

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOĞRUSAL İVMELENDİRİCİ CİHAZLARININ NCRP-151 RAPORUNA  
GÖRE ZIRHLANMASI**

**Mehmet Nuri ÇATAK**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2012**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Mehmet Nuri ÇATAK tarafından hazırlanan “**Doğrusal İvmelendirici Cihazların NCRP-151 Raporuna Göre Zırhlanması**” adlı tez çalışması 27.01.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Ali YAMAN

**Jüri Üyeleri** :

**Başkan** : Doç. Dr. Hüseyin SARI  
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Prof. Dr. Ali YAMAN  
Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı

**Üye** : Prof. Dr. Hüseyin ÜNVER  
Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylım.**

**Prof. Dr. Özer KOLSARICI**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DOĞRUSAL İVMELENDİRİCİ CİHAZLARININ NCRP-151 RAPORUNA GÖRE ZIRHLANMASI

Mehmet Nuri ÇATAK

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali YAMAN

Bu tez çalışmasında, ALARA (gerekçeli olarak verilebilecek en düşük doz) ilkesine uygun olarak zırhlanan doğrusal hızlandırıcı (Linac) cihazları için kullanılan malzemeler ve zırhlama hesaplamaları hakkında bilgi verilmiştir.

Zırhlama hesaplamaları, Electa Synergy cihazı için yapılmıştır. 18 MV'lik x-ışınları için kabul edilen iş yükü; her haftada 5 gün, her günde 8 saat, her 8 saatte 20 hasta ve her hasta için izomerkezde soğurulmuş doz değeri 3 Gy'dir. 6 MV'lik x-ışınları tedavisi ile aynı soğurulmuş doz değerinde günlük ek bir 30 hasta daha alınması beklenmiştir. P (zırhlama tasarım hedefi) kontrolsüz alanlar için (0,02 mSv/hafta)  $20 \times 10^{-6}$  Sv/hafta ve kontrollü alanlar için (0,1 mSv/hafta)  $0,1 \times 10^{-3}$  Sv/hafta olarak alınmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucu cihazın uygun şekilde zırhlanmış olduğu ve cihazın bulunduğu odanın dış kısmında yapılan ölçümlerin kabul edilebilir seviyelerde olduğu görülmüştür.

**Ocak 2012, 75 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal hızlandırıcı, Linac, Radyasyon, Zırhlama

## ABSTRACT

Master Thesis

### SHIELDING LINEAR ACCELERATOR DEVICES ACCORDING TO NCRP-151 REPORT

Mehmet Nuri ÇATAK

Ankara University  
Institute of Science  
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ali YAMAN

In this thesis, it has been given the information about materials used and shielding calculations for linear accelerator devices (linac) according to ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle.

Shielding calculations have been made for Electra Synergy device. The expected workload for 18 MV x-rays is 5 days per week, 8 hours per day, 20 patients per 8 hours and the value of absorbed dose at isocenter for each patient is 3 Gy. It is anticipated that an additional 30 patients per day will be treated with 6 MV x-rays to the same absorbed dose. P (shielding design goal) is taken (0,02 mSv/week)  $20 \times 10^{-6}$  Sv/week for uncontrolled areas and (0,1 mSv / week)  $0,1 \times 10^{-3}$  Sv / week for controlled areas.

As a result of the calculations made, it has seen that the device is appropriately shielded and the measurements taken outside of the room are at the acceptable levels.

**January 2012, 75 pages**

**Key Words:** Linear accelerator, Linac, Radiation, Shielding

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımnda beni yönlendiren ve her aşamasında yardımcı olan Sayın **Prof. Dr. Ali YAMAN**'a, (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı)

Ayrıca hesaplamalarda, ölçümlerde kısacası tezimin her aşamasında bana destek olan; bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli iş arkadaşım Hacettepe Üniversitesi Hastaneleri Fizikçi/Radyasyon Güvenlik Uzmanı **Mustafa Yasir ÖZPELİTOĞLU**'na,

Maddi manevi katkılarından dolayı değerli arkadaşlarım Elektrik-Elektronik Mühendisi **Soydan CERAN**'a, Fizikçi/Radyasyon Güvenlik Uzmanı **Ali HALAÇ**'a, Elektrik-Elektronik Mühendisi **Ahmet GÜNEL** ve eşi **Yelda GÜNEL**'e,

Ve tüm çalışmalarımnda beni bir an olsun yalnız bırakmayan her türlü manevi desteği ile beni motive eden çok muhterem eşim **Dilan / Dilber ÇATAK**'a

**En derin duygularıyla teşekkür ederim.**

Mehmet Nuri ÇATAK  
Ankara, Ocak 2012

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1 Eşdeğer Doz.....	2
2.2 Etkin Doz.....	3
2.3 Zırhlama Tasarım Hedefi .....	3
2.3.1 Kontrollü alanlar .....	3
2.3.2 Kontrolsüz alanlar.....	4
2.3.3 Zırhlama tasarımında kabul edilen varsayımlar.....	4
2.3.4 İş yükü .....	5
2.4 Kullanım Faktörü.....	5
2.5 Meşguliyet Faktörü.....	5
2.6 Koruyucu Bariyerler .....	6
2.7 Temel İlkeler.....	6
2.8 Stratejik Zırhlama Planı .....	7
2.9 İnşaat Detayları ve Kullanılacak Malzeme Özellikleri .....	7
2.9.1 İnşaat detayları.....	7
2.9.2 Kullanılacak malzeme özellikleri .....	7
2.9.2.1 Sıradan beton.....	8
2.9.2.2 Ağır beton.....	8
2.9.2.3 Kurşun.....	8

2.9.2.4 Çelik.....	9
2.9.2.5 Polietilen ve parafin.....	9
<b>3. HESAPLAMA YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Temel Kavramlar.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2 Birincil Bariyerler.....</b>	<b>11</b>
3.2.1 Standart yaklaşım.....	11
3.2.2 Bariyer genişliği.....	13
3.2.3 Kademeli bariyer (Sandviç bariyer).....	15
<b>3.3 İkincil Bariyerler.....</b>	<b>16</b>
<b>3.4 Kapılar ve Labirentler.....</b>	<b>18</b>
3.4.1 Düşük enerjili cihazlar.....	19
3.4.2 Yüksek enerjili cihazlar.....	23
3.4.2.1 Labirent kapısında foton eşdeğer doz hesaplaması.....	23
3.4.2.2 Labirent kapısındaki nötron doz eşdeğeri.....	25
3.4.2.2.1 Kersey's metodu.....	25
3.4.2.2.2 Geliştirilmiş Kersey metodu.....	26
3.4.2.3 Labirent kapısındaki toplam eşdeğer doz .....	27
3.4.3 Kapı zırhlaması.....	27
3.4.4 Kıvrımlı (alternate) labirentler ve kapı tasarımları.....	27
3.4.5 Direkt zırhlanmış kapı .....	28
3.4.5.1 Direkt zırhlanmış kapılarla ilgili tasarım problemleri .....	29
3.4.5.2 Direkt zırhlanmış kapılarda nötron kaynaklı gama ışını oluşması .....	30
<b>3.5 Ortalama Doz Eşdeğeri Miktarı .....</b>	<b>30</b>
3.5.1 Haftalık ortalama doz eşdeğeri miktarı.....	30
3.5.2 Herhangi bir saatteki ortalama doz eşdeğeri miktarı .....	31
<b>4. HESAPLAMALAR VE YÖNTEM .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Labirentli Konvensiyonel Tedavi Birimleri .....</b>	<b>33</b>
4.1.1 C bölgesindeki birincil bariyer .....	34

4.1.2 C bölgesi için ortalama doz eşdeğeri miktarı .....	35
4.1.3 C bölgesi için hastadan saçılan radyasyon .....	37
4.1.4 C bölgesi için sızıntı radyasyonun değerlendirmesi .....	38
4.1.5 Sızıntı ve hastadan saçılan radyasyonun A bölgesi için değerlendirilmesi ...	39
4.1.6 A bölgesi için ortalama doz eşdeğeri miktarı (herhangi bir saatte).....	43
4.1.7 Tedavi kontrol alanının D bölgesi için birincil bariyer .....	45
4.1.8 B bölgesi ikincil bariyeri .....	46
4.1.9 E bölgesi ikincil bariyeri .....	49
4.1.10 Labirent kapısında sızıntı ve saçılan radyasyon .....	53
4.1.10.1 Duvardan saçılan radyasyon bileşeni $H_S$ .....	53
4.1.10.2 Cihazın kafasından sızıp duvardan saçılan radyasyon bileşeni, $H_{LS}$ .....	54
4.1.10.3 Hastadan saçılan radyasyon bileşeni $H_{ps}$ .....	55
4.1.10.4 Cihaz kafasından sızıp labirent duvarından geçen radyasyon , $H_{LT}$ .....	56
4.1.10.5 Saçılma ve sızıntı radyasyondan dolayı oluşan toplam doz eşdeğeri, $H_{tot}$	57
4.1.11 Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının labirent kapısındaki doz eşdeğeri .....	57
4.1.12 Labirent kapısındaki nötron doz eşdeğeri .....	59
4.1.13 Labirent kapısı için zırhlama .....	60
5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	62
KAYNAKLAR .....	63
EK 1 ZIRHLAMADA KULLANILAN MALZEMELER İÇİN HVL VE TVL DEĞERLERİ DOZ EŞDEĞERİ .....	64
EK 2 HESAPLAMALARDA KULLANILAN ÇİZELGELER.....	66
ÖZGEÇMİŞ .....	75



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\alpha$	Yansıma katsayısı
$\beta$	Cihazın başlık zırhından geçen nötronlar için geçiş faktörü
$\theta$	Hastadan saçılan radyasyon için saçılma açısı
$\sigma$	Termal nötron reaksiyonları için kesit değeri
$\varphi_A$	İzomerkezdeki birim dozda soğrulmuş x ışınının her hangi bir noktadaki toplam nötron akısına oranı ( $n m^{-2} Gy^{-1}$ )
$\phi(E)$	Nötron akısının enerjeye bağlı fonksiyonu ( $n cm^{-2}$ )
$\dot{\phi}(E)$	Hedeften 1 metre uzaklıktaki nötron akısı oranı
$\Omega$	Maksimum ışın demetinin tam açısı
A	Atom numarası
$A_0$	Birincil saçılma yüzeyindeki ışın demeti alanı
$A_1$	Labirent kapısından görülebilen duvar alanı
$A_Z$	Birincil bariyerden görülen labirentin iç girişinin kesit alanı
$\alpha(\theta)$	Saçılma fraksiyonu veya belli bir açıyla hastadan saçılan birincil ışın demetinin soğrulmuş doz fraksiyonu
ALARA	Gerekçeli olarak verilebilecek en düşük doz
B	Geçiş faktörü veya bariyer geçişi
$B_{conc}$	Beton için geçiş faktörü
BD-100R	Eşik enerjisi 100 keV olan detektör cihazı
BD-PND	Personel nötron dozimetresi detektör cihazı
BDS	Spektrometre detektör cihazı
BDT	Termal detektör cihazı
$B_L$	Sızıntı radyasyonun geçiş faktörü
$B_{pb}$	Kurşun için geçiş faktörü
BPE	Bor Poli Etilen
$B_{pri}$	Birincil bariyerin geçiş faktörü
$B_{ps}$	Hastadan saçılan radyasyon için bariyer geçiş faktörü
$B_{steel}$	Çelik için geçiş faktörü
$B_T$	Herhangi bir bariyer için toplam geçiş faktörü

$B_{xs}$	Fotonlar için çatı zırhlama geçiş faktörü
$C$	Kalibrasyon sabiti
$C_{corr}$	Hesapların düzeltilmiş değeri
$C_1$	IMRT faktörü
$C_n$	Hesapların ölçülen değeri
$C_{QA}$	Kalite güvenlik faktörü
$d$	Mesafe (herhangi bir uzaklık)
$D$	Soğrulmuş doz
$d_0$	Kersey Metodunda kullanılan 1,41 metrelik mesafe
$d_h$	Hedekten ilk yansıma yüzeyine olan dik uzaklık
$d_{hd}$	Cihazın başlığından labirent kapısına olan uzaklık
$d_i$	Hedekten çatının 2 metre yukarısındaki bir noktaya olan düşey uzaklık
$d_L$	Sızıntı radyasyondan korunan bir noktanın izomerkeze uzaklığı
$d_{LS}$	Labirentin orta çizgisinin $A_1$ alanında kestiği noktanın x ışını hedefine olan uzaklığı
$D_o$	İzomerkezdeki haftalık x ışınının soğrulmuş dozu (cGy/hafta)
$\dot{D}_O$	Hedekten 1 metre uzaktaki soğrulmuş doz çıkış değeri (Gy/saat)
$\dot{D}_O$ (MU)	Cihazın ışın üretim değeri (MU/saat)
$d_{pp}$	Duvarla izomerkez arasındaki dik uzaklık
$D_{pre}$	Her fraksiyonda salık verilen soğrulmuş doz
$d_{pri}$	Hedef ile korunan nokta arasındaki mesafe
$d_r$	Birinci yansıma yüzeyinin merkezinin, labirentin orta çizgisindeki b noktasına olan uzaklığı
$d_s$	İzomerkezden uzaklık
$d_{sca}$	X ışını kaynağının hastaya ve saçılma yüzeyine olan uzaklığı
$d_{sec}$	Işının saçıldığı noktadan korunan noktaya olan uzaklık
$D_T$	Bir doku ya da organdan ortalama soğrulan doz
$d_{TBI}$	Tüm vücut ışınlanması tedavisinin uzaklığı
$D_{TBI}$	Tüm vücut ışınlanması tedavisi alan hasta için haftalık soğrulmuş toplam doz
$d_z$	Labirentin orta çizgisi üzerindeki b noktasının labirente olan uzaklığı

$d_{zz}$	Labirent boyunca gelen saçılan herhangi bir radyasyonun labirent boyunca kapıya olan uzaklığı
$E$	Etkin doz
$E_n$	Nötron enerjisi
$\bar{E}_n$	Ortalama nötron enerjisi
$E_Q$	Herhangi bir termal nötron reaksiyonu için salınan kinetik enerji
$E_{th}$	Etkili fotonlar için eşik enerjisi
$f$	Hastadan geçen birincil ışın demetinin fraksiyonu
$f(\theta)$	Çatıdan saçılan fotonların açısal dağılımı
$F$	1 metredeki hastanın orta derinliğinin alanı
$F_{max}$	İzomerkezdeki maksimum alan
$G$	Gantri açısı
$H$	Doz eşdeğeri
$H_0$	Hedeyden $d_0$ uzaklıktaki toplam nötron dozeşdeğerinin izomerkezde soğrulmuş doza birim oranı
$H^*(10)$	10 mm'lik bir derinlikteki sarılmış eşdeğer doz
$\dot{H}$	Doz eşdeğeri oranı
$h_\phi$	İzomerkezde birim dozda soğrulan x ışını için labirent kapısının dışında nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının doz eşdeğeri
$h_\phi(E)$	Fonksiyona çevrilen sarılmış doz eşdeğerinin akısı
$H_{cg}$	Labirent kapısında nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının haftalık doz eşdeğeri
$H_G$	Labirent kapısında haftalık toplam doz eşdeğeri
$H_{LS}$	Cihazın başlığından sızan radyasyonun odada saçılmasından dolayı oluşan haftalık doz eşdeğeri
$H_{LT}$	Labirentin iç duvarından geçen sızıntı radyasyonun oluşturduğu haftalık doz eşdeğeri
$H_{MU}$	Her monitör unit için doz eşdeğeri
$H_{MU,L}$	Verilen her MU da sızıntı radyasyonun doz eşdeğeri
$H_{MU,ps}$	Her MU da fantomdan saçılan radyasyonun doz eşdeğeri
$H_{MU,total}$	Her MU da kısa aralıklarda ölçülen eşdeğer doz toplamı

$H_n$	Haftalık nötron doz eşdeğeri
$\dot{H}_n$	Nötron doz eşdeğeri miktarı
$H_{n,D}$	İzomerkezde birim dozda soğurulmuş x ışını için labirent girişindeki nötron doz eşdeğeri
$H_{ns}$	Tavan zırhının arkasındaki doz eşdeğerinin tavana gelen nötron akısına oranı
$H_p$	Labirent girişinde hastadan saçılan radyasyonun doz eşdeğeri
$H_{p,ht}$	Foton doz eşdeğeri
$H_{ps}$	Hastadan saçılan radyasyonun labirent kapısındaki haftalık doz eşdeğeri
$H_{ps,iso}$	İzomerkez tekniği ile hastadan saçılan radyasyonun doz eşdeğeri
$H_{ps,TBI}$	TBI tekniği ile hastadan saçılan radyasyon eşdeğeri
$\bar{H}_{pt}$	Geçilen bariyerin 30 cm uzağında her hasta tedavisi için ortalama doz eşdeğeri
$H_S$	Birincil ışın demetinin oda yüzeyinde saçılmasından dolayı oluşan haftalık doz eşdeğeri
$H_{sec}$	Saçılma ve sızıntı radyasyondan dolayı oluşan toplam doz eşdeğeri
$\dot{H}_{SS}$	Kenardan saçılan doz eşdeğeri miktarı
$H_T$	Herhangi bir organ veya dokuya karşılık gelen eşdeğer doz
$H_{Tot}$	Herhangi bir bariyerin arkasındaki toplam eşdeğer doz
$H_{tr}$	Geçen x ışınları için hesaplanmış doz eşdeğeri
$H_W$	Labirentin girişinin dışındaki haftalık toplam doz eşdeğeri (sızıntı ve saçılma radyasyon, nötronlardan dolayı oluşan gama ışını ve nötronlar)
HVAC	Isıtma, havalandırma ve hava ayarı
HVL	Yarı değer kalınlığı
IDR	Cihaz maksimum ışın verirken bariyerin 30 cm arkasındaki anlık doz eşdeğeri miktarı
$IDR_L$	İzomerkezde herhangi bir engel yokken ikincil bariyerlerin 30 cm arkasındaki bir noktada ölçülen anlık doz eşdeğeri miktarı
$IDR_{ps}$	Hastadan saçılan radyasyondan dolayı ikincil bariyerin 30 cm uzağındaki bir noktada ölçülen anlık doz eşdeğeri miktarı

$IDR_{ps}$	Fantom varken ikincil bariyerin 30 cm arkasındaki bir noktada ölçülen anlık doz eşdeğeri miktarı
$IMRT$	Yoğunluk ayarlı radyoterapi
IORT	İntraoperative radyoterapi
K	Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının doz eşdeğerinin toplam nötron akısına oranı
$K_a$	Hava Kerma
$L_f$	Cihazın kafasından sızan radyasyonun hedeften 1 metre uzağa oranı (miktarı)
$LET$	Lineer Enerji Transferi
M	Bir saat içinde tedavi edilen maksimum hasta sayısının bir saat içinde tedavi edilen ortalama hasta sayısına oranı
MU	Monitör Birimi (Monitör Unit)
$MU_{conv}$	Klasik(konvensiyonel) tedavi yöntemi için MU'nun soğrulmuş doza oranı
$MU_{IMRT}$	IMRT için ortalama MU nun tanımlanan soğrulmuş doza oranı
$n$	Ondabir kalınlık değerlerinin sayısı
$N_h$	Bir saatte tedavi olan ortalama hasta sayısı
$N_{max}$	Bir saatte tedavi olan maksimum hasta sayısı
$N_w$	Bir haftada tedavi olan ortalama hasta sayısı
$O_3$	Ozon
$P$	Zırhlama tasarımı
$P_r$	Saniyedeki nabız sayısı
$QA$	Kalite güvencesi (quality assurance)
$Q_n$	Cihazın kafasından yayılan nötronların kaynak gücünün izomerkezde soğrulan doza oranı
$r_\phi(E)$	Rem-metre karşılık gelen fonksiyon(Her birim akıya denk gelen)
R	Nötron üretim katsayısı
$R_h$	Herhangi bir saatteki ortalama doz eşdeğeri miktarı
$R_m$	Rem-metre karşılığı
$R_w$	Haftalık ortalama doz eşdeğeri miktarı
$S_0$	Labirentin iç girişinin kesit alanı
$S_1$	Labirent boyunca kesit alanı

$S_r$	Tedavi odasının yüzey alanı
$SRS$	Stereotaktik radyo cerrahi
$SRT$	Stereotaktik radyoterapi
$t$	Bariyer kalınlığı
$t_1$	Birinci beton dilimi kalınlığı
$t_2$	İkinci beton dilimi kalınlığı
$t_s$	Meyil kalınlığı (kavis)
$T$	Meşguliyet faktörü
$TADR$	Ortalama doz eşdeğeri miktarı
$t_{bariyer}$	Bariyer kalınlığı
$TBI$	Tüm vücut ışınlanması
$T_D$	Bitiş anı (ölü zaman)
$TLD$	Isıya duyarlı dozimetre
$T_p$	Puls genişliği
$TVD$	Onda bir kalınlık uzaklığı
$TVL$	Onda bir kalınlık değeri
$TVL_1$	Birinci onda bir kalınlık değeri
$TVL_e$	Denge (ortalama) onda bir kalınlık değeri
$TVL_n$	Nötronlar için betonun onda bir kalınlık değeri
$TVL_x$	Birincil x ışını demeti için betonun onda bir kalınlık değeri
$U$	Kullanım katsayısı
$U_G$	G duvarı için kullanım katsayısı
$U(G)$	Gantri açısının bir fonksiyonu olarak kullanım katsayısı
$U_{pri}$	Birincil bariyer için kullanım katsayısı
$U_{ps}$	Ölçü boyunca kullanılan gantri pozisyonu için kullanım katsayısı
$U_x$	Işınlamanın bariyere çarptığı anda x ışını üretme kullanım katsayısı veya zaman fraksiyonu
$v$	Hız
$W$	Radyoterapi malzemeleri için iş yükü (Haftalık izomerkeze gönderilen soğurulmuş doz) (Gy/hafta)
$W_{conv}$	Konvansiyonel teknik için izomerkezdeki toplam iş yükü (Gy/hafta)

