktasal kaynak olması ve bulunduğu alanda her yöne radyasyon yayması nedeni ile yapılan zırhlama işleminin kesintisiz olmasını sağlamak önem arz etmektedir. Oda duvarlarından geçen havalandırma, elektrik ve tesisat boruları zırhlamayı kesintiye uğratabilecek unsurlardır.

Bu nedenle kablo, boru, kanal geçişleri, kapılar, pencereler ve gözetleme pencereleri de radyasyon sızıntısına sebebiyet vermeyecek şekilde gerekli olduğu durumlarda zırhlanmalıdır.

Kurşun levhalar ile yapılan zırhlamalarda ek yerlerinden sızıntı olmasını önlemek için levhalar ek yerlerinde üst üste bindirilmeli; boru ve kablo geçişlerinde boşluk bırakılmamalıdır. Kapılar, kapı kasaları ve pervazları da radyasyon sızıntısına meydan vermeyecek şekilde zırhlanmalıdır.

Görüntüleme odalarında kumanda ünitesinde bulunan personelin görüntüleme odasını görebilmesi için kullanılan ve görüntüleme odası ile kumanda odasının ortak duvarında yer alan gözetleme penceresine, o duvar için yapılan hesapta bulunan kurşun kalınlığını sağlayacak kurşuna eşdeğer cam takılmalıdır. Gözetleme penceresinin pervazlarında da sızdırmazlık sağlanmalıdır.

8.4.1 Zırhlama Hesabı Yapılan Duvarda Mevcutta Zırh Malzemesi Olduğu Durumlar

Zırhlama hesabı yapılan duvarda mevcutta beton veya kurşun yapı malzemesi olduğu durumlarda mevcut zırh malzemesinin sağlayacağı radyasyondan korunma da dikkate alınmalıdır.

Mevcut yapı malzemesi beton ise ve mevcut beton kalınlığı hesaplanan beton kalınlığından büyük ise ilave zırhlama yapmaya gerek yoktur.

Mevcut yapı malzemesi beton ise ve mevcut beton kalınlığı hesaplanan beton kalınlığından küçük ise istenilen beton kalınlığına tamamlamak üzere beton inşa etmek zor ve maliyetli olabilmektedir. Bu durumda ilave zırhlama işlemi kurşun levha kullanılarak yapılabilmektedir. İlave kurşun kalınlığı hesaplanırken söz konusu duvar için hesaplanan beton ve kurşun kalınlıkları doğru orantı ile bulunabilmektedir [11].

Örnek: A duvarı 2.35 g/cm³ yoğunlukta 10 cm betondan imal edilmiştir. Zırhlama hesabında A duvarının oda içerisinde bulunan radyasyon kaynağına göre 19 cm kalınlıkta

betondan inşa edilmiş olması veya 1.14 cm kalınlıkta kurşun ile kaplanması gerektiği bulunmuştur. Zırhlamanın kurşun levha ile tamamlanmak istenmesi durumunda kullanılması gereken kurşun levha kalınlığı ne kadar olmalıdır?

Zırhlama hesabı yapılan radyasyon kaynağı için 19 cm beton ile yapılan zırhlamanın 1.14 cm kurşunla da yapıldığı bulunmuştur.

19 cm beton zırhlaması

1.14 cm kurşun zırhlamaya eş değer ise

$19-10=9$ cm beton zırhlaması

0.54 cm kurşun zırhlamaya eş değerdir.

10 cm beton üzerine 0.54 cm ilave kurşun levha kullanılır ise 19 cm beton zırhlamaya eş değer kurşun zırhlama yapılmış olur.

Mevcut yapı malzemesi kurşun ise ve mevcut kurşun kalınlığı hesaplanan kurşun kalınlığından büyük ise ilave zırhlama yapmaya gerek yoktur.

Mevcut yapı malzemesi kurşun ise ve mevcut kurşun kalınlığı hesaplanan kurşun kalınlığından küçük ise ilave zırhlama işlemi kurşun levha kullanılarak yapılabilmektedir. İlave kurşun kalınlığı hesaplanırken söz konusu duvar için hesaplanan kurşun kalınlığından mevcut kurşun kalınlığı çıkarılarak bulunabilmektedir.