$W_{IMRT}$	Yoğunluk ayarlı radyoterapi için izomerkezdeki toplam iş yükü (Gy/hafta)
$W_L$	Sızıntı radyasyon için iş yükü (Gy/hafta)
$W_L(MU)$	Sızıntı radyasyon iş yükü (MU/hafta)
$W(MU)$	Birincil ışın iş yükü (MU/hafta)
$W_{pri}$	Birincil bariyer haftalık iş yükü (Gy/hafta)
$W_{ps}$	Hastadan saçılan radyasyon iş yükü (Gy/hafta)
$W_{ps}(MU)$	Hastadan saçılan radyasyon iş yükü (MU/hafta)
$W_{QA}$	Kalite güvenlik teknikleri için İzomerkezdeki toplam iş yükü (Gy/hafta)
$w_R$	Radyasyon ağırlık katsayısı
$w_T$	Her organ veya doku için doku ağırlık katsayısı
$W_{TBI}$	Tüm vücut ışınlaması iş yükü
$WU]_{pri}$	Birincil bariyer için iş yükü kullanım katsayısı çarpımı
$WU]_{wallscat}$	Saçılan radyasyon duvarı için iş yükü kullanım katsayısı çarpımı
$W_x$	x ışınları için 1 metredeki iş yükü (Gy/hafta)
$X_R$	Çatının üst kısmındaki demetin merkezinden söz konusu olan noktaya uzaklık
$Z$	Atom numarası

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Birincil ve ikincil radyasyon.....	6
Şekil 3.1 Temel zırhlama şeması.....	10
Şekil 3.2 Linac cihazlarında 10 MeV'den yüksek fotonların foto nötron üretim şeması.....	11
Şekil 3.3 Eğik duvar kalınlığı ( $t_s$ ) ve normal kalınlık ( $t$ ) arasındaki bağıntı ( $t_s = t / \cos\Theta$ ).....	13
Şekil 3.4 (a) Birincil bariyer genişliği odanın içinde ise, (b) Birincil bariyer genişliği odanın dışında ise, (c) Birincil bariyer olarak kullanılan kurşun veya çelik malzeme duvarın içinde ise.....	14
Şekil 3.5 Kademeli bariyer. $t_m$ metal kalınlığı $t_1$ ve $t_2$ beton kalınlığı.....	16
Şekil 3.6 Hastadan saçılan ( $d_{sca}$ , $d_{sec}$ ) ve sızıntı radyasyon ( $d_L$ ) mesafelerini gösteren oda şekli.....	17
Şekil 3.7 Labirent kapısının zırhlanması için kullanılan parametreleri gösteren oda (Daha ayrıntılı bilgi için bkz. Şekil 4.1).....	19
Şekil 3.8 Nötron ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının labirent kapısının dışında oluşturduğu eşdeğer doz hesabı için basit bir mode.....	24
Şekil 3.9 Direkt zırhlanan kapılı oda planı.....	28
Şekil 3.10 Zırhlanmış kapının hatalı kullanımı.....	29
Şekil 3.11 Zırhlanmış kapının doğru kullanımı.....	29
Şekil 3.12 Zırhlama hesabı yapılan Linac (Electa Sinergy) cihazı.....	32
Şekil 4.1 Dual enerjili Linac cihazı odası ve labirenti için zırhlama örneği.....	33
Şekil 4.2 Zırhlamada kullanılan sıradan beton için duvar kalınlığı.....	61



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Radyasyon ağırlık faktörleri.....	2
Çizelge 2.2 Doku ağırlık faktörleri.....	3
Çizelge 2.3 Tavsiye edilen meşguliyet faktörleri.....	5
Çizelge 3.1 18 MV lik cihazların kapı ve labirent tipine göre labirent kapısı dışında ölçülen eşdeğer doz oranı.....	28

## 1. GİRİŞ

Hızla gelişen teknoloji den insanoğlu her alanda faydalanmaya başlamış ve onu ihtiyaç haline getirme eğilimi her geçen gün artarak devam etmiştir. Şüphesiz ki teknolojinin sağladığı kolaylıkların, katkıların ve avantajlarının yanında bir de ihmal edilemeyecek zararları bulunmaktadır. Kullanım alanı oldukça yaygınlaşan teknolojik yöntemlerden biri olan yüksek enerji (radyasyon), günümüzde tıpta, tarımda, endüstride, savunmada, enerjide ve daha pek çok alanda kullanılmaktadır. Doğada kararsız halde bulunan bir çekirdekten kaynaklanabildiği gibi yapay olarak da elde edilebilen radyasyon, dalga ve parçacık olmak üzere ikiye ayrılır. Radyasyon, taşıdığı yüksek enerjiden dolayı kontrollü bir şekilde kullanılmadığında somatik ve ya genetik gibi olumsuz etkilerde bulunabilir. Bunun için “radyasyondan korunma ilkesi” radyasyonun kullanım alanlarında çok önemli bir yer tutmaktadır. Radyasyondan korunmanın üç temel ilkesi vardır. Bunlar; zaman, mesafe ve zırhlamadır. Bu tezin amacı radyasyondan korunma prensiplerinden biri olan zırhlamanın önemi ve zırhlamadaki hesaplamalar üzerine bilgi vermektir.

Zırhlamanın amacı, halkın ve çalışanların maruz kaldıkları radyasyon sınırını kabul edilebilir seviyelerde tutmaktır. Zırhlamada kullanılacak duvarın malzeme tipi ve kalınlığı zırhlanacak cihazın enerji miktarına, kullanım şekline göre değişiklik gösterir. Bu çalışmada kullanılan terimlerde ve yapılan hesaplamalarda Radyasyondan Korunma ve Ölçüm Ulusal Konseyi'nin (National Council on Radiation Protection and Measurement) NCRP-151 no'lu raporu ve Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının (IAEA) SRS-47 no'lu güvenlik raporu (Safety Reports Series) temel alınmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Eşdeğer Doz

Doz eşdeğeri, soğrulan doz ile ona ait radyasyon ağırlık faktörünün çarpılması sonucu elde edilir (bkz. çizelge 2.1). Özel Birimi Rem (Röntgen Equivalent Man), SI Birimi ise Sievert (Sv)'dir. Rem: Bir röntgenlik x ve gama ışını ile aynı etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır. Sievert: 1 Gray'lık (j/kg) x ve gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren radyasyon miktarıdır (Anonim, 2011).

Rem = Soğrulan Doz x Faktörler

$$1 \text{ Rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem} = 1 \text{ J/kg}$$

Eşdeğer doz,

$$H = \sum_r W_R \times D_T \quad (2.1)$$

formülü ile bulunur. R radyasyon için ağırlık faktörü, T organ,  $D_T$  soğrulan doz,  $W_R$  ise radyasyon ağırlık faktörüdür (Anonim, 2011).

Çizelge 2.1 Radyasyon ağırlık faktörleri

Radyasyon Tipi	Radyasyon Ağırlık faktörü $w_R$
Fotonlar	1
Elektronlar Müonlar	1
Protonlar Yüklü Pionlar	2
Alfa parçacıkları, Filyon Ürünleri, Yüklü parçacıklar	20
Nötronlar	Nötron Enerjisine Bağlı sürekli bir fonksiyon

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

## 2.2 Etkin Doz

Etkin doz, eşdeğer dozların her biri uygun doku ağırlık faktörüyle çarpıldıktan sonra elde edilen toplam dozdur (bkz. çizelge 2.2). Etkin doz,

$$E = \sum_T W_T \times H_T \quad (2.2)$$

formülüyle bulunur.  $H_T$ , T dokusu için eşdeğer doz,  $W_T$ , T dokusu için ağırlık faktörüdür (Anonim, 2011).

Çizelge 2.2 Doku ağırlık faktörleri

Doku	Ağırlık Faktörü $W_T$
<b>Gonadlar</b>	0,2
<b>Kemik iliği, Bağırsak, Akciğer, Mide</b>	0,12
<b>Mesane, Meme, Karaciğer, Yemek borusu, Troid</b>	0,05
<b>Geri kalanlar</b>	0,07
<b>Toplam</b>	1

## 2.3 Zırhlama Tasarım Hedefi

Zırhlama tasarım hedefi (P), kontrollü ve kontrolsüz alanlarda çalışan personel ve toplum üyesi kişiler için tavsiye edilen etkin doz sınırlarını yakalamak ve bu şekilde binanın zırhlamasını tasarlamaktır. Radyoterapide kullanılan cihazların zırhlaması için takip edilen raporlarda belli standartlar vardır. Örneğin; cihazın bulunduğu ve zırhlaması yapılan oda duvarlarının kalınlığı ve bu duvarlarda kullanılacak madde tipi hesaplanırken kişilerin duvardan en yakın 0,3 m mesafe olacak şekilde geçtikleri kabul edilir. Ayrıca çalışanların ve toplum üyesi kişilerin maruz kalabileceği etkin doz sınırları hafta bazında değerlendirilmektedir (Anonymous, 2005).

### 2.3.1 Kontrollü alanlar

Kontrollü alanlar, erişimin sınırlı olduğu, çalışanların TLD dozimetre kullandığı veya radyasyondan korunma sorumlusu gözetiminde çalıştığı radyasyon miktarının düzgün

olarak ölçüldüğü alanlardır. Kontrollü alanlar için NCRP raporunun çalışanlara tavsiye edilen tasarım zırlama hedefinin eşdeğer doz cinsinden değeri 0,1 mSv/hafta (5 mSv/yıl) dır (Anonymous, 2005).

### **2.3.2 Kontrolsüz alanlar**

Kontrolsüz alanlar, ziyaretçilerin bulunduğu, hastaların dinlendiği ya da radyasyon kaynakları ile ilgisi bulunmayan çalışanların bulunduğu alanlardır. Ayrıca radyasyon bölgesine bitişik alanlar da kontrolsüz alanlar içinde kabul edilir. Kontrolsüz alanlar için NCRP raporunun çalışanlara tavsiye edilen tasarım zırlama hedefinin eşdeğer doz cinsinden değeri 0,02 mSv/hafta (1 mSv/yıl)'dır (Anonymous, 2005).

### **2.3.3 Zırlama tasarımında kabul edilen varsayımlar**

Zırlama tasarım; radyoterapi cihazlarının, zırlama tasarım hedefinin yukarıda verilen yıllık etkin doz değerlerinden düşük olacak şekilde zırlanmasıdır. Bunun için aşağıdaki varsayımlar kabul edilir:

- Hastanın, birincil ışın demetinin en az %30'unu soğurduğu kabul edilir.
- Tavsiye edilen duvar kalınlığı hesaplamalarında radyasyonun, duvara dik geldiği kabul edilir. Çünkü fotonlar ve nötronlar bariyerden rahatça geçecek özelliktedir.
- Radyoterapi cihazlarındaki sızıntı maksimum kabul edilip hesaplara dahil edilir.
- Meşguliyet faktörü kontrolsüz alanlar için olduğundan yüksek alınır. Örnek olarak ofiste çalışan insanların çok azı çalışma süresi boyunca ofiste durur. Buna rağmen meşguliyet faktörü ofis için 1 kabul edilir.
- Yürüyüş mesafesi zırlama duvarının 0,3 m uzağı kabul edilir.
- Hesaplamaların zor olduğu durumlarda güvenlik faktörü katsayısı kullanılır.
- İkili veya daha çok kaynağın bulunduğu durumlarda aktivitesi daha yüksek olan kaynak dikkate alınır (Anonymous, 2005).

### 2.3.4 İş yükü

İş yükü, kaynaktan 1 m uzakta soğurulan dozun, maksimum derinlikte soğurulan doza oranının zaman üzerinden integralidir. Periyot olarak 1 hafta alınır. Birimi Gy/ hafta'dır. 1m yerine herhangi bir  $d_2$ uzaklığındaki  $W_2$  iş yükü  $W_2 = W(1 m)^2/(d_2)^2$  ile bulunur. İş yükü değeri genel olarak haftalık izomerkeze yollanan fotonlardan soğurulan doz olarak alınır. Yani tedaviye giren ortalama hasta sayısının haftalık aldığı toplam dozdur. Dual enerjili makinelerin iş yükü yüksek olan enerjiye göre alınır (Anonymous, 2005).

### 2.4 Kullanım Faktörü

Kullanım faktörü (U) birincil demet iş yükünün herhangi bir birincil bariyer yönünde kullanım sıklığını veren faktördür (Anonymous, 2005).

### 2.5 Meşguliyet Faktörü

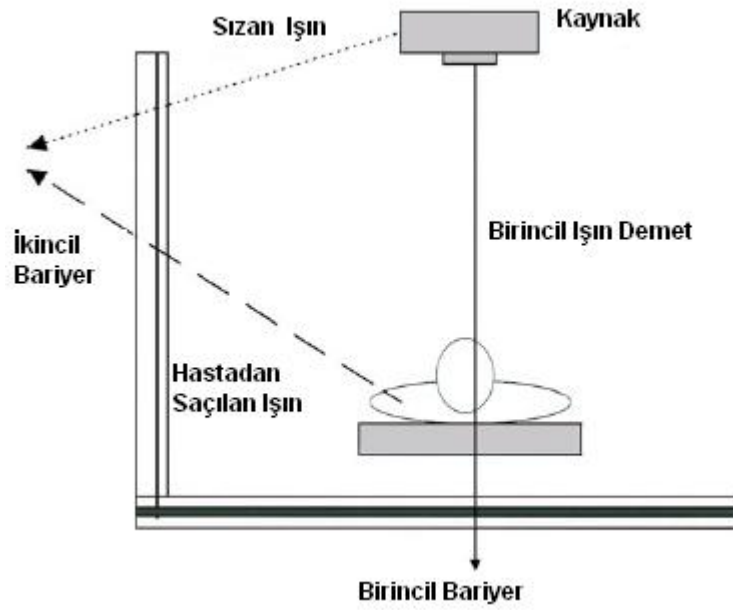
Meşguliyet faktörü (T) ışın verilirken maruz kalınan bariyerin arkasındaki yerin ne kadar sıklıkla kullanıldığını belirten ortalama faktördür. Çizelge 2.3'te tavsiye edilen meşguliyet faktörleri verilmiştir. Tesis, kullanım sıklığına göre çizelgedeki değerleri değiştirebilir (Anonymous, 2005).

Çizelge 2.3 Tavsiye edilen meşguliyet faktörleri

Bölge	Meşguliyet Faktörü (T)
Sürekli meşgul alanlar (Sekreterlik, hemşire odası, bekleme odası, tedavi kontrol odası)	1
Tedavi odası, muayene odası	1 / 2
Koridorlar, çalışan salonu, personel dinlenme odası	1 / 5
Kapı tonozu	1 / 8
Umumi tuvaletler, depolar, açık alanlar, tavan araları, hasta bekleme odası, çalışan dolapları	1 / 20
Otopark alanları, merdivenler, asansörler	1 / 40

## 2.6 Koruyucu Bariyerler

Radyoterapi uygulamalarında radyasyon, birincil ve ikincil radyasyon olmak üzere ikiye ayrılır (şekil 2.1). Birincil radyasyon (yararlı radyasyon), hastayı tedavi etmek için hastaya direkt yollanan demettir. Bunu durdurmak için birincil bariyer kullanılır. Birincil bariyer tavan, zemin ya da duvar olabilir. İkincil radyasyon, kaynaktan sızan ve hastadan saçılan radyasyonları içerir. Bunları durdurmak için de ikincil bariyerler kullanılır. Bu bariyerler de tavan, zemin ve duvar olabilirler (Anonymous, 2005). Bu bariyerle ilgili detaylı bilgi bölüm 3'te verilecektir.



Şekil 2.1 Birincil ve ikincil radyasyon

## 2.7 Temel İlkeler

Maruz kalınan birincil ve ikincil radyasyonu azaltmak için aşağıdaki yöntemlerden bir veya birkaçına başvurmak gerekir (Anonymous, 2005).

- Kişi ile radyasyon kaynağı arasındaki mesafeyi arttırmak.
- Radyasyona maruz kalma zamanını kısıtlamak.
- Kişi ve radyasyon kaynağı arasına uygun zırh koymak.

## **2.8 Stratejik Zırlama Planı**

Cihazın bulunduğu odanın tasarımı uzman mimar ve mühendisler tarafından yapılmalıdır. Maliyetin düşük olması için zemin katlar tercih edilmelidir. Ayrıca projede aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir (Anonymous, 2005).

- Planlama ve Bütçeleme
- Programlama
- Şematik (Ön) Tasarım
- Tasarım Geliştirme
- İnşaat Belgesi Hazırlama
- Yapı Denetim

## **2.9 İnşaat Detayları ve Kullanılacak Malzeme Özellikleri**

### **2.9.1 İnşaat detayları**

Cihazın kullanılacağı yer inşa edilirken maliyetlerin minimum olması için bazı ilkelere dikkat etmek gerekir. Bu sebeple inşa esnasında daha sonradan herhangi bir sorunla karşılaşmamak için gerekli öngörülerde bulunmak ve malzeme seçiminde iyi bir araştırma yapmak gerekir. İlk olarak cihazın kullanılacağı yere değinecek olursak genelde zemin katlar tercih edilmelidir. Böylelikle zırlama alanlarını, cephelerini daha aza indirmiş oluruz. İkincisi, tedavi odasının ölçüleri radyoterapi cihazının kurulumu için gerekli olan şartları sağlayacak büyüklükte olmalıdır. Üçüncüsü, cihazın bulunduğu odada gerekli uyarı levha ve ışıkları uygun şekilde bulundurulmalı ve konumlandırılmalıdır. Son olarak kontrol odasında sürekli çalışanlar bulunduğundan ALARA (As Low As Reasonably Achievable) ilkesine uygun olacak şekilde inşa edilmelidir (Anonymous, 2005).

### **2.9.2 Kullanılacak malzeme özellikleri**

Mega voltaj büyüklükteki enerjilerden korumak için kullanılan koruyucu bariyerler genelde metre büyüklüğündeki beton duvarlardır. Ancak bununla birlikte bazı



durumlarda aynı etkiyi yapabilecek başka malzemeler de kullanılabilir. Bu durum özellikle yer sıkıntısının yaşandığı dar alanlarda kalın beton duvarlardan kaçınıldığında uygulanır. Genel olarak kütle ve atom numarası büyük malzemeler x-ışınını, hidrojen bakımından zengin materyaller de nötronu zırlamak için kullanılır. Bu amaç için sıklıkla kullanılan materyaller: Sıradan beton, ağır beton, kurşun, çelik, polietilen ya da parafin, toprak ve ağaçtır (ek 2 çizelge 3) (Anonymous, 2005).

### **2.9.2.1 Sıradan beton**

Betonun pek çok avantajı vardır ve genelde en çok kullanılan malzemedir. Akışkan olduğundan dolayı istediğimiz şekli elde edebilir ve bu sayede istenilen şekil verilebilir. İyi bir x-ışını ve nötron zırhlama maddesidir. Çok yaygın olduğundan maliyeti diğer materyallere göre yarı yarıya düşürür. Sıradan betonun özkütlesi ortalama  $2.35 \text{ g/cm}^3$ 'tür.  $\text{Cm}^3$ 'ünde  $0.8 \times 10^{22}$ - $2.4 \times 10^{22}$  hidrojen atomu bulunur (Anonymous, 2005).

### **2.9.2.2 Ağır beton**

Ağır beton radyoterapi odalarının zırhlanmasında sık kullanılan malzemedir. Özkütlesi  $2.35 \text{ g/cm}^3$ 'ten büyük olan betonlar ağır beton olarak kabul edilir. Kullanım yerine göre içine özkütlesi daha yoğun maddeler konularak özkütlesi arttırılabilir ya da azaltılabilir. Konulan maddeler genellikle demir cevherleri, hematit ve ilmenit, baryum mineralleridir. Demir cevherleri kullanıldığında özkütle  $5,2 \text{ g/cm}^3$ , baryum mineralleri kullanıldığında özkütle  $4,4 \text{ g/cm}^3$  civarında olur. Ağır betonun dezavantajı pahalı olması ve kullanım zorluğudur. Avantajı ise daha ince birincil duvarlar elde etme imkânı sağlar. Bu yüzden bazı yerlerde birincil duvar malzemesi olarak ağır beton ikincil duvar malzemesi olarak normal beton kullanılır (Anonymous, 2005).

### **2.9.2.3 Kurşun**

Kurşunun yoğunluğu çok fazladır ( $11 \text{ g/cm}^3$ ). Çok iyi bir gama ve x-ışını zırhlama malzemesidir. Tuğla, yaprak ve levha gibi değişik formları mevcuttur. Kurşun yumuşak olduğu için tek başına kullanılamaz. Esnek çarpışma yardımı ile hızlı nötronların

enerjisini düşürür. 5 MeV'in altındaki nötronlar için esnek çarpışma keskin bir şekilde düşmektedir. Kurşun, zehir ihtiva ettiğinden beton ya da alçı ile kaplanması gerekir (Anonymous, 2005).

#### **2.9.2.4 Çelik**

Çelik, betona göre daha maliyetlidir ancak kurşun gibi toksik içermez. Özkütlesi  $7,8 \text{ g/cm}^3$ 'tür. X ve gama ışınına karşı koruma bakımından kurşundan daha az, betondan daha çok etkilidir. Nötronların enerjisini de inelastik çarpışmayla azaltır. Çelik iyi bir zırhlama malzemesidir. Kurşuna göre daha az maliyetlidir (Anonymous, 2005).

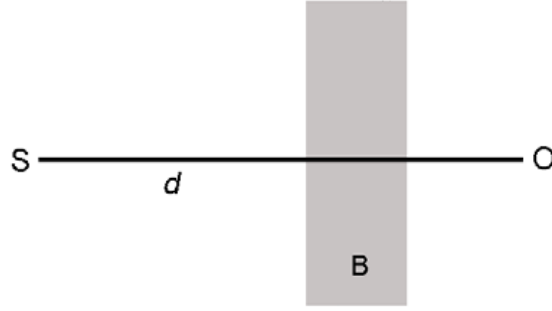
#### **2.9.2.5 Polietilen ve parafin**

Bu iki malzeme birbirine benzediğinden birlikte değerlendirilir. İkisi de % 14,3 hidrojen içerir. Parafin polietilenden biraz daha ucuzdur fakat özkütlesi daha düşük ve yanıcı bir madde olduğundan bariyer yapımında pek tercih edilmez. Nötron zırhlaması bakımından polietilen en iyi malzemedir. Hem saf halde bulunur hem de boronla değişik oranlarda zenginleştirilmiş hallerde bulunabilir. Boronla zenginleştirilmesinin sebebi nötron yakalama olayını arttırmaktır. Bu yüzden özellikle kapı zırhlamalarında tercih edilir. İmal edilmesi kolay olan standart BPE'ler ağırlıkça % 5 bor içerir (Anonymous, 2005).

### 3. HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

#### 3.1 Temel Kavramlar

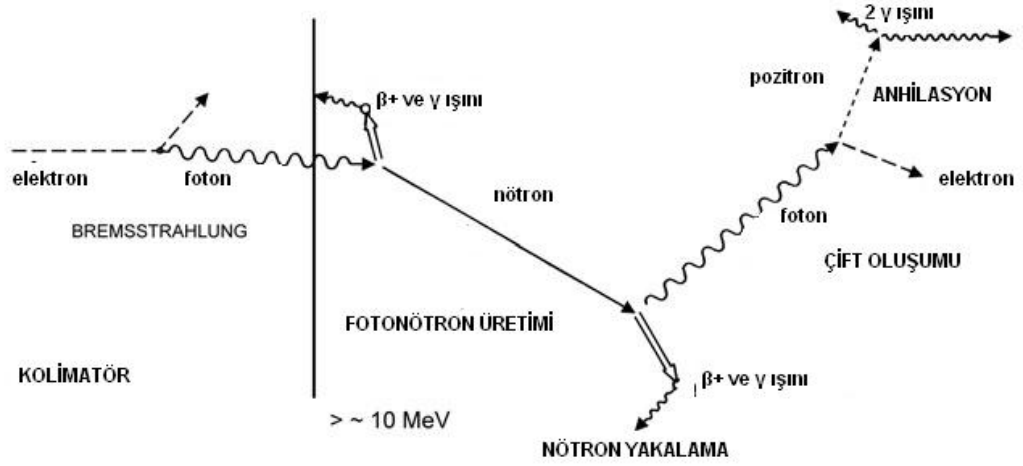
Radyoterapide zırhlama tasarımı için gerekli formüller ilk olarak 1925'te Mutscheller tarafından ortaya atıldı, daha sonra NCRP tarafından sadeleştirildi. Temel mantık şekil 3.1'de şematize edilmiştir. S kaynağından çıkan ışının B bariyerinin arkasındaki d kadar uzaklıktaki O bölgesinde radyasyondan kaynaklı oluşacak P hedeflenen etki, zırhlama tasarımı sonrasında istediğimiz sonuca eşit olmalıdır. Bu uygulamalarda ALARA ilkesi göz önünde bulundurulur (Anonymous, 2005).



Şekil 3.1 Temel zırhlama şeması

Elektronlar tarafından cihazda üretilen fotonlar bremsstrahlung fotonlarıdır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi nötronun bağlanma enerjisi 8 MeV'in üstünde enerjiye sahip olan fotonlar maddeden geçerken ikincil radyasyon olarak kabul edilen foto nötronlar üretirler. Foto nötron üretim süreci ( $\gamma, n$ ) hem kolimatörde hem de radyoterapi odasında gerçekleşir. Fakat belirgin bir foto nötron olayının gerçekleşmesi için enerjinin 10 MeV'in üzerinde olması gereklidir (Anonymous, 2005).

Daha önce belirtildiği gibi birincil ve ikincil bariyer olmak üzere iki çeşit bariyer vardır. Aşağıda bu bariyerlerle ilgili ayrıntılı bilgi verilmektedir.



Şekil 3.2 Linac cihazlarında 10 MeV'den yüksek fotonların foto nötron üretim şeması

## 3.2 Birincil Bariyerler

### 3.2.1 Standart yaklaşım

Birincil bariyerlerin temel amacı birincil ışık demetlerinden direkt kaynaklanan radyasyonun etkisini azaltmaktır. Diğer amaç ise ikincil radyasyonların bariyerin arkasındaki eşdeğer doz değerini azaltmaktır. Yeterli bir bariyer için eşdeğer doz değerinin P (zırhlama tasarım hedefi)'ni geçmemiş olması gerekir. Radyasyonu kabul edilebilir seviyeye düşürecek olan  $B_{pri}$  (birincil bariyer geçiş faktörü) denklem 3.1'de verilmiştir (Anonymous, 2005).

$$B_{pri} = \frac{P \cdot d_{pri}^2}{WUT} \quad (3.1)$$

- P = Haftalık olarak verilen ve bariyerin arkasından okunan zırhlama tasarım hedefi, eşdeğer doz olarak ifade edilir (Sv / hafta).
- $d_{pri}$  = Kaynak ile ölçümün yapıldığı nokta arasındaki uzaklık (m).
- W = İş yükü veya kaynaktan 1 m uzaklıkta soğrulan dozun haftalık değeri  $\left(\frac{Gy}{hafta}\right)^6$
- U = Kullanım katsayısı veya birincil ışın demetini direkt alan bariyerin iş yükü fraksiyonu

- T = Korunan bölgenin meşguliyet faktörü

Bariyer kalınlığı, kullanılan enerjiye ve zırhlamada kullanılan malzemeye bağlı olarak onda bir kalınlık değeri cinsinden ifade edilebilir ( bkz. ek 1’da şekil 1 ve şekil 2 ve ek 2’de çizelge 2). Bu durumda gerekli TVL sayısı (n):

$$n = -\log(B_{pri}) \quad (3.2)$$

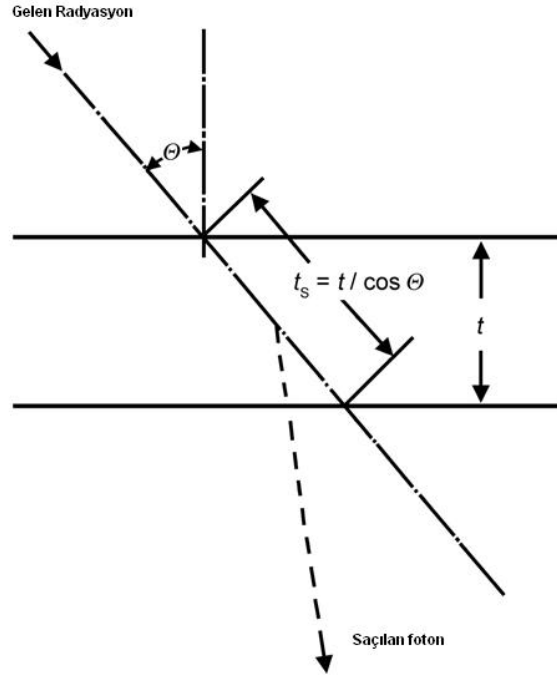
Ve bariyer kalınlığı ( $t_{bariyer}$ ):

$$(t_{bariyer}) = TVL_1 + (n - 1)TVL_e \quad (3.3)$$

İstenilen materyalin birinci ( $TVL_1$ ) ve denge ( $TVL_e$ ) onda bir kalınlıkları bariyerden giriciliğine göre radyasyonun tayfında değişikliklere sebep olur. Böylece eğer bariyer kalınlığı (t) birinci  $TVL_1$ ’den büyükse geçiş faktörü (B) aşağıdaki denkleme göre bulunur (Anonymous, 2005).

$$B = (10^{-1})10^{-\left[\frac{(t-TVL_1)}{TVL_e}\right]} = 10^{-\left\{1+\left[\frac{(t-TVL_1)}{TVL_e}\right]\right\}} \quad (3.4)$$

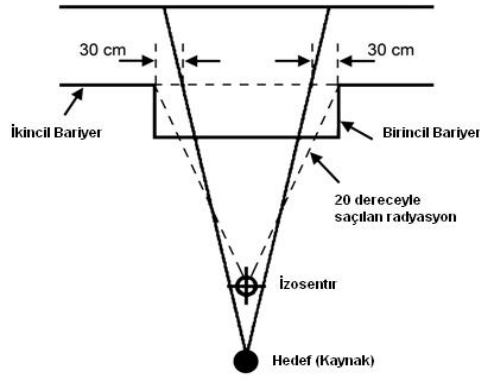
Birincil bariyer olarak kullanılan materyal beton ( bkz. sıradan ve ağır beton için bölüm 2.9.2.1 ve 2.9.2.2) ise, bariyerin tüm foto nötronları ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarını durdurduğu ve herhangi bir ek bariyere gerek olmadığı görülmüştür. Bu durum betonda yüksek oranda hidrojen bulunmasından ve hidrojenin nötronu soğurmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan eğer birincil bariyer olarak kullanılan materyal beton değilse bazı aşamalar gereklidir. Bunlar da bölüm 3.2.3’te görülecektir. Yukarıdaki denklemlerde radyasyonun birincil bariyerlere dik geldiği kabul ediliyor. Radyasyon eğik olarak geldiğinde ise gerekli kalınlık bulunan değerden daha az olacaktır. Bu farklılık (1) geliş açısına ( $\Theta$ ), (2) bariyerde kullanılan materyale (3) hedeflenen radyasyon doz eşdeğerine ve (4) radyasyonun enerjisine bağlıdır (Anonymous, 2005). Bariyerden saçılan radyasyon yoksa hesaplanan eğik duvar kalınlığı ( $t_s$ ) ve normal kalınlık (t) arasındaki bağıntı şekil 3.3’te gösterildiği gibidir



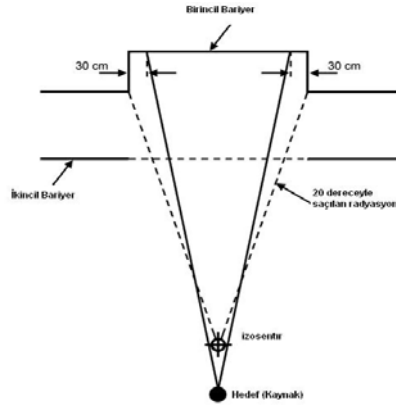
Şekil 3.3 Eğik duvar kalınlığı ( $t_s$ ) ve normal kalınlık ( $t$ ) arasındaki bağıntı ( $t_s = t / \cos \theta$ )

### 3.2.2 Bariyer genişliği

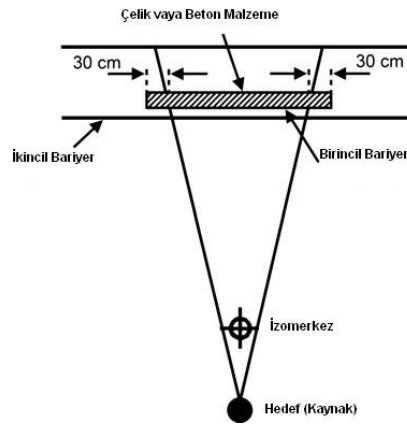
Zırhlama işlemlerinde birincil ışın için bariyer genişliği, köşegen büyüklüğü hesaplanarak en büyük kirişin alınması ve her iki yanına en az 30 cm eklenmesi genel bir kuraldır. Eğer birincil bariyerdeki çıkıntı odanın içindeyse ışının maksimum kirişi ikincil bariyerin iç kısmına denk getirilir (bkz. şekil 3.4.a). Eğer birincil bariyer çıkıntısı odanın dışındaysa ışının maksimum kirişi ikincil bariyerin dış kısmına denk getirilir (bkz. şekil 3.4.b). Eğer birincil bariyer betonla birlikte çelik yada kurşun karışımı olarak yapılmış ise ışının maksimum kirişi çelik yada kurşun kısmının 30'ar cm içine yapılır (bkz. şekil 3.4.c). Bu hesaplamalarda kolimatörün alanı  $(40 \times 40) \text{ cm}^2$  ve kaynağın izomerkeze olan uzaklığı 100 cm olarak kabul edilir (Anonymous, 2005).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.4 (a) Birincil bariyer genişliği odanın içinde ise, (b) Birincil bariyer genişliği odanın dışında ise, (c) Birincil bariyer olarak kullanılan kurşun veya çelik malzeme duvarın içinde ise

### 3.2.3 Kademeli bariyer (Sandviç bariyer)

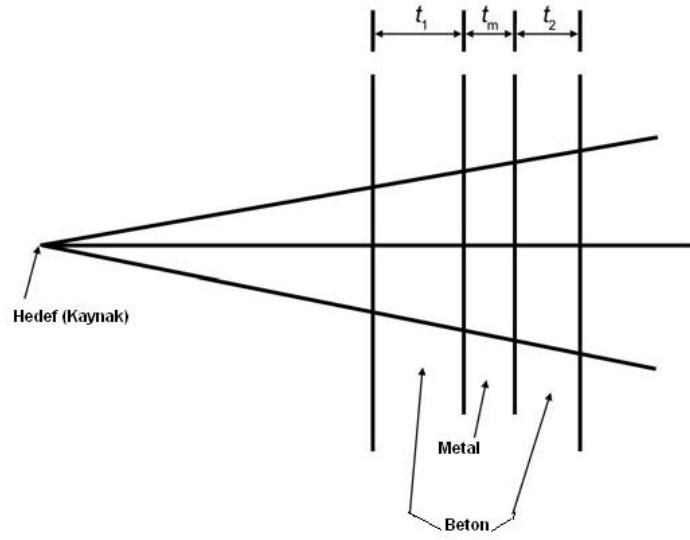
Birincil bariyer sıklıkla betondan oluşmasına rağmen her zaman sadece betondan oluşmaz. Özellikle yer sıkıntısının olduğu şartlarda betonla birlikte kurşun ve (veya) çelik de kullanılır. Bu durumlarda birincil ışın demeti için toplam geçiş faktörü her madde için ayrı ayrı bulunan geçiş faktörlerinin çarpımına eşittir (Örnek:  $B_T = B_{beton} \cdot B_{kurşun} \cdot B_{çelik}$ ). Ancak 10 MV den yüksek enerjiye sahip birincil ışınlarda foto nötronlar ve nötronlardan kaynaklı oluşan ışınlar için de ayrıca hesaplamalar yapılmalıdır. Eğer bu durum dikkate alınmaz ise foto nötronlardan kaynaklı sıkıntılar oluşabilir. Bu duruma ilk defa dikkat çeken McGinley'dir (Anonymous, 2005).

Aşağıdaki denklem, kolimatör maksimum açıkken kademeli bariyerin arkasında hesaplanan haftalık nötron doz eşdeğerini ifade eder (bkz. şekil 3.5).

$$H_n = \frac{D_o R F_{max}}{\left(\frac{t_m}{2} + t_2 + 0.3\right)} \left[ 10^{-\left(\frac{t_1}{TVL_x}\right)} \right] \left[ 10^{-\left(\frac{t_2}{TVL_n}\right)} \right] \quad (3.5)$$

- $H_n$  = Haftalık nötron doz eşdeğeri (  $\mu$ Sv/hafta)
- $D_o$  = İzomerkezdeki haftalık soğrulan x-ışını (cGy/hafta)
- $R$  = Nötron oluşma katsayısı ( $\mu$ Sv/cGy $m^2$ )
- $F_{max}$  = İzomerkezdeki maksimum alan ( $m^2$ )
- $t_m$  = Metal tabaka kalınlığı (m)
- $t_1$  = Birinci beton kalınlığı (m)
- $t_2$  = İkinci beton kalınlığı (m)
- $TVL_x$  = Birincil x-ışını için betonun ondan bir kalınlık değeri (m) (Ek 2 çizelge 2)
- $TVL_n$  = Betondaki nötronlar için ondan bir kalınlık değeri (m) (şekil 3)
- 0.3 = Bariyerin dışından bariyer ile meşguliyet bölgesi arasındaki uzaklık (m)





Şekil 3.5 Kademeli bariyer.  $t_m$  metal kalınlığı  $t_1$  ve  $t_2$  beton kalınlığı

Işının kurşun veya çelikten geçmesi sırasında oluşan nötronların birincil betonla (hidrojence zengin) etkileşmesi sonucunda gama ışınları üretilir. McGinley ve Butker'in (1994) 15 ve 18 MV enerjili fotonlarla, çelik ve betondan oluşan kademeli duvarlarda yaptıkları çalışmalardan sonra şu sonuca vardılar: Eğer geçen x-ışını doz eşdeğeri bileşeni  $H_{tr}$  2.7 ile çarpılırsa ( $H_{phtr}$ ) foton dozeşdeğeri için oldukça güvenilir bir sonuç verecektir. Böylece bariyer arkasındaki toplam doz eşdeğeri ( $H_{Tot}$ ):

$$H_{Tot} = H_n + H_{phtr} = H_n + 2.7 H_{tr} \quad (3.6)$$

$B_{pri}$  değeri bilindiğinde,  $H_{tr}$  değeri denklem 3.1'de P yerine  $H_{tr}$  konularak da bulunabilir. Eğer  $H_{Tot} > P$  ise hesaplama  $H_{Tot}$  zırhlama tasarım hedefine ulaşmaya kadar  $H_{tr}$  değeri azaltılarak hesap yinelenir (Anonymous, 2005).

### 3.3 İkincil Bariyerler

İkincil bariyerler cihaz odasının dışındaki kişileri, (1) sızıntı radyasyondan, (2) hastadan saçılan radyasyondan, (3) duvarlardan saçılan radyasyondan ve (4) ikincil radyasyondan (10 MV'den yüksek enerjili fotonlar için oluşan foto nötron ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışını) yeterince koruyacak şekilde tasarlanmalıdır.



Gantri açısının fonksiyonu olan U kullanım katsayısı 20 dereceden büyük olduğunda birincil radyasyondan kaynaklanan saçılma radyasyonun büyük bir kısmı bariyerden geçmeden dağılır. Çizelge 5 (a) ve çizelge 5 (b)'de verilen kurşun ve beton için TVL değerleri hastadan değişik açılarda ve değişik enerjilerde saçılan radyasyon değerleridir. Diğer malzemelerin TVL değerleri ek 2'nin çizelge 6'daki ortalama saçılma enerjilerine ve ek 1'in şekil 1 ve şekil 2'deki TVL değerlerine bakılarak hesaplanabilir (Anonymous, 2005).

Sadece sızıntı radyasyonun geçiş bariyeri ( $B_L$ ):

$$B_L = \frac{Pd_L^2}{10^{-3}WT} \quad (3.8)$$

Bu denklemde  $10^{-3}$  sabitinin kullanılmasının sebebi cihazdan çıkan yararlı radyasyonun % 0,1'nin sızıntı radyasyon olarak kabul edilmesinden kaynaklanıyor. Ayrıca  $d_L$  izomerkezden olan uzaklıktır. Ek 2 çizelge 7'de sıradan beton için sızıntı radyasyonun TVL değerleri verilmiştir. Bu çalışmada sızıntı radyasyon için iş yükü  $W_L=W$  olarak alınır.

Sızıntı ve saçılan radyasyonlar için ikincil bariyerlerin geçiş faktörleri bulunduktan sonra TVL değerleri (bkz. ek 2'deki çizelge 5 (a), (b) ve çizelge 7 veya ek 1'deki şekil 1 ve 2 ) kullanılarak gerekli zırhlama kalınlığı hesaplanır (Anonymous, 2005).

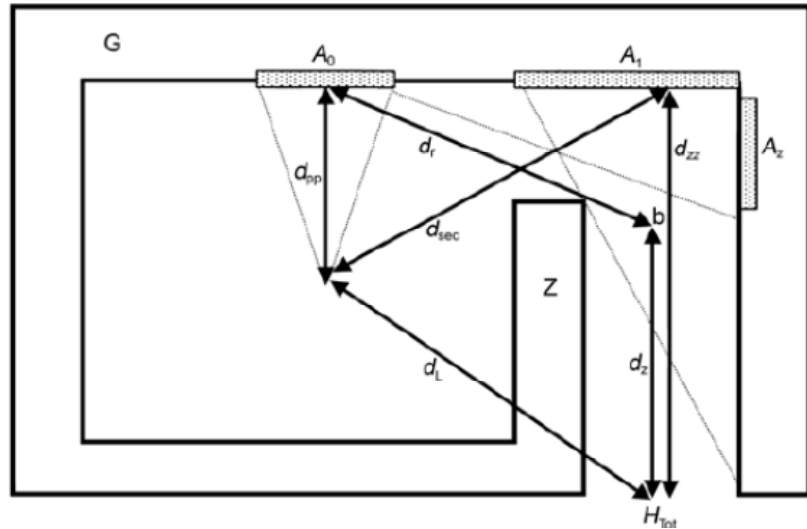
### 3.4 Kapılar ve Labirentler

Cihaz odasına girişlerde genelde bir labirent ikincil bariyer olarak mevcuttur. Bunun amacı, kapıya gelebilecek saçılan radyasyonun miktarını azaltıp, kapının daha ince yapılmasını sağlamaktır. Labirent tasarımında iki ayrı durum vardır. Saçılan radyasyonun akısından ve cinsinden dolayı,  $\leq 10$  MV ise düşük enerjili cihazlar,  $>10$  MV ise yüksek enerjili cihazlar olarak kabul edilir (Anonymous, 2005).

### 3.4.1 Düşük enerjili cihazlar

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi labirentler, odanın giriş kısmına gelen radyasyonu azaltmak için kullanılır. Böylece çok yoğun ya da kalın kapı kullanmaya gerek kalmaz. Bu metotta labirent kapısındaki doz eşdeğeri hesaplanırken ilk olarak ışının G duvarına dik geldiği kabul edilir. Daha sonra basit bir hesaplama yapılarak (ışının yukarı-aşağı, sağa-sola gittiğini varsayarak) labirent kapısındaki toplam doz eşdeğeri bulunur. Böylece istenilen doz eşdeğerini yakalayabilmek için gerekli olan zırh kalınlığı ve malzeme tipi belirlenir. Labirent kapısına gelen radyasyon; odanın yüzeylerinden ve hastadan saçılan fotonlar olduğu gibi kaynaktan gelip labirentin iç duvarından (Z duvarı) direk geçen miktardır aynı zamanda. Bunlar:

- $H_S$  = Odanın yüzeylerinden saçılan birincil radyasyonun haftalık doz eşdeğeri.
- $H_{LS}$  = Cihazın başlığından sızan radyasyonun odanın yüzeylerinden saçılıp kapıya gelen haftalık doz eşdeğeri.
- $H_{ps}$  = Birincil radyasyonun hastadan saçılıp kapıya gelen radyasyonun haftalık doz eşdeğeri
- $H_{LT}$  = Labirentin iç duvarından geçip kapıya gelen sızıntı radyasyonun haftalık doz eşdeğeri (Anonymous, 2005).