9. YORUM

Radyasyondan korunmak için maruziyet en aza indirilmelidir. Radyasyona maruz kalınan sürenin azaltılması, kaynak ile araya belli bir mesafe konulması bunun mümkün olmadığı durumlarda ise radyasyon kaynağının bulunduğu alanın zırhlaması gerekmektedir. Bu tez kapsamında radyasyonun planlı kullanım alanlarından birisi olan nükleer tıp üniteleri, bu ünitelerde bulunan radyasyon kaynakları ve alanları hakkında bilgi verilerek radyasyon zırhlamasında kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Nükleer tıp ünitelerinde bulunan alanların zırhlama hesaplamalarının yapılması için bir yazılım geliştirilmiştir.

Ülkemizde nükleer tıp hizmetlerinin verildiği sağlık kuruluşlarının faaliyetleri yasal düzenlemeler çerçevesinde gerçekleşmektedir. Bu ünitelerde bulunan radyasyon kaynakları ile faaliyet göstermek üzere Nükleer Düzenleme Kurumu'ndan lisans alınması zorunludur. Bazı alanlar için ise lisans alınmadan önce zırhlama hesabı yaptırılarak yine Nükleer Düzenleme Kurumu'ndan mekânsal tasarım onayı alınması zorunludur.

Nükleer tıp ünitelerinde bulunan alanların zırhlama hesaplamalarının nasıl yapıldığı ile ilgili literatürde bulunan hesap yöntemlerinden yola çıkılarak yol gösterici olması amacı ile bir çalışma yapılmıştır. Hesaplamalarda yapılan insan hatalarını en aza indirmek ve zamandan tasarruf etmek üzere bir yazılım geliştirilmiştir. Örnek nükleer tıp ünite yerleşim alanları için hesaplamalar yapılmıştır.

10. KAYNAKLAR

- [1] Nükleer Tıp Tarihçesi, https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_medicine, (Erişim tarihi: **9 Nisan 2020**).
- [2] European Association of Nuclear Medicine, Technologist's Guide Radiopharmacy: An Update, 2019
- [3] Nükleer Tıp Nedir, <http://www.tsnm.org/nukleer-tip-nedir/>, (Erişim tarihi: **9 Nisan 2020**).
- [4] Introduction To Nuclear Engineering (Third Edition), [John R. Lamarsh](#), [Anthony John Baratta](#) , 1959
- [5] Annals of the ICRP, ICRP Publication 33, Protection Against Ionizing Radiation from External Sources Used in Medicine, 1982,
- [6] 24/3/2000 tarihli ve 23999 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, 2000
- [7] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Radyoloji, Radyonükleid Görüntüleme Cihazları, 725TTT086, Ankara, 2011
- [8] Beton, <http://www.betonsa.com.tr/bilgibankasi/hazir-beton/> (Erişim tarihi: **12 Nisan 2020**)
- [9] Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV, NCRP Report No.49, 1976
- [10] MADSEN et al: Mark T., ANDERSON Jon A., HALAMA James R., KLECK Jeff, SIMPKIN Douglas J., VOTAW John R., WENDT Richard E., WILLIAMS Lawrence E., YESTER Michael V., 2006, PET and PET/CT Shielding Requirements, American Association of Physicists in Medicine, AAPM Task Group 108, Medical Physics, 33, 4-15 (2006)
- [11] Zırhlama Hesaplamaları Kılavuzu, RSGD-KLV-006, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, 2016
- [12] Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities, NCRP Report No.147, 2004
- [13] Specific Gamma-Ray Dose Constants For Nuclides Important To Dosimetry And Radiological Assessment, Laurie M. Unger* and D. K. Trubey, 1982
- [14] Neutron and Gamma-ray Flux-to-Dose-Rate Factors," ANSI/ANS-6.1.1-1977, American Nuclear Society, La Grange Park, IL 60525, 1977

- [15] Radiation Protection Dosimetry (2018), Vol. 178, No. 3, pp. 310–321
doi:10.1093/rpd/ncx112 Advance Access Publication, 31 August 2017
- [16] Mihail-Razvan Ioan, S. Bercea, Viorel Fugaru, Aurelia Celarel: Co-60 Specific Gamma-Ray Constant (Γ) Determinations for Various Biological Materials Involved in Radiotherapy Procedures, by Using GEANT4 and NIST XCOM
Romanian Journal of Physics, May 2018
- [17] Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities, NCRP Report No.151, 2005
- [18] Annals of the ICRP: ICRP Publication 116, Conversion Coefficients For Radiological Protection Quantities For External Radiation Exposures, 2010