Şekil 3.7 Labirent kapısının zırhlanması için kullanılan parametreleri gösteren oda (Daha ayrıntılı bilgi için bkz. şekil 4.1)

Aşağıdaki denklem G duvarından saçılıp labirent kapısına gelen birincil radyasyonun haftalık doz eşdeğeri denklemidir.

$$H_S = \frac{WU_G\alpha_0A_0\alpha_ZA_Z}{(d_h d_r d_z)^2} \quad (3.9)$$

- $H_S$  = Odanın yüzeylerinde saçılan birincil radyasyonun haftalık doz eşdeğeri.
- $W$  = İş yükü (Gy/hafta)
- $U_G$  = G duvarı için kullanım katsayısı
- $\alpha_0$  =  $A_0$  duvarından saçılan birincil radyasyonun yansımaya katsayısı.
- $A_0$  = Işının birincil saçılma yüzey alanı ( $m^2$ )
- $\alpha_Z$  =  $A_Z$  yüzeyinden saçılan radyasyon için yansımaya katsayısı
- $A_Z$  = Labirentin iç kısmı olup radyasyonu doğrudan değil de, dolaylı alan yüzey ( $m^2$ )
- $d_h$  = İzomerkezden duvara (birincil yansımaya yüzeyi) dik uzaklık (artı 1 m) ( $d_{pp}$ )'ye eşittir (m)
- $d_r$  = Birincil yansımaya yüzeyinin merkezinden labirentin orta noktası b ye olan uzaklık (m)
- $d_z$  = Labirentin merkezi boyunca b noktasından kapıya olan uzaklık

McGinley (2002) raporunda odanın yükseklik-genişlik oranı 1-2 arasında olduğunu belirtmiştir. Bu durumun hesaplamasını NCRP (1997)'ye uygun olacak şekilde yapmıştır. [  $d_z / (\text{labirentin yüksekliği} \times \text{labirent genişliği})^2$  ] değeri 2-6 arasında olmalıdır (Anonymous, 2005).

Kaynağın kafasından sızan radyasyon G duvarının  $A_1$  yüzeyli kısmından saçılıp labirent kapısına gelebilir. Bu doz eşdeğerini hesaplamak için kullanılan denklem 3.10 aşağıda verilmiştir (Mcginley ve James 1997).

$$H_{LS} = \frac{L_f W_L U_G \alpha_1 A_1}{(d_{sec} d_{zz})^2} \quad (3.10)$$

- $H_{LS}$  = Cihazın kafasından sızan radyasyonun saçılıp labirent kapısına gelen haftalık doz eşdeğeri
- $L_f$  = Hedeften 1m uzaklıktaki radyasyonun cihazın kafasından saçılan radyasyona oranı (1/1000 )
- $W_L$  = Sızıntı radyasyon için iş yükü (Gy/hafta)
- $U_G$  = G duvarı için kullanım katsayısı
- $\alpha_1$  = Sızıntı radyasyonun G duvarından saçılması için yansımaya katsayısı
- $A_1$  = Labirent kısmını gören G duvarının alanı ( $m^2$ )
- $d_{sec}$  = Labirentin orta çizgisinin G duvarına değdiği nokta ile hedef (izomerkez) arasındaki mesafe (m)
- $d_{zz}$  = Labirentin orta çizgisinin uzunluğu( m)

Yansımaya katsayısı  $\alpha_1$  değerinin verilen x-ışınının enerjisine göre değişim grafiği ek 2'de çizelge 8 (a)'da verilmiştir.

Hastadan saçılan radyasyonun labirent kapısı için hesaplanması denklem 3.11'de verilmiştir (McGinley ve James, 1997).

$$H_{ps} = \frac{\alpha(\theta)WU_G\left(\frac{F}{400}\right)\alpha_1A_1}{(d_{sca}d_{sec}d_{zz})^2} \quad (3.11)$$

- $H_{ps}$  = Hastadan saçılan radyasyonun labirent kapısı için haftalık doz eşdeğeri
- $\alpha(\theta)$  =  $\theta$  açısıyla hastadan saçılan radyasyon için saçılma katsayısı (ek 2'de çizelge 4)
- $W$  = Birincil ışın için iş yükü (Gy/hafta)
- $U_G$  = G duvarı için kullanım faktörü
- $F$  = Bir metre uzaklıkta bulunan hastanın genişlik alanı ( $cm^2$ )
- $\alpha_1$  = Hastadan saçılan radyasyonun G duvarından yansımaya katsayısı
- $A_1$  = Labirent kısmını gören G duvarının alanı ( $m^2$ )
- $d_{sca}$  = Hasta ile hedef arasındaki mesafe

- $d_{sec}$  = Labirentin orta çizgisinin G duvarına değdiği nokta ile hedef (izomerkez) arasındaki mesafe (m)
- $d_{zz}$  = Labirentin orta çizgisinin uzunluğu (m)

Z duvarını geçen sızıntı radyasyon denklem 3.12'ye göre hesaplanır.

$$H_{LT} = \frac{L_f W_L U_G B}{d_L^2} \quad (3.12)$$

- $H_{LT}$  = Labirentin iç duvarına geçen sızıntı radyasyonun labirent kapısında oluşturduğu haftalık doz eşdeğeri
- $L_f$  = Kolimatörde üretilen radyasyonun sızıntı radyasyona oranı. Yararlı (tedavide kullanılan) ışın miktarının  $10^{-3}$ 'lük değeri
- $W_L$  = Sızıntı radyasyon için iş yükü ( Gy / hafta)
- $U_G$  = Gantri G duvarına yönlendiği zamanki kullanım katsayısı
- $B$  =  $d_L$  mesafesi boyunca gelen ışın için Z duvarından geçiş faktörü
- $d_L$  = Gantrinin merkezinden labirent kapısına Z duvarı üzerinden olan mesafesi (m)

Ayrı ayrı labirent kapısına gelen ışınların oluşturduğu eşdeğer doz oranları bulunduktan sonra bunların toplamı ile toplam eşdeğer doz ( $H_G$ ) bulunmuş olur.

$$H_G = fH_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT} \quad (3.13)$$

Burada G duvarına yönelmiş ışınların iş yükünün  $H_G$ 'nin hesaplanmasında kullanıldığı görülüyor ve (f)'de birincil ışının hastadan geçiş katsayısı olarak kullanılıyor. Örneğin f, 6-10 MV x-ışını için alan  $(40 \times 40) \text{ cm}^2$  ve  $(40 \times 40 \times 40) \text{ cm}^3$ 'lük fantom kullanıldığında  $\sim 0.25$ 'tir (McGinley ve James, 1997).

Sonuç olarak temel ışınların yönlerinin her biri için (0, 90, 180 ve 270 derece ) kullanım faktörü 1/4 iken labirent kapısında sızıntı radyasyon ve saçılma radyasyondan dolayı oluşan toplam doz eşdeğeri ( $H_{Tot}$ )  $4 H_G$  değil de  $2.64 H_G$  olarak hesaplanır ( McGinley).

$$H_{\text{Tot}} = 2.64H_G \quad (3.14)$$

Denklem 3.14, cihaz şekil 3.7’de bulunan oda yapısına sahipse kullanılabilir.  $[2 < d_{zz} / \sqrt{(\text{labirent genişliği} \times \text{labirent yüksekliği})} < 6$  ve  $1 < (\text{labirent yüksekliği} / \text{labirent genişliği}) < 2$ ].

Düşük enerji ( $\leq 10$  MV) üreten cihazlar için eğer labirentin iç duvarı çok ince ise bu durumda sızıntı radyasyon geçiş faktörü çok fazla olacağından sadece  $H_{LT}$ ’yi durdurmaya yetecek kadar zırlama yapmak yeterli olacaktır.

Yüksek enerji ( $10$  MV  $<$ ) üreten cihazlar için yukarıda kullanılan hesaplamalar geçerli olmakla birlikte foto nötronlar ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınları için ayrıca aşağıdaki hesaplamalar yapılmalıdır (Anonymous, 2005).

### 3.4.2 Yüksek enerjili cihazlar

Yüksek enerji üreten cihazların olduğu odalardaki labirentler için şekil 3.8’deki gibi A-B arası mesafe  $> 2.5$  m ise nötronlardan dolayı oluşan gama ışınları saçılan fotonlardan çok daha fazla etki gösterir. Bu yüzden yüksek enerjili cihazların bulunduğu odaların kapıları zırlanırken foto nötronlar ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarını önleyecek kalınlıkta ve tipte malzeme kullanılmalıdır (Anonymous, 2005).

#### 3.4.2.1 Labirent kapısında foton eşdeğer doz hesaplaması

Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının eşdeğer doz hesabı için kullanılan metotlardan biri McGinley tarafından bulunmuştur (1995). Bunu veren denklem aşağıdaki gibidir (Anonymous, 2005).





- $\beta$ = Cihazın kafasındaki zırhtan giren nötronlar için geçiş katsayısı (kurşun için:1, tungsten için:0,85)
- $d_1$ = Şekil 3.8’de izomerkezden A noktasına olan uzaklık (m)
- $Q_n$ = Cihazın kafasından yayılan nötronların izomerkezde soğrulan doza oranının kaynak gücü
- $S_r$ = Tedavi odasının toplam yüzey alanı ( $m^2$ )

$1/2\pi$  katsayısı da labirente giren nötronların katsayısıdır. Nötron kaynak gücü ( $Q_n$ )’in bazı cihazlar ve enerjiler için değeri ek 2’deki çizelge 9’da verilmiştir.

Nötronlardan dolayı oluşan kapıdaki haftalık doz eşdeğeri ( $H_{cg}$ )(Sv/hafta) sızıntı radyasyonun iş yükü ile  $h_\varphi$  çarpımına eşittir (Anonymous, 2005).

$$H_{cg}=W_L h_\varphi \quad (3.17)$$

### 3.4.2.2 Labirent kapısındaki nötron doz eşdeğeri

10 MV’nin üzerinde enerji üreten medikal cihazların labirent kapılarında, fotonlara ek olarak nötrondan dolayı da zırhlama yapılmalıdır. Labirent kapısında oluşan nötron doz eşdeğeri kolimatörün hareketinden fazla etkilenmez çünkü nötronların büyük bir kısmı kolimatörün içinde oluşur (Mao vd. 1997;Kase vd. 1998). Oluşan nötronlar gantrinin açısından ve pozisyonundan etkilenir. Örneğin, McGinley ve Butker (1991), Şekil 3.8’de gantri konumu 1 ve 3 pozisyonunda iken nötron oluşumu en fazladır (Anonymous, 2005).

#### 3.4.2.2.1 Kersey’s metodu

Kersey, labirent girişinde nötron oluşumunu ilk değerlendirenlerden biridir (1979). Onun formülünde etkin nötron kaynağı pozisyonu cihazın izomerkezinde olacak şekilde alınır. Böylece nötron doz eşdeğeri ( $H_{n,D}$ ) denklem 3.18’deki gibi olur.

$$H_{n,D}=(H_0) \left(\frac{S_0}{S_1}\right) \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^2 10^{-\left(\frac{d_2}{5}\right)} \quad (3.18)$$

Bu formülde ( $H_0$ ),  $d_0$  noktasındaki toplam doz eşdeğeridir (bkz. ek 2 çizelge 9).  $S_0/S_1$  oranı labirentin iç yüzeyi ile giriş yüzeyi alanları oranıdır (bkz. şekil 3.8).  $d_1$  de izomerkezden, izomerkezin labirentin orta doğrusunda gördüğü ilk noktaya olan uzaklıktır.  $d_2$ , A-B arası uzaklıktır. Kersey'in bu tekniği 1991 yılında McGinley ve Butker tarafından biraz geliştirilmiştir (Anonymous, 2005).

#### 3.4.2.2.2 Geliştirilmiş Kersey metodu

McGinley ve Huffman'ın Kersey denklemi üzerine yaptıkları çalışmalar sonucu labirent boyunca oluşan nötron doz eşdeğeri için daha iyi bir denklem bulmuşlardır.

$$H_{n,D}=2.4 \times 10^{-15} \varphi_A \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \left[ 1.64 \times 10^{-\left(\frac{d_2}{1.9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} \right] \quad (3.19)$$

- $H_{n,D}$  = Labirent girişindeki nötron doz eşdeğeri ( $Sv \text{ n}^{-1}m^2$ )
- $\varphi_A$  = Nötron akısı ( $m^{-2}/ Gray$ )
- $S_0/S_1$  = Labirentin iç yüzey alanının labirentin uzunluk yüzey alanına oranı
- $TVD$  = Onda bir kalınlık değeri (m),  $S_1$  kareköküyle doğru orantılı olarak değişir

$$TVD=2.06\sqrt{S_1} \quad (3.20)$$

Nötron cinsinden kapıdaki haftalık doz eşdeğeri ( $Sv/hafta$ ) ( $H_n$ ):

$$H_n = W_L H_{n,D} \quad (3.21)$$

$W_L$  Haftalık sızıntı radyasyon iş yüküdür (Anonymous, 2005).

### 3.4.2.3 Labirent kapısındaki toplam eşdeğer doz

Labirent kapısının dış kısmında oluşan haftalık doz eşdeğeri sızıntı ve saçılmadan (denklem 3.14) ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarından (denklem 3.17) ve nötronlardan (denklem 3.21) oluşan bütün bileşenlerin toplamına eşittir (Anonymous, 2005).

$$H_W = H_{Tot} + H_{cg} + H_n \quad (3.22)$$

### 3.4.3 Kapı zırhlaması

Bölüm 3.4.1’de saçılma ve sızıntı radyasyondan dolayı kapı zırhlama hesabı yapılmıştı. Bununla birlikte yüksek enerjili cihazlarda foto nötronlardan ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarından kaynaklanan zırhlama hesabı yapılmalıdır. Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının ortalama enerjisi 3,6 MeV’dir ( Tochilin ve LaRiviera, 1979). NCRP bu aralığı kısa labirentler için 10 MeV kadar yükseltiyor ve böylece 6.1 cm kurşun TVL’si yeterli oluyor.

Nötronların ortalama enerjisi ise  $\sim 100$  KeV’dir. Bu da 4.5 cm’lik polietilen TVL ile durdurulabilir (NCRP 1984). Bor karışumlu polietilen hızlı nötronları zırhlamada az etkili iken termal nötronları zırhlamada çok etkilidir. 2 MeV’lik nötronlar için BPE’nin TVL değeri 3.8 cm iken termal nötronlar için 1.2 cm’dir (Anonymous, 2005).

### 3.4.4 Kıvrımlı (alternate) labirentler ve kapı tasarımları

Yukarıdaki kapı tasarım işlemleri maliyetli ve zor olabilir. Nötronların etkisini azaltacak veya tümden yok edecek şekilde kapı tasarım yöntemleri NCRP–1984’te tavsiye edilmiştir. McGinley ve Miner 1995’te bu konuyla (nötronlardan korunma) ilgili üç teknik sunmuşlardır:

1. Labirentin iç girişindeki (labirent alanını) aralığı azaltmak.
2. Termal nötronları soğuracak hafif ağırlıklı kapılar kullanmak.
3. Labirent girişinin iç kısmına BPE kapı yerleştirmek.

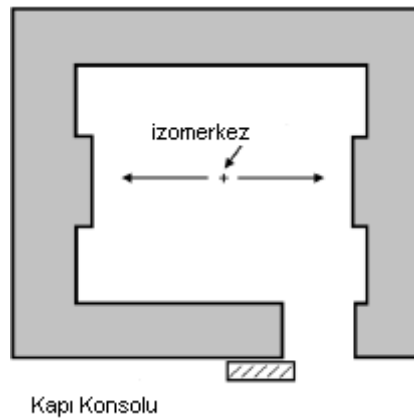
Çizelge 3.1’de 18 MV üreten cihazlar için labirentlerin dışında ölçülen doz eşdeğerleri gösterilmektedir (Anonymous, 2005).

Çizelge 3.1 18 MV’lik cihazların kapı ve labirent tipine göre labirent kapısı dışında ölçülen eşdeğer doz oranı

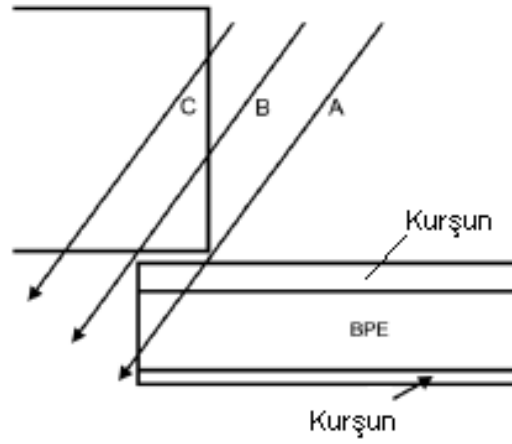
Kapı ve Labirent Tipi	Nötronlardan Kaynaklı Oluşan Gama Işını	Nötronlar	Toplam (nötronlar ve gama ışınları )
Klasik	$5.8 \times 10^{-7}$	$17.4 \times 10^{-7}$	$23.3 \times 10^{-7}$
İç aralığı azaltma	$2.6 \times 10^{-7}$	$5.8 \times 10^{-7}$	$8.4 \times 10^{-7}$
İçinde Boron kullanılan kapı	$1.9 \times 10^{-7}$	$4.8 \times 10^{-7}$	$6.7 \times 10^{-7}$
İçinde BPE kullanılan Kapı	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-7}$

### 3.4.5 Direkt zırhlanmış kapı

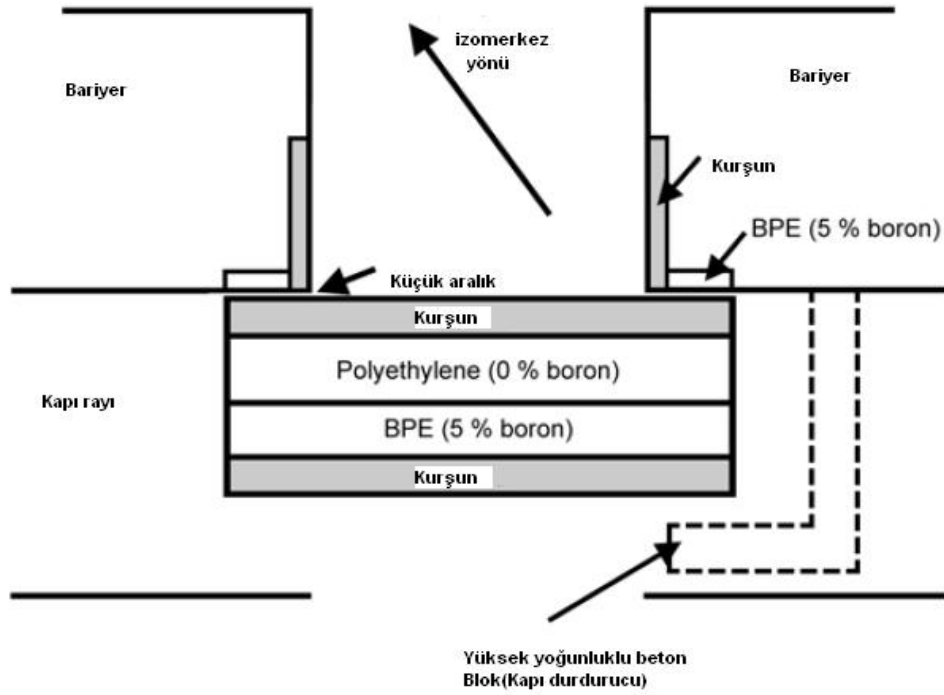
Alan sıkıntısı olan durumlarda labirent kullanılmadan direkt zırhlanmış kapı kullanılır. Bu durumlarda sandviç kurşun veya çelik, ek olarak BPE tarzında kapı kullanılır. Buna örnek bir oda tasarımı şekil 3.9’da verilmiştir. Kapı ve köşelerin detaylı şekilleri ise şekil 3.10 ve 3.11’de verilmiştir (Anonymous, 2005).



Şekil 3.9 Direkt zırhlanan kapılı oda planı



Şekil 3.10 Zırhlanmış kapının hatalı kullanımı



Şekil 3.11 Zırhlanmış kapının doğru kullanımı

### 3.4.5.1 Direkt zırhlanmış kapılarla ilgili tasarım problemleri

En basit problem şekil 3.10'da gösterildiği gibidir. A, B, C ışınları izomerkezden direkt geldiğinde kapıdan sızan ışınlardır. Bu sıkıntıyı gidermenin iki yolu vardır. İlki kapının uzunluğunu ekstra arttırmak, ikincisi de yüksek yoğunluklu beton, kapı durdurucu

kullanılmaktadır. Ayrıca kurşun ve BPE de duvarların yüzeyinde ekstra koruyucu olarak kullanılabilir (Anonymous, 2005).

### 3.4.5.2 Direkt zırhlanmış kapılarda nötron kaynaklı gama ışını oluşması

Burada akla takılan, nötronlar kapıdaki kurşundan geçerken gama ışınları oluşturur mu? sorusudur. McGinley ve Miner (1995) ekstra 1 HVL kullanarak sorunun çözülebileceğini düşünmüşlerdir (Anonymous, 2005).

## 3.5 Ortalama Doz Eşdeğeri Miktarı

Zırhlama bariyerleri tasarlanırken iş yükü yıla yayılacak şekilde hesaplamalar yapılır. Bu yüzden bunu haftalığa çevirmek için yıllık zırhlamanın ellide biri alınır (Anonymous, 2005).

### 3.5.1 Haftalık ortalama doz eşdeğeri miktarı

Haftalık ortalama doz eşdeğeri miktarı ( $R_w$ ) herhangi bir bölgedeki 40 saatlik ortalama doz eşdeğeri miktarı (TADR)'dır. Birincil bariyer için denklem 3.23'te verilmiştir.

$$R_w = \frac{IDR W_{pri} U_{pri}}{\dot{D}_0} \quad (3.23)$$

- $R_w$  = TADR'nin bir haftalık ortalaması (Sv/hafta)
- IDR = Anlık doz eşdeğeri miktarı (Sv/saat). IDR, ışının girdiği bariyerin 30 cm arkasında belirlenir.
- $\dot{D}_0$  = 1 m'deki soğrulmuş doz (Gy/saat)
- $W_{pri}$  = Birincil bariyerin haftalık iş yükü (Gy/hafta)
- $U_{pri}$  = Hesaplanan bölgenin kullanım faktörü

İkincil bariyer için  $R_w$ , hem sızıntıdan hem de hastadan saçılan radyasyondan olacak şekilde 3.24 ve 3.25 denklemleri ile bulunur.

$$R_w = \left( IDR_L \frac{W_L}{D_0} \right) + \left( IDR_{ps} \frac{W_{ps} U_{ps}}{D_0} \right) \quad (3.24)$$

$$IDR_{ps} = IDR_{tot} - IDR_L \quad (3.25)$$

- $IDR_L$  = İzomerkezde fantom yokken ikincil bariyerin 30 cm uzağındaki bir noktada ölçülen doz eşdeğeri miktarı
- $IDR_{tot}$  = İzomerkezde fantom varken ikincil bariyerin 30 cm uzağındaki bir noktada ölçülen doz eşdeğeri miktarı
- $IDR_{ps}$  = Hastadan saçılan radyasyon için ikincil bariyerin 30 cm uzağındaki bir noktada ölçülen doz eşdeğeri miktarı (Anonymous, 2005).

### 3.5.2 Herhangi bir saatteki ortalama doz eşdeğeri miktarı

Bazı radyasyon güvenlik düzenleyici kurumları kontrollü alanlarda ortalama doz eşdeğeri miktarı (TADR) limitini herhangi bir saate bağlı ( $R_h$ ) olarak integre ederler.  $R_h$  herhangi bir saatte alınabilecek maksimum hasta sayısının ortalama bir saatteki hasta sayısına göre bulunur.

$$R_h = N_{max} \bar{H}_{pt} \quad (3.26)$$

- $N_{max}$  = Set-up zamanı düşünülerek herhangi bir saatte tedaviye alınabilecek maksimum hasta sayısı
- $\bar{H}_{pt}$  = Işının girdiği bariyerin 30 cm arkasında tedaviye giren her hasta için ortalama doz eşdeğeri

$\bar{H}_{pt}$  aynı zaman da haftalık ortalama doz eşdeğerinin ( $R_w$ ) haftalık tedaviye giren ortalama hasta sayısına ( $\bar{N}_w$ ) bölümüne eşittir.

$$\bar{H}_{pt} = \frac{R_w}{\bar{N}_w} \quad (3.27)$$

Ve ;



$$\bar{N}_w = 40 \times \bar{N}_h \quad (3.28)$$

- $\bar{N}_h$  = Bir saatte tedaviye giren ortalama hasta sayısı
- 40 = 40 haftalık çalışma saati

Böylece:

$$R_h = \frac{R_w N_{max}}{\bar{N}_w} = \left( \frac{N_{max}}{40 \times \bar{N}_h} \right) R_w = \left( \frac{M}{40} \right) R_w \quad (3.29)$$

$M = N_{max} / \bar{N}_h$ , ve M daima  $\geq 1$  dir.

Burada  $R_h$  (Sv) yukarıda belirtilen doz eşdeğeri limiti (bariyerin dışında her hangi bir saatte 0,02 mSv) ile karşılaştırılacak olan TADR değeridir (Anonymous, 2005).



Şekil 3.12 Zırlama hesabı yapılan Linac (Electa Sinergy) cihazı



Hesaplamalarda birimler Sv cinsinden olduğundan kontrolsüz alanlar için P (0,02 mSv/hafta)  $20 \times 10^{-6}$  Sv/hafta ve kontrollü alanlar için (0,1 mSv/hafta)  $0,1 \times 10^{-3}$  Sv/hafta olarak alınır (Anonymous, 2005).

#### 4.1.1 C bölgesindeki birincil bariyer

C bölgesindeki gerekli olan bariyer kalınlığını hesaplayabilmek için denklem 3.1 kullanılır.

- P= Kontrolsüz alanlar için zırhlama tasarım hedefi=  $20 \times 10^{-6}$  Sv/hafta
- $d_c$ = İzomerkezden bariyerin arkasından 0.3 m uzaklıktaki herhangi bir noktaya olan en kısa uzaklık= 5.6 m
- W(18MV)=Haftalık 5 gün için iş yükü = 300 Gy/hafta [(20x3x5) 18 MV için birincil ışın demeti]
- $U = U_G$  = Birincil bariyer G için kullanım katsayısı = 0.25
- T = Meşguliyet faktörü (park bölgesi için) =  $1/40 = 0.025$  (ek 2’de çizelge1)

$$B_{pri} = \frac{(20 \times 10^{-6})(5.6 + 1)^2}{(300)(0.25)(0.025)} = 4.65 \times 10^{-4}$$

gerekli olan TVL sayısı için denklem 3.2 kullanılır.

$$n = \log\left(\frac{1}{4.65 \times 10^{-4}}\right) = 3.33$$

Ek 2 çizelge 2’den normal beton için 18 MV’li x-ışınlarına uygun TVL değerleri alınarak denklem 3.3’te kullanılır ( $TVL_1 = 45$  cm,  $TVL_e = 43$  cm ).

$$t_{pri} = (45 \text{ cm}) + (3.33 - 1)(43 \text{ cm}) = 145 \text{ cm}$$

Bu kalınlığın 6 MV’li x-ışınlarından dolayı gelecek olan iş yükünü karşılayıp karşılayamayacağını anlamak için aşağıdaki işlem yapılır:

$$W(6MV) = (30 \text{ hasta/gün})(3 \text{ Gy/hasta})(5 \text{ gün/hasta}) \\ = 450 \text{ Gy/hafta}$$

$$TVL_1=37 \text{ cm ve } TVL_e=33 \text{ cm}$$

C bölgesinde geçen haftalık doz eşdeğeri denklem 3.1'de zırlama tasarım hedefi (P) yerine doz eşdeğeri (H) yazılarak ve denklem 3.3'te verilen birincil bariyer geçiş faktörü ile elde edilir.

$$H(6MV) = B_{pri} W U T (1+d_c)^{-2} \\ = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(145-37)}{33}\right]\right\}} (450)(0.25) \left[\frac{0.025}{(6,6)^2}\right] \\ = 3.4 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} = 3.4 \mu\text{Sv/hafta}$$

Bu değer 6 MV için haftalık doz eşdeğeri ve zırlama tasarım hedefinin sadece % 20 si civarındadır. Dolayısı ile birincil bariyer kalınlığını etkilemeyecektir. Bununla beraber herhangi bir saat içindeki maksimum doz eşdeğeri limitini sağladığını da göstermemiz gerekir (Anonymous, 2005).

#### 4.1.2 C bölgesi için ortalama doz eşdeğeri miktarı

Herhangi bir saatteki maksimum doz eşdeğeri, izomerkezde (kaynaktan 1 m uzakta) maksimum soğrulan doz miktarı ( $\dot{D}_0 = 12 \text{ Gy/dk}$  veya  $720 \text{ Gy/saat}$ ) kullanıldığında elde edilir. Bu soğrulmuş doz miktarı ile geçiş faktörü  $B_{pri} = 4.65 \times 10^{-4}$  alındığında C bölgesi için herhangi bir saatteki doz eşdeğeri:

$$IDR (18 \text{ MV}) = \frac{(720)(4.65 \times 10^{-4})}{(6,1)^2} = 9 \times 10^{-3} \text{ Sv/saat}$$

18 MV'lik x-ışınları için denklem 3.23'e başvurduğumuzda; C bölgesindeki haftalık TADR:

$$R_W(18MV) = \frac{IDR W_{pri} U_{pri}}{\dot{D}_0} = \frac{9 \times 10^{-3} \times 300 \times 0.25}{720} = 900 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta}$$

6 MV'lik x-ışınları için sonuç:

$$\text{IDR}(6\text{MV}) = (720) 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(145-37)}{33}\right]\right\}} (6.1)^{-2} = 10 \times 10^{-4} \text{ Sv/saat}$$

ve;

$$R_w(6 \text{ MV}) = \frac{(10 \times 10^{-4})(450)(0.25)}{(720)} = 156 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta}$$

Normal şartlarda 1 saatte en fazla 10 hasta alınabilir. Saatte tedaviye giren ortalama hasta sayısı 7.1 (50 hasta/7 saat) olduğundan tedavide denklem 3.29 için gerekli olan M değeri  $10/7.1=1.4$ 'tür. Bu yüzden herhangi bir saatteki 6 MV ve 18 MV'nin kombinasyonu için doz eşdeğeri;

$$\begin{aligned} R_h &= \left(\frac{M}{35}\right) R_w(\text{total}) = \left(\frac{M}{35}\right) [R_w(6 \text{ MV}) + R_w(18 \text{ MV})] \\ &= \left(\frac{M}{35}\right) [156 \times 10^{-6} + 900 \times 10^{-6}] \\ &= \frac{1.4}{35} (1056 \times 10^{-6}) = 42 \times 10^{-6} = 42 \mu\text{Sv/saat} \end{aligned}$$

olarak bulunur.

Bu TADR değeri herhangi bir saat için  $20 \mu\text{Sv}$ 'ten büyük olduğundan en az bir tane HVL (18MV) değerine sahip zırlı C bölgesine eklemeliyiz. Hesaplamaların tam güvenilir olması için iki tane HVL eklemek daha iyi olacaktır (Anonymous, 2005). Bu yüzden C bölgesindeki birincil bariyer kalınlığı;

$$\begin{aligned} T_{pri} &= 145 \text{ cm} + 2\text{HVL}(18 \text{ MV}) \\ &= 145 \text{ cm} + 2(0.301)\text{TVL}_e(18 \text{ MV}) \\ &= 145 \text{ cm} + 2(0.301)(43) = 171 \text{ cm} \end{aligned}$$

olarak bulunur.

Bu yeni eklenen beton yardımı ile herhangi bir saatteki maksimum doz eşdeğeri  $11 \mu\text{Sv}$  (42:2:2) olur. Bu değerde  $20 \mu\text{Sv}$ 'in altındadır.

### 4.1.3 C bölgesi için hastadan saçılan radyasyon

C bölgesinde hastadan saçılan radyasyon için kolimatör açısı 10 derece olacak şekilde kabul edilir. Böylece C bölgesine doğru saçılma katsayısı (a) en büyük değerde olur ve küçük açılar için saçılan enerji maksimum olur. Bununla ilgili veriler ve hesaplamalar aşağıdaki gibidir (Anonymous, 2005).

- $t_{pri}(C) = 171 \text{ cm}$
- $d_{sca} = 1 \text{ m}$
- $d_{sec} = 5.6 \text{ m}$ , izomerkezden C bölgesine olan uzaklık
- $a(18\text{MV}) = 1.42 \times 10^{-2}$  (bkz. ek 2 çizelge 4)
- $a(6\text{MV}) = 1.04 \times 10^{-2}$  (bkz. ek 2 çizelge 4)
- $W(18\text{MV}) = 300 \text{ Gy/hafta}$
- $W(6\text{MV}) = 450 \text{ Gy/hafta}$
- $T = 1/40 = 0.025$
- $U = 0.25$
- $F = (40 \times 40) \text{ cm}^2$  maksimum alan ölçüsü
- $TVL_{sca}(6 \text{ MV} \approx 10 \text{ derece için}) = 35 \text{ cm beton için}$  (bkz. ek 2 çizelge 5 (a))
- $TVL_{sca}(18\text{MV} \approx 10 \text{ derece için}) = 45 \text{ cm beton için}$  (bkz. ek 2 çizelge 5 (a))
- 6 MV lik X-ışınlarından C bölgesindeki hastadan saçılan maksimum doz eşdeğeri geçişi

$$B_{sca}(6 \text{ MV}) = 10^{-\left(\frac{171}{35}\right)} = 13.18 \times 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} H_{sca}(6 \text{ MV}) &= B_{sca} a(6 \text{ MV}) (40 \times 40) (400)^{-1} W(6\text{MV}) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2} \\ &= (13.18 \times 10^{-6}) (1.04 \times 10^{-2}) (40 \times 40) (400)^{-1} (450) (0.25) (0.025) (5.6)^{-2} (1)^{-2} \\ &= 5 \times 10^{-9} \text{ Sv/hafta} = 0.005 \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

ve 18 MV saçılmaları için;

$$B_{sca}(18 \text{ MV}) = 10^{-\left(\frac{171}{45}\right)} = 1.58 \times 10^{-4}$$

$$\begin{aligned}
H_{sca}(18 MV) &= B_{sca} a(18 MV)(40 \times 40)(400)^{-1} W(18MV) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2} \\
&= (1.58 \times 10^{-4})(1.42 \times 10^{-2}) (40 \times 40)(400)^{-1}(300)(0.25)(0.025) (5.6)^{-2}(1)^{-2} \\
&= 5.3 \times 10^{-7} \text{ Sv/hafta} = 0.53 \mu\text{Sv/hafta}
\end{aligned}$$

Kısacası hem 6 MV için hem de 18 MV için hastadan saçılan radyasyondan dolayı C bölgesini geçen radyasyon, hedefin (20  $\mu\text{Sv/hafta}$ ) çok altında olduğundan herhangi bir önlem almaya gerek yoktur.

#### 4.1.4 C bölgesi için sızıntı radyasyonun değerlendirilmesi

C bölgesinde sızıntı radyasyondan kaynaklı olan bariyer kalınlığını değerlendirmek için denklem 3.3 ve 3.8 kullanılır. Cihaz kafasının zırhlaması ışınların en fazla % 0.1'ini geçirecek şekilde tasarlanmış olduğundan birincil bariyerin kalınlığı sızıntı radyasyon için yeterli düzeyde olması beklenir. Bununla ilgili hesaplamalar aşağıdaki gibidir.

- $P = 20 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta}$
- $t_{pri}(C) = 171 \text{ cm}$
- $d_L = 5.6 \text{ m}$
- $W(18 \text{ MV}) = 300 \text{ Gy/hafta}$
- $W(6 \text{ MV}) = 450 \text{ Gy/hafta}$
- $T = 1/40 = 0.025$
- $TVL_L(18 \text{ MV}) = 36 \text{ cm (TVL}_1) \text{ ve } 34 \text{ cm (TVL}_e) \text{ (ek 2 çizelge 7'den yaklaşık değerler)}$
- $TVL_L(6 \text{ MV}) = 34 \text{ cm (TVL}_1) \text{ ve } 29 \text{ cm (TVL}_e) \text{ (ek 2 çizelge 7'den yaklaşık değerler)}$

C Bölgesi için 6 MV sızıntı radyasyonun geçiş doz eşdeğeri

$$\begin{aligned}
H_L(6 MV) &= B_L(6 MV)(10)^{-3} W(6 MV) T (d_L)^{-2} \\
&= 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(171-34)}{29}\right]\right\}} (10^{-3})(450)(0.025)(5.6)^{-2} \\
&= 6.8 \times (10)^{-10} \text{ mSv/hafta} = 6.8 \times (10)^{-4} \mu\text{Sv/hafta}
\end{aligned}$$

18 MV için:

$$\begin{aligned} H_L(18 MV) &= B_L(18 MV)(10)^{-3} W(18 MV) T (d_L)^{-2} \\ &= 10^{-\left\{1+\left[\frac{(171-36)}{34}\right]\right\}}(10^{-3})(300)(0.025)(5.6)^{-2} \\ &= 25 \times (10)^{-10} \text{ mSv/hafta} = 2.5 \times (10)^{-3} \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

Görüldüğü gibi her iki değerde hedefin çok altındadır (20  $\mu\text{Sv/hafta}$ ). Bu yüzden sızıntı radyasyon için birincil bariyerde ekstra bir kalınlığa gerek yoktur.

#### 4.1.5 Sızıntı ve hastadan saçılan radyasyonun A bölgesi için değerlendirilmesi

Bu bölge ikincil bariyer olarak kullanıldığından birincil radyasyon ışınını almaz. Bu yüzden burada sadece sızıntı ve hastadan saçılan radyasyon için hesaplamalar yapılır. A bölgesi ile ışın demetinin merkezi arasında 30 derecelik bir açı vardır (Anonymous, 2005). Bu yüzden saçılma katsayısı (a) 30 derecelik açılar için alınır (bkz. ek 2 çizelge 4). Böylece denklem 3.7 ve 3.8 kullanılarak:

- $P=20 \times (10)^{-6}$  Sv/hafta kontrolsüz alanlar için zırhlama tasarım hedefi
- $T=1/40=0.025$
- $W(18 MV)=300$  Gy/hafta
- $W(6 MV)=450$  Gy/hafta
- $d_{sca}=1$  m
- $d_{sec}=6.1$  m (izomerkezden A bölgesine olan uzaklık)
- $a(18 MV)=2.53 \times 10^{-3}$  (30 derecede 18 MV için ve 2.5 cm derinlikte, ek 2 çizelge 4)
- $a(6 MV)=2.77 \times 10^{-3}$  (30 derecede 18 MV için ve 2.5 cm derinlikte, ek 2 çizelge 4)
- $F=(40 \times 40)$  cm<sup>2</sup> (maksimum alan alınır)
- $TVL_{sca}(18 MV)=$ Betonun 32 cm'si (30 derecelik saçılma, ek 2 çizelge 5(a))
- $TVL_{sca}(6 MV)=$  Betonun 26 cm'si (30 derecelik saçılma, ek 2 çizelge 5(a))
- $d_L=6.1$  m (İzomerkezden A bölgesine olan uzaklık)



- $TVL_L(18 \text{ MV saçılma radyasyon}) = 36 \text{ cm (TVL}_1) \text{ ve } 34 \text{ cm (TVL}_e) \text{ (ek 2 çizelge 7)}$
- $TVL_L(6 \text{ MV saçılma radyasyon}) = 34 \text{ cm (TVL}_1) \text{ ve } 29 \text{ cm (TVL}_e) \text{ (ek 2 çizelge 7)}$

Hastadan saçılan radyasyonda gerekli olan bariyer kalınlığının hesapları için  $U=0.25$  ve  $a(30 \text{ derece})$  alınıp denklem 3.7’de kullanılır. 18 MV’lik x-ışınları için;

$$B_{ps}(18 \text{ MV}) = \frac{(20 \times 10^{-6})(1)(6.1)^2(400)}{(2.53 \times 10^{-3})(300)(0.25)(0.025)(40 \times 40)}$$

$$= 3.9 \times 10^{-2}$$

Ve denklem 3.2’den

$$n(\text{Hastadan saçılan, } 18 \text{ MV}) = \log(1/B_{ps}) = 1.41$$

18 MV saçılma radyasyon için gerekli olan bariyer kalınlığı ( $t_{s,sca}$ ):

$$t_{s,sca}(18 \text{ MV}) = (1.41 \times 32 \text{ cm}) = 45.1 \text{ cm} \approx 45 \text{ cm}$$

6 MV’lik x-ışınları için;

$$B_{ps}(6 \text{ MV}) = \frac{(20 \times 10^{-6})(1)(6.1)^2(400)}{(2.77 \times 10^{-3})(450)(0.25)(0.025)(40 \times 40)}$$

$$= 2.37 \times 10^{-2}$$

ve denklem 3.2’den

$$n(\text{Hastadan saçılan, } 6 \text{ MV}) = \log(1/B_{ps}) = 1.62$$

6 MV saçılma radyasyon için gerekli olan bariyer kalınlığı ( $t_{s,sca}$ ):

$$t_{s,sca}(6 \text{ MV}) = (1.62 \times 26 \text{ cm}) = 42.1 \text{ cm} \approx 42 \text{ cm}$$

Bu iki bariyer kalınlığının birleşmesine ekstra bir HVL değeri koymak yararlıdır.

$$t_{s,sca}(\text{Total})=(45) + (0.301)(32) =54.6 \text{ cm}$$

18 MV’de sızıntı radyasyon için denklem 3.8 kullanılarak:

$$B_L(18 \text{ MV}) = \frac{(20 \times 10^{-6})(10)^3(6.1)^2}{(300)(0.025)} = 9.9 \times 10^{-2}$$

$$n(\text{sızıntı radyasyon, 18 MV}) = \log (1/B_L) = 1.004$$

ve

$$t_{s,L}(18 \text{ MV}) = (1)(36 \text{ cm}) + (0.004)(34 \text{ cm}) = 36.14 \text{ cm};$$

6 MV için

$$B_L(6 \text{ MV}) = \frac{(20 \times 10^{-6})(10)^3(6.1)^2}{(450)(0.025)} = 6.6 \times 10^{-2}$$

$$n(\text{sızıntı radyasyon, 6MV}) = \log (1/B_L) = 1.18$$

ve

$$t_{s,L}(6 \text{ MV}) = (1)(36 \text{ cm}) + (0.18)(34 \text{ cm}) = 42.12 \text{ cm};$$

Sızıntı radyasyon için her iki enerjinin verilerini birleştirirsek:

$$t_{s,L}(\text{total}) = (36.14) + (0.301)(36) = 47 \text{ cm}$$

Sonuç olarak saçılma ve sızıntı radyasyon için gerekli bariyer kalınlığı (sırasıyla 54.6 cm ve 47 cm)’dir. Toplam bariyer, kalınlığı fazla olana ekstra bir HVL koyularak bulunur.

$$t_{s,Tot} = (54.6) + (0.301)(36) = 65.4 \text{ cm toplam gerekli olan bariyer kalınlığıdır.}$$

Bu değer duvar kalınlığının (150 cm) çok altındadır. Yine de bu bariyer kalınlığı yardımıyla haftalık geçebilecek maksimum doz eşdeğerleri bulunabilir. Saçılma için:

$$B_{sca}(6 \text{ MV}) = 10^{-\left(\frac{65.4}{26}\right)} = 3.05 \times 10^{-3}$$

$$H_{sca}(6 MV)$$

$$=B_{sca}a(6 MV)(40 \times 40)(400)^{-1} W(6MV) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2}$$

$$=(3.05 \times 10^{-3})(2.77 \times 10^{-3}) (40 \times 40)(400)^{-1}(450)(0.25)(0.025) (6.6)^{-2}(1)^{-2}$$

$$=2 \times 10^{-6} Sv/hafta = 2 \mu Sv/hafta$$

ve 18 MV saçılmaları için;

$$B_{sca}(18 MV) = 10^{-\left(\frac{65.4}{32}\right)} = 9 \times 10^{-3}$$

$$H_{sca}(18 MV)$$

$$=B_{sca}a(18 MV)(40 \times 40)(400)^{-1} W(18MV) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2}$$

$$=(9 \times 10^{-3})(2.53 \times 10^{-3}) (40 \times 40)(400)^{-1}(300)(0.25)(0.025) (6.6)^{-2}(1)^{-2}$$

$$=3.9 \times 10^{-6} Sv/hafta = 3.9 \mu Sv/hafta$$

Sızıntı için:

$$H_L(6 MV) =B_L(6 MV)(10)^{-3} W(6 MV) T (d_L)^{-2}$$

$$=10^{-\left\{1+\left[\frac{(65.4-34)}{29}\right]\right\}}(10^{-3})(450)(0.025)(6.6)^{-2}$$

$$=2.1 \times 10^{-6} mSv/hafta = 2.1 \mu Sv/hafta$$

18 MV için:

$$H_L(18 MV) =B_L(18 MV)(10)^{-3} W(18 MV) T (d_L)^{-2}$$

$$=10^{-\left\{1+\left[\frac{(65.4-36)}{34}\right]\right\}}(10^{-3})(300)(0.025)(6.6)^{-2}$$

$$=2.3 \times 10^{-6} mSv/hafta = 2.3 \mu Sv/hafta \text{ olarak bulunur.}$$

Bunların toplamı; 2+3.9+2.1+2.3=10.3  $\mu$ Sv/hafta olup zırhlama tasarım hedefi P (20 $\mu$ Sv/hafta)'nin altında bir değerdir.

#### 4.1.6 A bölgesi için ortalama doz eşdeğeri miktarı (herhangi bir saatte)

A bölgesindeki beklenen doz eşdeğeri miktarı hastadan saçılan ve sızıntı radyasyonun ( $IDR_{ps}$  ve  $IDR_L$ , sırasıyla) anlık doz eşdeğerleri miktarının toplamıdır. Toplam gerekli olan kalınlık 65.4 cm olduğundan A bölgesi için 18 MV x-ışınlarından dolayı oluşan  $IDR_{ps}$ ;

$$\begin{aligned} IDR_{ps}(18 \text{ MV}) &= \dot{D}_o a(18 \text{ MV}) F(400)^{-1} B_{sca}(18 \text{ MV})(d_{sec})^{-2} \\ &= \frac{(720)(2.53 \times 10^{-3})(40 \times 40) 10^{-\left(\frac{65.4}{32}\right)}}{(6.1)^2(400)} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Sv/saat} \end{aligned}$$

ve 18 MV için  $IDR_L$ :

$$\begin{aligned} IDR_L(18 \text{ MV}) &= \dot{D}_o(10)^{-3} B_L(18 \text{ MV})(d_L)^{-2} \\ &= \frac{(720)(10)^{-\left\{1 + \left[\frac{65.4-36}{34}\right]\right\}}}{(10^3)(6.1)^2} = 2.6 \times 10^{-4} \text{ Sv/saat bulunur.} \end{aligned}$$

Sızıntı ve hastadan saçılan radyasyondan dolayı A bölgesinde ölçülebilir toplam IDR (18 MV):

$$\begin{aligned} IDR(18 \text{ MV}) &= IDR_{ps}(18 \text{ MV}) + IDR_L(18 \text{ MV}) \\ &= (1.8 \times 10^{-3}) + (2.6 \times 10^{-4}) = 20.6 \times 10^{-4} \text{ Sv/saat} \end{aligned}$$

Benzer şekilde 6 MV'lik x-ışınları için:

$$\begin{aligned} IDR_{ps}(6 \text{ MV}) &= \dot{D}_o a(6 \text{ MV}) F(400)^{-1} B_{sca}(6 \text{ MV})(d_{sec})^{-2} \\ &= \frac{(720)(2.77 \times 10^{-3})(40 \times 40) 10^{-\left(\frac{65.4}{26}\right)}}{(6.1)^2(400)} = 6.5 \times 10^{-4} \text{ Sv/saat} \end{aligned}$$

Ve 6 MV için  $IDR_L$ :

$$IDR_L(6 \text{ MV}) = \dot{D}_o(10)^{-3} B_L(6 \text{ MV})(d_L)^{-2}$$

$$= \frac{(720)(10^{-\left\{1+\left[\frac{(65.4-34)}{29}\right]\right\}})}{(10^3)(6.1)^2} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ Sv/saat,}$$

6 MV için toplam eşdeğer doz miktarı:

$$\begin{aligned} \text{IDR}(6 \text{ MV}) &= \text{IDR}_{ps}(6 \text{ MV}) + \text{IDR}_L(6 \text{ MV}) \\ &= (6.5 \times 10^{-4}) + (1.6 \times 10^{-4}) = 8.1 \times 10^{-4} \text{ Sv/saat tir.} \end{aligned}$$

Denklem 3.24 bize 18 MV'lik x-ışınları için haftalık TADR ( $R_w$ ):

$$\begin{aligned} R_w(18 \text{ MV}) &= \left[ \frac{\text{IDR}_L(18 \text{ MV})W_L(18 \text{ MV})}{\dot{D}_0} \right] + \left[ \frac{\text{IDR}_{ps}(18 \text{ MV})W_{pri}(18 \text{ MV})U}{\dot{D}_0} \right] \\ &= \left[ \frac{2.6 \times 10^{-4} \times 300}{(720)} \right] + \left[ \frac{18 \times 10^{-4} \times 300 \times 0.25}{(720)} \right] \\ &= 1.08 \times 10^{-4} + 1.87 \times 10^{-4} = 2.95 \times 10^{-4} \text{ Sv/hafta} \end{aligned}$$

Benzer şekilde 6 MV için;

$$\begin{aligned} R_w(6 \text{ MV}) &= \left[ \frac{\text{IDR}_L(6 \text{ MV})W_L(6 \text{ MV})}{\dot{D}_0} \right] + \left[ \frac{\text{IDR}_{ps}(6 \text{ MV})W_{pri}(6 \text{ MV})U}{\dot{D}_0} \right] \\ &= \left[ \frac{1.6 \times 10^{-4} \times 450}{(720)} \right] + \left[ \frac{6.5 \times 10^{-4} \times 450 \times 0.25}{(720)} \right] \\ &= 1 \times 10^{-4} + 1.02 \times 10^{-4} = 2.02 \times 10^{-4} \text{ Sv/hafta} \end{aligned}$$

Herhangi bir saat için toplam TADR (bkz. denklem 3.29) bölüm 4.1.2 den  $M=1.8$  kullanılarak:

$$\begin{aligned} R_h &= \left( \frac{M}{40} \right) [R_w(18 \text{ MV}) + R_w(6 \text{ MV})] \\ &= \left( \frac{1.8}{40} \right) (2.95 \times 10^{-4} + 2.02 \times 10^{-4}) \\ &= 1.74 \times 10^{-5} = 17.4 \mu\text{Sv herhangi bir saatte.} \end{aligned}$$

Bu yüzden herhangi bir saatteki maksimum doz eşdeğeri miktarı 17.4  $\mu\text{Sv}$  olup TADR limiti olan 20  $\mu\text{Sv}$ 'ten küçüktür.

#### 4.1.7 Tedavi kontrol alanının D bölgesi için birincil bariyer

Kontrollü bir alan olarak tedavi kontrol alanı için, zırhlama tasarım hedefi P, 5 mSv/yıl veya 0.1 mSv/hafta'dır ( $0.1 \times 10^{-3}$  Sv/hafta; 100  $\mu\text{Sv}$ /hafta). Denklem 3.1 için diğer veriler:

- $d_D = 5.6$  m (izomerkezden D bölgesine olan uzaklık)
- $W(18 \text{ MV})=300$  Gy/hafta
- $W(6 \text{ MV})=450$  Gy/hafta
- $U=0.25$
- $T=1$  (kontrollü alanda radyasyon çalışanları için)
- $\text{TVL}_1(18 \text{ MV})= 45$  cm,  $\text{TVL}_e(18 \text{ MV})=43$  cm
- $\text{TVL}_1(6 \text{ MV})=37$  cm,  $\text{TVL}_e(6 \text{ MV})=33$  cm

Denklem 3.1 ve 3.2 de bunları yerine koyarsak;

$$B_{pri}(18 \text{ MV}) = \frac{(0.1 \times 10^{-3})(5.6+1)^2}{(300)(0.25)(1)} = 5.8 \times 10^{-5}$$

$$n = \log\left(\frac{1}{5.8 \times 10^{-5}}\right) = 4.23$$

Gerekli bariyer kalınlığı;

$$t(D) = (45 \text{ cm}) + (4.23-1)(43) = 183.9 \text{ cm} \approx 184 \text{ cm}$$

Bu kalınlığın 6 MV doz eşdeğeri için yeterli olup olmadığını aşağıdaki gibi inceleriz:

$$\begin{aligned} H(6 \text{ MV}) &= B_{pri} W U T (d_D + 1)^{-2} \\ &= 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(184-37)}{33}\right]\right\}} (450)(0.25)(1)(5.6 + 1)^{-2} \\ &= 9 \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

Bu, zırlama tasarım hedefi  $P=100 \mu\text{Sv/hafta}$  değerinin onda birine denk gelmektedir.

#### 4.1.8 B bölgesi ikincil bariyeri

Bu ikincil bariyer A bölgesiyle aynıdır. Tek fark B bölgesi tam çalışılan kontrollü alandır. Bu bölge için veriler:

- $P=0.1 \times (10)^{-3} \text{ Sv/hafta}$  (kontrollü alanlar için zırlama tasarım hedefi)
- $T=1$
- $W(18 \text{ MV})= 300 \text{ Gy/hafta}$
- $W(6 \text{ MV})= 450 \text{ Gy/hafta}$
- $d_{\text{sca}}=1 \text{ m}$
- $d_{\text{sec}} = 6.1 \text{ m}$  (izomerkezden A bölgesine olan uzaklık)
- $a(18 \text{ MV})=2.53 \times 10^{-3}$  (30 derecede 18 MV için ve 2.5 cm derinlikte, ek 2 çizelge 4)
- $a(6 \text{ MV})=2.77 \times 10^{-3}$  (30 derecede 18 MV için ve 2.5 cm derinlikte, ek 2 çizelge 4)
- $F=(40 \times 40) \text{ cm}^2$
- $\text{TVL}_{\text{sca}}(18 \text{ MV})=\text{Betonun } 32 \text{ cm'si}$  (30 derecelik saçılma, ek 2 çizelge 5(a))
- $\text{TVL}_{\text{sca}}(6 \text{ MV})= \text{Betonun } 26 \text{ cm'si}$  (30 derecelik saçılma, ek 2 çizelge 5(a))
- $d_L= 6.1 \text{ m}$  (İzomerkezden A bölgesine olan uzaklık)
- $\text{TVL}_L(18 \text{ MV}$  saçılma radyasyon) = 36 cm ( $\text{TVL}_1$ ) ve 34 cm ( $\text{TVL}_e$ ) (ek 2 çizelge 7)
- $\text{TVL}_L$  (6 MV saçılma radyasyon) = 34 cm ( $\text{TVL}_1$ ) ve 29 cm ( $\text{TVL}_e$ ) (ek 2 çizelge 7)

Bölüm 4.1.5'teki gibi hesaplanan bariyer kalınlığı ( $t_{s,\text{sca}}=t_{\text{sca}}$ ) şeklinde alınır. Hastadan saçılan radyasyon için bariyer kalınlığı denklem 3.7'ye göre hesaplanır. Denklem 3.7'de  $U=0.25$  ve  $a(30 \text{ derece})$  alınırsa, 18 MV'lik x-ışınları için;

$$B_{ps}(18 \text{ MV})= \frac{(0.1 \times 10^{-3})(1)(6.1)^2(400)}{(2.53 \times 10^{-3})(300)(0.25)(1)(40 \times 40)}$$
$$=4.9 \times 10^{-3}$$

ve denklem 3.2'den

$$n=(\text{Hastadan saçılan, 18 MV})=\log (1/B_{ps})=2.3$$

18 MV saçılma radyasyon için gerekli olan bariyer kalınlığı ( $t_{sca}$ ):

$$t_{sca}(18 \text{ MV})=(2.3 \times 32 \text{ cm})=73.6 \text{ cm}$$

6 MV'lik x-ışınları için;

$$B_{ps}(6 \text{ MV})=\frac{(0.1 \times 10^{-3})(1)(6.1)^2(400)}{(2.77 \times 10^{-3})(450)(0.25)(1)(40 \times 40)}$$
$$=3 \times 10^{-3}$$

Ve denklem 3.2'den

$$n=(\text{Hastadan saçılan, 6 MV})=\log (1/B_{ps})=2.52$$

6 MV saçılma radyasyon için gerekli olan bariyer kalınlığı ( $t_{sca}$ ):

$$t_{sca}(6 \text{ MV})=(2.52 \times 26 \text{ cm})=65.5 \text{ cm}$$

18 MV'de sızıntı radyasyon için denklem 3.8 kullanılır.

$$B_L(18 \text{ MV})=\frac{(0.1 \times 10^{-3})(10)^3(6.1)^2}{(300)(1)}=1.25 \times 10^{-2}$$

$$n=(\text{sızıntı radyasyon, 18 MV})=\log (1/B_L)=1.90$$

ve

$$t_L(18 \text{ MV})=(1)(36 \text{ cm})+(0.90)(34 \text{ cm})=66.6 \text{ cm};$$

6 MV için;

$$B_L(6 \text{ MV})=\frac{(0.1 \times 10^{-3})(10)^3(6.1)^2}{(450)(1)}=0.83 \times 10^{-2}$$

$$n=(\text{sızıntı radyasyon, 6MV})=\log (1/B_L)=2.08$$



ve

$$t_L(6 \text{ MV}) = (1)(34 \text{ cm}) + (1.08)(29 \text{ cm}) = 65.3 \text{ cm};$$

Bu iki bariyer kalınlığının birleşmesine ekstra bir HVL değeri koymak yararlıdır.

$$t_{sca}(\text{toplam}) = (73.6) + (0.301)(32) = 83.2 \text{ cm}$$

Sızıntı radyasyonun her iki enerji kombinasyonları için gerekli olan değerleri birleştirirsek:

$$t_L = (66.6) + (0.301) \times (34) = 76.8 \text{ cm}$$

$$t_{tot}(\text{toplam}) = (83.2) + (0.301)(34) = 93.4 \text{ cm}$$

Şimdi bu bariyer kalınlığı yardımıyla haftalık geçebilecek maksimum doz eşdeğerleri bulunabilir.

Saçılma için:

$$B_{sca}(6 \text{ MV}) = 10^{-\left(\frac{93.4}{26}\right)} = 2.28 \times 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} H_{sca}(6 \text{ MV}) &= B_{sca} a(6 \text{ MV})(40 \times 40)(400)^{-1} W(6 \text{ MV}) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2} \\ &= (2.28 \times 10^{-4})(2.77 \times 10^{-3})(40 \times 40)(400)^{-1}(450)(0.25)(1)(6.6)^{-2}(1)^{-2} \\ &= 7.9 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} = 7.9 \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

ve 18 MV saçılmaları için;

$$B_{sca}(18 \text{ MV}) = 10^{-\left(\frac{93.4}{32}\right)} = 1.2 \times 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} H_{sca}(18 \text{ MV}) &= B_{sca} a(18 \text{ MV})(40 \times 40)(400)^{-1} W(18 \text{ MV}) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2} \\ &= (1.2 \times 10^{-3})(2.53 \times 10^{-3})(40 \times 40)(400)^{-1}(300)(0.25)(1)(6.6)^{-2}(1)^{-2} \\ &= 20 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} = 20 \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

Sızıntı için:

$$\begin{aligned}
H_L(6 \text{ MV}) & \\
&= B_L(6 \text{ MV})(10)^{-3} W(6 \text{ MV}) T (d_L)^{-2} \\
&= 10^{-\left\{1+\left[\frac{93.4-34}{29}\right]\right\}}(10^{-3})(450)(1)(6.6)^{-2} \\
&= 9.2 \times 10^{-6} \text{ mSv/hafta} = 9.2 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}
\end{aligned}$$

18 MV için:

$$\begin{aligned}
H_L(18 \text{ MV}) & \\
&= B_L(18 \text{ MV})(10)^{-3} W(18 \text{ MV}) T (d_L)^{-2} \\
&= 10^{-\left\{1+\left[\frac{93.4-36}{34}\right]\right\}}(10^{-3})(300)(1)(6.6)^{-2} \\
&= 14 \times 10^{-6} \text{ mSv/hafta} = 14 \text{ } \mu\text{Sv/hafta} \text{ olarak bulunur.}
\end{aligned}$$

Bunların toplamı;  $7.9+20+9.2+14 = 51.1 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$  olup zırlama tasarım hedefi P ( $100\mu\text{Sv/hafta}$ )'nin altında bir değerdir.

#### 4.1.9 E bölgesi ikincil bariyeri

Bu bölge ışınları hiçbir zaman ışınları direkt olarak almaz. Dolayısıyla ışın açısı 0 derecedir ( $t_s = t$ ).

Bu bölgede koridor olduğundan  $T=1/5$  ve zırlama tasarım hedefi  $P=20 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$  alınır. Yani burası kontrolsüz alandır. Denklem 3.2, 3.7, 3.8'de kullanacağımız diğer veriler aşağıdaki gibidir.

- $P=20 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta}$
- $W(18 \text{ MV})= 300 \text{ Gy/hafta}$
- $W(6 \text{ MV})= 450 \text{ Gy/hafta}$
- $d_{sca}=1 \text{ m}$
- $d_{sec} = 5.5 \text{ m}$  (izomerkezdeki hastadan E bölgesine olan uzaklık)
- $a(18 \text{ MV})=1.89 \times 10^{-4}$  (90 derece saçılmalar için, ek 2 çizelge 4)
- $a(6 \text{ MV})=4.26 \times 10^{-4}$  (90 derece saçılmalar için, ek 2 çizelge 4)

- $F=(40 \times 40) \text{ cm}^2$
- $\text{TVL}_{\text{sca}}(18 \text{ MV})=\text{Betonun } 19 \text{ cm'si (90 derecelik saçılma, ek 2 çizelge 5(a))}$
- $\text{TVL}_{\text{sca}}(6 \text{ MV})= \text{Betonun } 17 \text{ cm'si (90 derecelik saçılma, ek 2 çizelge 5(a))}$
- $d_L= 5.5 \text{ m}$  (Sızıntı radyasyon hesaplamaları için izomerkezden E bölgesine olan uzaklık)
- $\text{TVL}_L(18 \text{ MV sızıntı radyasyon}) = 36 \text{ cm (TVL}_1) \text{ ve } 34 \text{ cm (TVL}_e) \text{ (ek 2 çizelge 7)}$
- $\text{TVL}_L(6 \text{ MV sızıntı radyasyon}) = 34 \text{ cm (TVL}_1) \text{ ve } 29 \text{ cm (TVL}_e) \text{ (ek 2 çizelge 7)}$

Hastadan saçılan radyasyon için bariyer kalınlığı hesaplaması denklem 3.7'ye göre yapılır. 3.7'de  $U=1$  ve  $a(90 \text{ derece})$  alınır, 18 MV'lik x-ışınları için;

$$B_{ps}(18 \text{ MV})= \frac{(20 \times 10^{-6})(1)(5.5)^2(400)}{(1.89 \times 10^{-4})(300)(0.20)(1)(40 \times 40)}$$

$$=12.9 \times 10^{-3}$$

Ve denklem 3.2'den

$$n(\text{Hastadan saçılan, } 18 \text{ MV})= \log (1/B_{ps})=1.89$$

18 MV saçılma radyasyon için gerekli olan bariyer kalınlığı:

$$t_{\text{sca}}(18 \text{ MV})=(1.89 \times 19 \text{ cm})= 35.9 \text{ cm}$$

6 MV'lik x-ışınları için ;

$$B_{ps}(6 \text{ MV})= \frac{(20 \times 10^{-6})(1)(5.5)^2(400)}{(4.26 \times 10^{-4})(450)(0.20)(1)(40 \times 40)}$$

$$=1.9 \times 10^{-4}$$

Ve denklem 3.2'den

$$n(\text{Hastadan saçılan, } 6 \text{ MV})= \log (1/B_{ps})=3.72$$

6 MV saçılma radyasyon için gerekli olan bariyer kalınlığı ( $t_{\text{sca}}$ ) :

$$t_{\text{sca}}(6 \text{ MV})=(3.72 \times 17 \text{ cm})= 63 \text{ cm}$$

18 MV’de sızıntı radyasyon için denklem 3.8 kullanılır.

$$B_L(18 \text{ MV}) = \frac{(20 \times 10^{-6})(10)^3(5.5)^2}{(300)(0.20)} = 9.72 \times 10^{-3}$$

$$n(\text{sızıntı radyasyon, 18 MV}) = \log(1/B_L) = 2.01$$

ve

$$t_L(18 \text{ MV}) = (1)(36 \text{ cm}) + (1.01)(34 \text{ cm}) = 70.34 \text{ cm};$$

6 MV için;

$$B_L(6 \text{ MV}) = \frac{(20 \times 10^{-6})(10)^3(5.5)^2}{(450)(0.20)} = 6.5 \times 10^{-3}$$

$$n(\text{sızıntı radyasyon, 6MV}) = \log(1/B_L) = 2.18$$

ve

$$t_L(6 \text{ MV}) = (1)(34 \text{ cm}) + (1.18)(29) \text{ cm} = 68.22 \text{ cm};$$

Sızıntı radyasyonun her iki enerji kombinasyonları için gerekli olan değerleri birleştirirsek:

$$t_L(\text{total}) = (70.34) + (0.301) \times (36) = 81.17 \text{ cm}$$

Buradan şu sonuç çıkarılabilir: Sızıntı radyasyondan kaynaklı kalınlık değeri saçılma radyasyon kalınlık değerinden daha fazladır. Bu yüzden gerekli olan bariyer kalınlığı olarak 81.17 cm alınır.

Bu değer duvar kalınlığının (150 cm) altındadır. Yine de bu bariyer kalınlığı yardımıyla haftalık geçebilecek maksimum doz eşdeğerleri bulunabilir.

Saçılma için:

$$B_{sca}(6 \text{ MV}) = 10^{-\left(\frac{81.17}{17}\right)} = 1.7 \times 10^{-5}$$

$$H_{sca}(6 MV)$$

$$\begin{aligned} &= B_{sca} a(6 MV)(40 \times 40)(400)^{-1} W(6MV) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2} \\ &= (1.7 \times 10^{-5})(4.26 \times 10^{-4}) (40 \times 40)(400)^{-1}(450)(0.2)(5.5)^{-2}(1)^{-2} \\ &= 0.08 \times 10^{-6} Sv/hafta = 0.17 \mu Sv/hafta \end{aligned}$$

ve 18 MV saçılmaları için;

$$B_{sca}(18 MV) = 10^{-\left(\frac{81.17}{19}\right)} = 1 \times 10^{-4}$$

$$H_{sca}(18 MV)$$

$$\begin{aligned} &= B_{sca} a(18 MV)(40 \times 40)(400)^{-1} W(18MV) U T (d_{sec})^{-2} (d_{sca})^{-2} \\ &= (5.4 \times 10^{-5})(1.89 \times 10^{-4}) (40 \times 40)(400)^{-1}(300)(0.2) (5.5)^{-2}(1)^{-2} \\ &= 0.09 \times 10^{-6} Sv/hafta = 0.09 \mu Sv/hafta \end{aligned}$$

Sızıntı için:

$$H_L(6 MV)$$

$$\begin{aligned} &= B_L(6 MV)(10)^{-3} W(6 MV) T (d_L)^{-2} \\ &= 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(81.17-34)}{29}\right]\right\}} (10^{-3})(450)(0.2)(5.5)^{-2} \\ &= 7 \times 10^{-6} mSv/hafta = 7 \mu Sv/hafta \end{aligned}$$

18 MV için:

$$H_L(18 MV)$$

$$\begin{aligned} &= B_L(18 MV)(10)^{-3} W(18 MV) T (d_L)^{-2} \\ &= 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(81.17-36)}{34}\right]\right\}} (10^{-3})(300)(0.2)(5.5)^{-2} \\ &= 9.3 \times 10^{-6} mSv/hafta = 9.3 \mu Sv/hafta \text{ olarak bulunur.} \end{aligned}$$

Bunların toplamı;  $0.08+0.09+7+9.7=16.47 \mu Sv/hafta$  olup zırhlama tasarım hedefi P ( $20\mu Sv/hafta$ )'nin altında bir değerdir.

#### 4.1.10 Labirent kapısında sızıntı ve saçılan radyasyon

Yüksek enerjili cihazlar için labirent kapısına varan sızıntı ve saçılan radyasyon düşük enerjili cihazlardan farklı olarak nötronlara ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarına sebep olurlar. Bu durum bölüm 4.1.11 ve 4.1.12’de ele alınacaktır. Bunun dışındaki kısım ise aşağıdaki örnekte verilecektir.

Şekil 4.1 ve denklem 3.13 ve 3.14 kapıdaki doz eşdeğerini( $H_d$ ) hesaplamak için kullanılabilir.

$$H_d = f H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT}$$

Bu bileşenlerin hepsi ayrı ayrı aşağıdaki gibi hesaplanır.

##### 4.1.10.1 Duvardan saçılan radyasyon bileşeni $H_S$

Denklem 3.9’da kullanılan veriler:

- $W(18\text{ MV}) = 300\text{ Gy/hafta}$
- $W(6\text{ MV}) = 450\text{ Gy/hafta}$
- $U_G = 0.25$

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi uzaklık;

- $d_G = 4.3\text{ m}$ , şekil 3.7 deki  $d_{pp} + 1$  mesafesine ve denklem 3.9’daki  $d_h$ ’a denk gelmektedir.
- $d_r = 6.0\text{ m}$
- $d_z = 9.8\text{ m}$

Duvardan yansıma katsayıları:

- $\alpha_G(18\text{ MV}) = 1.6 \times 10^{-3}$  (ek 2 çizelge 8(a), dik gelen, 75 derecelik açıyla yansıyan)

- $\alpha_G(6 \text{ MV}) = 2.7 \times 10^{-3}$  (ek 2 çizelge 8(a), dik gelen, 75 derecelik açıyla yansıyan)
- $\alpha_Z = 8 \times 10^{-3}$  (ek 2 çizelge 8(a), dik gelen, 75 derecelik açıyla yansıyan, 0.5 MeV)
- $A_0 = 10.5 \text{ m}^2$ , şekil 3.7 de maksimum alanda  $(40 \times 40) \text{ cm}^2$  alanında G duvarından  $A_0$  alanına hedeflenen
- $A_Z = 4.5 \text{ m}^2$ , birincil ışın demetlerinin  $A_0$  alanından sekerek labirentin iç kısmına geldiği alan

Denklem 3.9 yardımıyla  $H_S$  değeri bulunur.

$$H_S = \frac{W U_G \alpha_0 A_0 \alpha_Z A_Z}{(d_h d_r d_z)^2}$$

$$H_S = \frac{[(300)(1.6 \times 10^{-3}) + (450)(2.7 \times 10^{-3})](0.25)(10.5)(8 \times 10^{-3})(4.5)}{[(4.3)(6.0)(9.8)]^2}$$

$$= 2.5 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} = 2.5 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$$

#### 4.1.10.2 Cihazın kafasından sızıp duvardan saçılan radyasyon bileşeni, $H_{LS}$

Denklem 3.10'da kullanılan veriler aşağıdaki gibidir.

- $L_f = 1 \times 10^{-3}$  (6 MV ve 18 MV x-ışınları için aynı olduğu kabul edilir)
- $W_L(18 \text{ MV}) = 300 \text{ Gy/hafta}$
- $W_L(6 \text{ MV}) = 450 \text{ Gy/hafta}$
- $U_G = 0.25$
- $\alpha_1(18 \text{ MV}) = 4.5 \times 10^{-3}$  (ek 2 çizelge 8(b), 45 derecelik açıyla gelen, 0 dereceyle yansıyan)
- $\alpha_1(6 \text{ MV}) = 5 \times 10^{-3}$  (ek 2 çizelge 8(b), 45 derecelik açıyla gelen, 0 dereceyle yansıyan)
- $A_1 = 6 \text{ m}^2$
- $d_{LS} = 7.5 \text{ m}$
- $d_{zz} = 11.8 \text{ m}$

$$H_{LS} = \frac{L_f W_L U_G \alpha_1 A_1}{(d_{sec} d_{zz})^2}$$

$$H_{LS} = \frac{(10^{-3})(W\alpha)(0.25)(6.0)}{[(7.5)(11.8)]^2}$$

$$= 0.8 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} = 0.8 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$$

Burada;

$$\begin{aligned} \langle W\alpha \rangle &= [W_L(6 \text{ MV})\alpha_1(6 \text{ MV})] + [W_L(18 \text{ MV})\alpha_1(18 \text{ MV})] \\ &= 450 \times 6.4 \times 10^{-3} + 300 \times 4.5 \times 10^{-3} \\ &= 4.23 \text{ Gy/hafta bulunur.} \end{aligned}$$

#### 4.1.10.3 Hastadan saçılan radyasyon bileşeni $H_{ps}$

Denklem 3.11, Hastadan saçılan ışının G duvarına çarpıp kapıda yarattığı eşdeğer dozu bulmak için kullanılır. Veriler aşağıdaki gibidir:

- $W(18 \text{ MV})=300 \text{ Gy/hafta}$
- $W(6 \text{ MV})=450 \text{ Gy/hafta}$
- $U_G=0.25$
- $F=40 \times 40 \text{ cm}^2$
- $d_{sca}=1 \text{ m}$
- $d_{sec}=7.5 \text{ m}$  izomerkezden  $A_1$ 'e olan uzaklık
- $d_{zz}=11.8 \text{ m}$   $A_1$ 'den kapıya olan uzaklık
- $A_1=6 \text{ m}^2$
- $a(6 \text{ MV})= 1.39 \times 10^{-3}$  45 derece saçılma açısı için 6 MV'nin saçılma katsayısı (ek 2 çizelge 4)
- $a(18 \text{ MV})= 8.64 \times 10^{-3}$  45 derece saçılma açısı için 18 MV'nin saçılma katsayısı (ek 2 çizelge 4)
- $\alpha_1= 2.2 \times 10^{-2}$  45 derecelik açıyla gelen ışınlar için beton duvarın yansımaya katsayısı ve 0.5 MeV tek enerjili fotonlar için 0 derece yansımaya açısı (ek 2 çizelge 8(b))



$$H_{ps} = \frac{\langle W_a \rangle (0.25) \left( \frac{40 \times 40}{400} \right) (2.2 \times 10^{-2}) (6)}{[(1)(7.5)(11.8)]^2}$$

$$= 15 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} = 15 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$$

$$\langle W_a \rangle = [W_L(6 \text{ MV})a(6 \text{ MV})] + [W_L(18 \text{ MV})a(18 \text{ MV})]$$

$$= 450 \times 1.39 \times 10^{-3} + 300 \times 8.64 \times 10^{-4}$$

$$= 884.7 \times 10^{-3}$$

#### 4.1.10.4 Cihaz kafasından sızıp labirent duvarından geçen radyasyon , $H_{LT}$

Denklem 3.12'de kullanılan veriler aşağıdadır:

- $L_f = 1 \times 10^{-3}$
- $W_L(18 \text{ MV}) = 300 \text{ Gy/hafta}$
- $W_L(6 \text{ MV}) = 450 \text{ Gy/hafta}$
- $U_G = 0.25$
- $d_L = d_{hd} = 9.2 \text{ m}$  (Cihazın kafasından kapıya olan uzaklık)

Labirent duvarının kalınlığı ( $t_s$ ) 100 cm'lik betondan oluşmaktadır 18 MV sızıntı radyasyonun beton için  $TVL_1$  ve  $TVL_e$  değerleri sırasıyla 36 ve 34 cm olduğundan bariyer geçiş faktörü B:

$$B(18 \text{ MV}) = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(100-36)}{34}\right]\right\}} = 1.3 \times 10^{-3}$$

Denklem 3.5'ten doz eşdeğeri  $H_{LT}$ ;

$$H_{LT}(18 \text{ MV})$$

$$= (1.3 \times 10^{-3})(300)(0.25)(10^{-3})(9.2)^{-2}$$

$$= 1.15 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} = 1.15 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$$

#### 4.1.10.5 Saçılma ve sızıntı radyasyondan dolayı oluşan toplam doz eşdeğeri, $H_{tot}$

Denklem 3.14 kullanılarak labirent kapısında saçılma ve sızıntı radyasyondan dolayı oluşan toplam doz eşdeğeri bulunur. Hesaplamalarda  $f=0.34$  olarak alınır (6 ve 18 MV ışınların doz derinliği ve iş yüküne göre).

$$\begin{aligned} H_{tot} &= 2.64H_G = 2.64(f H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT}) \\ &= 2.64(0.34 \times 2.5 + 0.8 + 15 + 1.15) \\ &= 47 \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

#### 4.1.11 Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının labirent kapısındaki doz eşdeğeri

Nötron üretimi ve nötronlardan dolayı oluşan gama ışınları doz eşdeğeri yüksek enerjili sızıntı radyasyonun iş yüküne bağlıdır. (Bu örnek için  $W_L(18 \text{ MV})$  kullanacağız). Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının doz eşdeğerini ( $h_\phi$ ) denklem 3.15 kullanılarak elde ederiz. Öncesinde toplam nötron akısını  $\phi_A$  bulmak için denklem 3.16 kullanılır.

- $Q_n = 0.46 \times 10^{12}$  izomerkezdeki birim x-ışını için nötron değeri (ek 2 çizelge 9, 18 MV (Electa synergy) için
- $A = 1$  (Cihazın kafası kurşun olduğundan dolayı) alınır
- $d_1 = 7.3 \text{ m}$  (izomerkezden labirentin eksenini üzerindeki orta noktasına olan uzaklık)(labirentin iç duvarının bittiği yere teğet olacak şekilde)
- $d_2 = 11.2 \text{ m}$  (labirent eksenini boyunca  $d_1$  in bittiği noktadan kapıya olan uzaklık)

Denklem 3.16'da kullanmak için tüm yüzey alanı, ( $S_r$ ) hesaplanır. Odanın ortalama yüksekliği 3 m, ortalama genişlik 8.4 m ortalama uzunluk 8.5 m'dir. Bu yüzden toplam yüzey alanı:

$$\begin{aligned} S_r &= 2[(8.5)(3) + (8.4)(3) + (8.5)(8.4)] \\ &= 244 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Labirentin iç noktasında her izomerkezdeki x-ışını için toplam nötron akısı denklem 3.16'dan aşağıdaki gibi bulunur ( $d_1$  ve  $d_2$  değerleri şekil 3.8'deki uzaklıkları ifade eder).

$$\begin{aligned}\varphi_A &= \frac{\beta Q_n}{4\pi d_1^2} + \frac{5.4\beta Q_n}{2\pi S_r} + \frac{1.3Q_n}{2\pi S_r} \\ &= \frac{(1)(0.46 \times 10^{12})}{(4\pi)(7.3)^2} + \frac{(5.4)(1)(0.46 \times 10^{12})}{(2\pi)(244)} + \frac{(1.3)(0.46 \times 10^{12})}{(2\pi)(244)} \\ &= 2.7 \times 10^9 \text{ nötron}/m^2\end{aligned}$$

Denklem 3.15'ten nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının labirent kapısındaki eşdeğer dozu:

$$\begin{aligned}h_\varphi &= K \varphi_A 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} \\ h_\varphi &= (6.9 \times 10^{-16})(2.7 \times 10^9) 10^{-\left(\frac{11.2}{5.4}\right)} \\ &= 1.57 \times 10^{-8} \text{ Sv/Gy (izomerkezdeki her Gray için)}\end{aligned}$$

Labirent kapısında haftalık nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının doz eşdeğeri denklem 3.17'den bulunur.

$$\begin{aligned}H_{cg} &= W_L(18 \text{ MV})h_\varphi \\ &= (300)(1.57 \times 10^{-8}) \\ &= 4.7 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta} \\ &= 4.7 \mu\text{Sv/hafta}\end{aligned}$$

#### 4.1.12 Labirent kapısındaki nötron doz eşdeğeri

Labirent girişindeki nötron doz eşdeğerini hesaplamak için iki yöntem kullanılacaktır. Bölüm 4.1.10'da labirentin iç giriş alanı  $S_0$  ve ilk giriş alanı  $S_1$ , şekil 4.1'de gösterildiği gibi, iki yöntem için de gerekli değerlerdir. Bu değerler  $S_0 = 9.2 \text{ m}^2$  ve  $S_1 = 8.4 \text{ m}^2$ 'dir. Labirent girişinin dışındaki nötron doz eşdeğeri ( $H_{n,D}$ ), ilk olarak Kersey yöntemiyle hesaplanacaktır. Denklem 3.18 ve bölüm 4.1.10'daki veriler kullanılarak ve  $H_0$  ek 2 çizelge 9'dan alınarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} H_{n,D} &= (H_0) \left( \frac{S_0}{S_1} \right) \left( \frac{d_0}{d_1} \right)^2 10^{-\left(\frac{d_2}{5}\right)} \\ &= (0.44 \times 10^{-3}) \left( \frac{9.2}{8.4} \right) \left( \frac{1.41}{7.3} \right) (10)^{-\left(\frac{11.2}{5}\right)} \\ &= 5.36 \text{ } \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

Farklı bir yol olarak Wu and McGinley metodu ile de nötron doz eşdeğeri hesaplanabilir. Labirent için TVD değeri denklem 3.20 kullanılarak bulunur.

$$\text{TVD} = 2.06 \sqrt{S_1}$$

$$\text{TVD} = 2.06 \sqrt{8.4}$$

$$= 6 \text{ m}$$

Bu değer denklem 3.19'da yerine konularak ve bölüm 4.1.11'deki veriler kullanılarak girişteki nötron doz eşdeğeri bulunmuş olur.

$$\begin{aligned} H_{n,D} &= 2.4 \times 10^{-15} \phi_A \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \left[ 1.64 \times 10^{-\left(\frac{d_2}{1.9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{\text{TVD}}\right)} \right] \\ &= (2.4 \times 10^{-15}) (2.7 \times 10^9) \sqrt{\frac{9.2}{8.4}} \left[ 1.64 \times 10^{-\left(\frac{11.2}{1.9}\right)} + 10^{-\left(\frac{11.2}{6}\right)} \right] \\ &\approx 0.1 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta (İzomerkezdeki her gray için)} \end{aligned}$$

Bu iki değer arasında çok fark olmasının sebebi Kersey metodunda oda tasarımından bağımsız yola çıkılması; bundan dolayı alternatif metodun daha doğru bir sonuca

götürmesidir. Labirent kapısındaki nötron doz eşdeğeri olarak daha sağlıklı bir sonuç elde etmek için değerler olduğundan büyük alınır.

$$\begin{aligned} H_n &= W_L(18 \text{ MV})H_{n,D} \\ &= 300 \text{ Gy/hafta} \times 5.36 \text{ } \mu\text{Sv/Gy} \\ &= 1600 \text{ } \mu\text{Sv/hafta} \end{aligned}$$

Sonuç olarak labirent kapısında haftalık toplam doz eşdeğeri (nötronlardan ve nötron kaynaklı oluşan fotonlardan dolayı):

$$\begin{aligned} H_W &= H_{Tot} + H_{cg} + H_n \\ &= (47 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}) + (4.7 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}) + (1600 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}) \\ &\approx 1650 = 1.65 \text{ mSv/hafta} \end{aligned}$$

#### 4.1.13 Labirent kapısı için zırhlama

Labirent kapısı kontrollü alanda olduğundan zırhlama tasarım hedefi  $P=0,1$  mSv/hafta'dır. Kapıdaki toplam doz eşdeğeri 1,65 mSv/hafta olarak bulunmuştur. Bunun yaklaşık %96'sı nötronlardan, % 3,5'i düşük enerjili saçılma ve sızıntı radyasyondan, %0,5'i nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarından oluşur. Her doz eşdeğerini ayrı ayrı değerlendirmek gerekir.

Labirentin uzunluğuna bağlı olarak zırh kalınlığı, saçılma ve sızıntı radyasyon ( $H_{tot}$ ) için TVL değeri 3 – 6 mm'lik kurşunlar arasındadır (McGiley 2002). Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınları ( $H_{cg}$ ) içinse TVL değeri 61 mm'lik kurşun kalınlığıdır (NCRP, 1984). Saçılma ve sızıntı radyasyon için kullanılan TVL değeri gama ışınlarını durdurmak için kullanılan TVL değerinden çok küçük olursa (burada olduğu gibi) ihmal edilir. Ayrıca nötronları durdurmak için TVL değerine (BPE) gerek vardır.

$H_n = 1600 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$  olan nötron doz eşdeğerini, zırhlama tasarım hedefinin ( $P=100 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$ ) yarısına ( $50 \text{ } \mu\text{Sv/hafta}$ ) indirmek için TVL kalınlığı:

$$n = \log\left(\frac{H_n}{50}\right) = \log\left(\frac{1600}{50}\right) = 1,5$$

45 mm'lik TVL değeri (bkz. bölüm 3,4) kullanılırsa nötronları zırlamak için gerekli kalınlık,  $1.5 \times 45 = 67,5$  mm'lik BPE olur.

Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarını durdurmak için de TVL'nin onda biri yeterli olacaktır. Bu da  $0.1 \times 61 \text{ mm} = 6.1$  mm'lik kurşuna denk gelir. Böylece yaklaşık 6.1 mm kurşun ve 67.5 mm BPE zırlama için yeterli olacaktır. BPE (Borated Polythylene) sandviç şeklinde 6.1 mm'lik kurşunun tam ortasına konulmalıdır (Bölüm 3.4.3). Bu kapı yaklaşık olarak 400 kg civarında olur (Anonymous, 2005).



Şekil 4.2 Zırlamada kullanılan sıradan beton için duvar kalınlığı

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Radyasyonun olumsuz etkileri günümüzde yeni yeni ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kullanıldığı alanlarda (hastanelerde, endüstride ve nükleer santrallerde vb.) güvenlik ve korunma işlemleri daha hassas bir şekilde yürütülmektedir. Pek çok alanda, korunmanın maksimum düzeyde olmasını sağlamak için radyasyon fizikçileri veya radyasyondan korunma danışmanları istihdam edilmektedir.

Zırhlamanın planlama ve hesaplama kısımları birçok faktör göz önünde bulundurularak detaylı işlemler sonucunda yapılır. Burada dikkat edilen unsurlar arasında; cihazın başlığının baktığı duvarın arkasının hangi amaçla (koridor, doktor odası, otopark) kullanıldığından tutun da cihazın tipi, enerjisi, bulunduğu kat ve zırhlamada kullanılacak malzeme cinsi (normal beton, ağır beton, kurşun, parafin) gibi pek çok etken vardır.

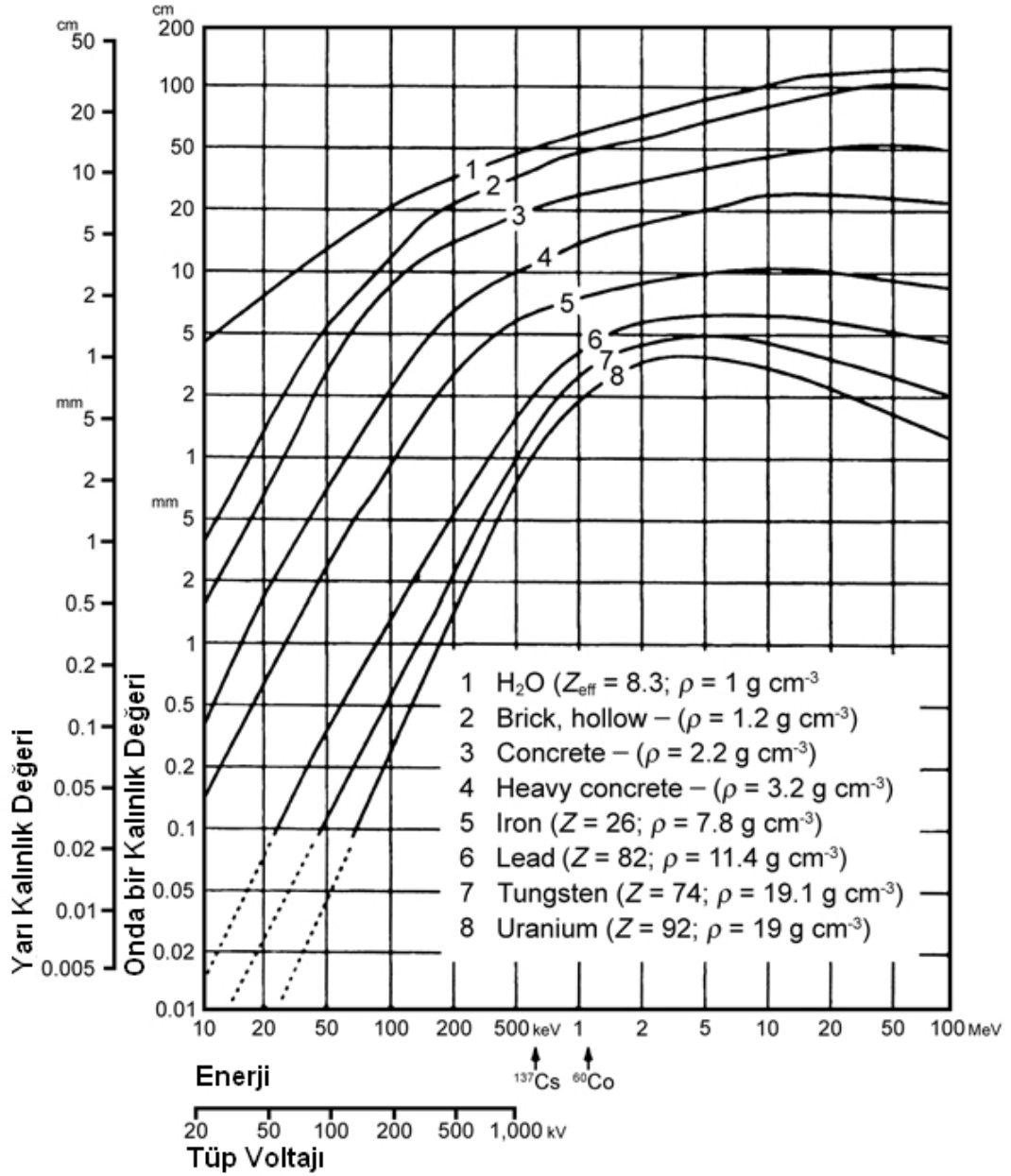
Bu tez çalışmasında lineer hızlandırıcı cihazlarının NCRP 151 ve SRS 47 raporlarına göre beton ve kurşun malzemeleriyle zırhlama hesapları üzerinde durulmuştur. Hesaplamalarda maksimum enerjisi 18 MV olan linac (Electa Sinergy) cihazının zırhlaması incelenmiştir. Cihazın bulunduğu odanın duvar kalınlık değerlerinin, hesaplamalar sonucunda bulunan değerlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durum sızıntı olasılığının çok az, oda zırhlamasının da yeterli düzeyde olduğunu göstermiştir. Nitekim yapılan hesaplamalar sonucunda radyasyon seviyesi Uluslararası Atom Enerjisi Kurumunun belirlediği doz sınır değerlerinden (halk için 1 mSv, radyasyon personeli için 20 mSv) daha düşük bulunmuştur. Gieger-Müller radyasyon ölçüm cihazıyla oda dışında okunan değerler de bunu teyit etmiştir.

## KAYNAKLAR

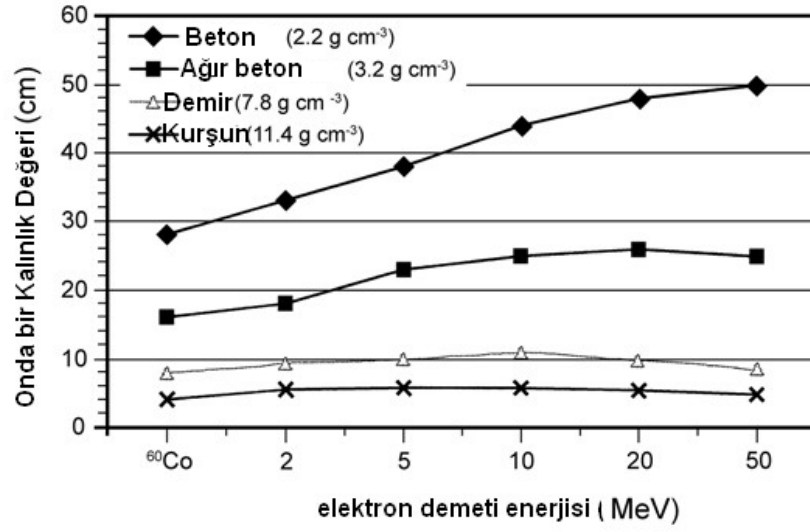
- Anonim. 2011. <http://www.taek.gov.tr/index.html>, Erişim tarihi: 05.08.2011
- Anonymous. 2005. NCRP REPORT No. 151 ISBN-13: 978-0-929600-87-1 ISBN-10: 0-929600-87-8
- Attix, F. H. 2004. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dozimetry, ISBN-13: 978-0-471-01146-0 ISBN-10: 0-471-01146-0, USA
- Beyzadeoğlu, M.M. ve Ebruli C.C. 2008 Temel Radyasyon Onkolojisi, ISBN: 978-975-409-465-7, Ankara
- Engizek, T. 1999. Sağlık Fiziği, İ.Ü. Fen Fakültesi Basımevi, İstanbul
- Khan, F. M. 2003. The Physics of Radiation Therapy, ISBN: 0-7817-3065-1, USA
- Madison, 2000. Radiation Safety of Radiation Workers, University of Wisconsin, ISBN: 0-9670043-0-6
- Martin, J. E. 2006. Physics for Radiation Protection, Second Edition, ISBN-13: 978-3-527-40611-1 ISBN-10: 3-527-40611-5, USA
- Seeram, E. 1997. Radiation Protection, ISBN: 0-397-55032-4, Canada
- Turner, J. E. 2007. Atom, Radiation, and Radiation Protection, ISBN: 978-3-527-40606-7, USA
- William R. H., Geoffrey, S. I., Radiation Theray Physics, Second Edition, ISBN 0-8016-8099-9
- Zırhlama-NCRP-151/SRS-47, Tombakoğlu, M., Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü



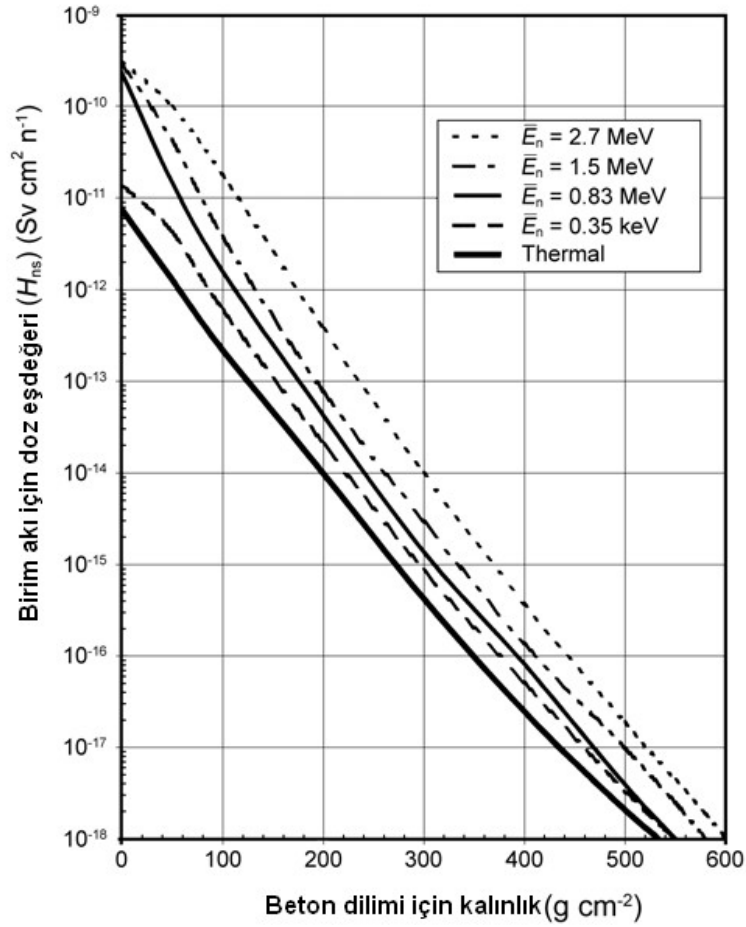
## EK 1 ZIRHLAMADA KULLANILAN MALZEMELER İÇİN HVL VE TVL DEĞERLERİ DOZ EŞDEĞERİ



Şekil 1 Zırhlama malzemelerinin ortalama (denge) HVL ve TVL değerleri (NBS, 1982; Wachsmann ve Drexler, 1975). Örneğin 19 MeV'lik enerji için beton ~44 cm'lik TVL ~13 cm'lik HVL değeri verir. (Eğri 3). Özkütlesi  $2.35 \text{ g/cm}^3$  beton için bu değerın ~0.94 azalacağına dikkat edilmelidir (Yoğunlukla ters orantılıdır,  $2.2/2.35$ ).



Şekil 2 Malzemeler için birincil TVL değerleri (şekil 1'den geliştirilmiştir.)



Şekil 3 Hesaplanan doz eşdeğeri (Nötronlardan dolayı oluşan gama ışınlarının katkısı dahil) (NCRP 1977 den uyarlanmıştır)

## EK 2 HESAPLAMALARDA KULLANILAN ÇİZELGELER

Çizelge 1 Tavsiye edilen meşguliyet faktörleri

Bölge	Meşguliyet Faktörü (T)
Sürekli meşgul alanlar(Sekreterlik, hemşire odası, bekleme odası, tedavi kontrol odası)	1
Tedavi odası, muayene odası	1/2
Koridorlar, çalışan salonu, personel dinlenme odası	1/5
Kapı tonozu	1/8
Umumi tuvaletler, depolar, açık alanlar, tavan araları, hasta bekleme odası, çalışan dolapları	1/20
Otopark alanları, merdivenler, asansörler	1/40

Çizelge 2 Normal Beton için birincil bariyer TVL değerleri ( $2.35 \text{ g/cm}^3$ ), çelik ( $7.87 \text{ g/cm}^3$ ) ve kurşun( $11.35 \text{ g/cm}^3$ ), (cm cinsinden tavsiye edilen değerler).

Enerji (MV)	Malzeme	TVL <sub>1</sub> (cm)	TVL <sub>∞</sub> (cm)
4	Beton	35	30
	Çelik	9.9	9.9
	Kurşun	5.7	5.7
6	Beton	37	33
	Çelik	10	10
	Kurşun	5.7	5.7
10	Beton	41	37
	Çelik	11	11
	Kurşun	5.7	5.7
15	Beton	44	41
	Çelik	11	11
	Kurşun	5.7	5.7
18	Beton	45	43
	Çelik	11	11
	Kurşun	5.7	5.7
20	Beton	46	44
	Çelik	11	11
	Kurşun	5.7	5.7
25	Beton	49	46
	Çelik	11	11
	Kurşun	5.7	5.7
30	Beton	51	49
	Çelik	11	11
	Kurşun	5.7	5.7
Co-60	Beton	21	21
	Çelik	7.0	7.0
	Kurşun	4.0	4.0

Çizelge 3 Bazı zırhlama malzemelerinin özellikleri (Profio, 1979).

	Normal Beton	Ağır Beton	Kurşun	Demir	Poliyeten
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	2.2 – 2.4	3.7 – 4.8	11.35	7.87	0.95
Etkin Atom Numarası	11	-26	82	26	5.5
Hidrojen Konsantrasyonu $\times 10^{22}$ (atom/ $\text{cm}^3$ )	0.8 – 2.4	0.8 – 2.4	0	0	8
Termal Nötron Aktivasyonu	Az	Çok	—*	Orta	Hiç
Fiyat Karşılaştırması	\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$	\$\$	\$\$\$

Çizelge 4 İnsan boyutundaki fantomdan 1m uzakta saçırma katsayısı(a) ve alan ölçüsü  $400 \text{ cm}^2$  (McGinley, 2002; Taylor et al., 1999)

Açı (derece)	Saçılma Fraksiyonu(katsayısı) (a)			
	6 MV	10 MV	18 MV	24 MV
10	$1.04 \times 10^{-2}$	$1.66 \times 10^{-2}$	$1.42 \times 10^{-2}$	$1.78 \times 10^{-2}$
20	$6.73 \times 10^{-3}$	$5.79 \times 10^{-3}$	$5.39 \times 10^{-3}$	$6.32 \times 10^{-3}$
30	$2.77 \times 10^{-3}$	$3.18 \times 10^{-3}$	$2.53 \times 10^{-3}$	$2.74 \times 10^{-3}$
45	$1.39 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-3}$	$8.64 \times 10^{-4}$	$8.30 \times 10^{-4}$
60	$8.24 \times 10^{-4}$	$7.46 \times 10^{-4}$	$4.24 \times 10^{-4}$	$3.86 \times 10^{-4}$
90	$4.26 \times 10^{-4}$	$3.81 \times 10^{-4}$	$1.89 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-4}$
135	$3.00 \times 10^{-4}$	$3.02 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-4}$
150	$2.87 \times 10^{-4}$	$2.74 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-4}$

Çizelge 5 (a) Değişik saçılma açılarında hastadan saçılan radyasyon için betondaki TVL değerleri (cm) (b) Değişik saçılma açılarında hastadan saçılan radyasyon için kurşundaki  $TVL_1$  ve  $TVL_2$  değerleri (cm)(Nogueira ve Biggs, 2002 )

(a)

Saçılma Açısı (derece)	TVL (cm)							
	Co-60	4 MV	6 MV	10 MV	15 MV	18 MV	20 MV	24 MV
15	22	30	34	39	42	44	46	49
30	21	25	26	28	31	32	33	36
45	20	22	23	25	26	27	27	29
60	19	21	21	22	23	23	24	24
90	15	17	17	18	18	19	19	19
135	13	14	15	15	15	15	15	16

(b)

Saçılma Açısı (derece)	4 MV		6 MV		10 MV	
	$TVL_1$ (cm)	$TVL_2$ (cm)	$TVL_1$ (cm)	$TVL_2$ (cm)	$TVL_1$ (cm)	$TVL_2$ (cm)
30	3.3	3.7	3.8	4.4	4.3	4.5
45	2.4	3.1	2.8	3.4	3.1	3.6
60	1.8	2.5	1.9	2.6	2.1	2.7
75	1.3	1.9	1.4	1.9	1.5	1.9
90	0.9	1.3	1.0	1.5	1.2	1.6
105	0.7	1.2	0.7	1.2	0.95	1.4
120	0.5	0.8	0.5	0.8	0.8	1.4

Çizelge 6 Hastadan saçılan radyasyonun ortalama enerjisinin (MeV) saçılma açısı ve maksimum enerjiye göre fonksiyonu (McGinley 2002, Taylor et al., 1999)

Maksimum Enerji (MV)	Saçılma Açısı(derece)							
	0	10	20	30	40	50	70	90
6	1.6	1.4	1.2	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2
10	2.7	2.0	1.3	1.0	0.7	0.5	0.4	0.2
18	5.0	3.2	2.1	1.3	0.9	0.6	0.4	0.3
24	5.6	3.9	2.7	1.7	1.1	0.8	0.5	0.3

Çizelge 7 Normal betonda sızıntı radyasyon için TVL değerleri (cm)

Maksimum(uç) Enerji (MV)	$TVL_1$ (cm)	$TVL_n$ (cm)
4	33	28
6	34	29
10	35	31
15	36	33
18	36	34
20	36	34
25	37	35
30	37	36
$Co-60$	21	21

Çizelge 8.(a) Duvardan yansıma katsayıları. Her bir değer  $10^{-3}$  ile çarpılır (yani 3.0 için  $3.0 \times 10^{-3}$ ). Gantri 0 derecede iken normal betonda bremsstrahlung ve tek enerjili fotonlar için. (b) Duvardan yansıma katsayıları. Her bir değer  $10^{-3}$  ile çarpılır (yani 4.8 için  $4.8 \times 10^{-3}$ ). Gantri 45 derecede iken normal betonda bremsstrahlung ve tek enerjili fotonlar için (c) Duvardan yansıma katsayıları. Her bir değer  $10^{-3}$  ile çarpılır (yani 5.5 için  $5.5 \times 10^{-3}$ ). Gantri 0 derecede iken demirde bremsstrahlung için. (d) Duvardan yansıma katsayıları. Her bir değer  $10^{-3}$  ile çarpılır (yani 6.6 için  $6.6 \times 10^{-3}$ ). Gantri 45 derecede iken normal demirde bremsstrahlung için. (e) Duvardan yansıma katsayıları. Her bir değer  $10^{-3}$  ile çarpılır (yani 3.5 için  $3.5 \times 10^{-3}$ ). Gantri 0 derecede iken kurşunda bremsstrahlung için. (f) Duvardan yansıma katsayıları. Her bir değer  $10^{-3}$  ile çarpılır (yani 4.1 için  $4.1 \times 10^{-3}$ ). Gantri 45 derecede iken kurşunda bremsstrahlung için.

(a)

0 derecedeyken	Betondan yansıma veya saçılma açısı (Yüzey normaline göre yapılan açı)(derece)				
	Kaynak	0	30	45	60
30 MV	3.0	2.7	2.6	2.2	1.5
24 MV	3.2	3.2	2.8	2.3	1.5
18 MV	3.4	3.4	3.0	2.5	1.6
10 MV	4.3	4.1	3.8	3.1	2.1
6 MV	5.3	5.2	4.7	4.0	2.7
4 MV	6.7	6.4	5.8	4.9	3.1
Co-60	7.0	6.5	6.0	5.5	3.8
0.5 MeV	19.0	17.0	15.0	13.0	8.0
0.25 MeV	32.0	28.0	25.0	22.0	13.0

(b)

45 derece için	Betondan yansımaya veya saçılma açısı (yüzey normaline göre)(derece)				
	Kaynak	0	30	45	60
30 MV	4.8	5.0	4.9	4.0	3.0
24 MV	3.7	3.9	3.9	3.7	3.4
18 MV	4.5	4.6	4.6	4.3	4.0
10 MV	5.1	5.7	5.8	6.0	6.0
6 MV	6.4	7.1	7.3	7.7	8.0
4 MV	7.6	8.5	9.0	9.2	9.5
Co-60	9.0	10.2	11.0	11.5	12.0
0.5 MeV	22.0	22.5	22.0	20.0	18.0
0.25 MeV	36.0	34.5	31.0	25.0	18.0

(c)

0 derece için	Demiden yansımaya veya saçılma açısı (yüzey normaline göre)(derece)				
	Kaynak	0	30	45	60
30 MV	5.5	4.7	4.4	3.8	2.3
18 MV	5.1	4.5	4.3	3.8	2.4
10 MV	5.0	4.5	4.3	3.9	2.5
6 MV	5.5	4.9	4.7	4.2	2.8
4 MV	6.0	5.4	5.1	4.8	3.1



(d)

45 derece için	Demirden yansına veya saçılma açısı (yüzey normaline göre)(derece)				
	Kaynak	0	30	45	60
30 MV	6.6	6.5	6.3	5.5	4.6
18 MV	6.5	6.4	6.2	6.0	5.6
10 MV	6.1	6.8	7.1	7.2	7.2
6 MV	6.0	7.0	8.5	9.0	9.5
4 MV	7.1	8.1	10.0	10.6	11.5

(e)

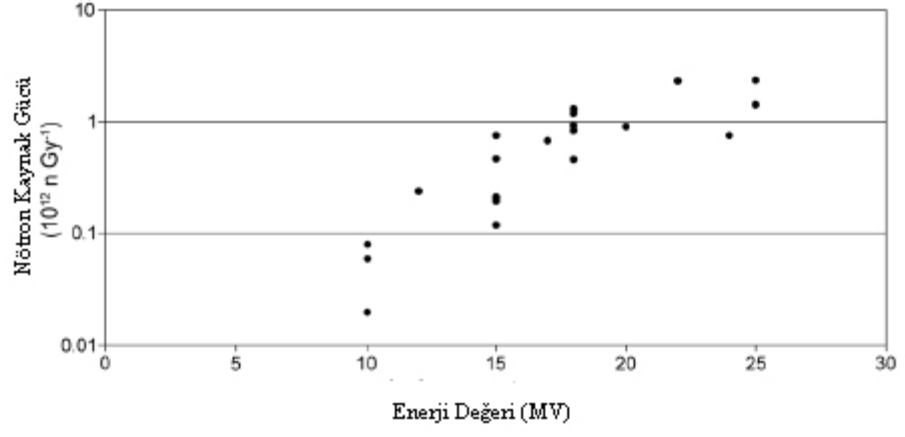
0 derece için	Kurşundan yansına veya saçılma açısı (yüzey normaline göre)(derece)				
	Kaynak	0	30	45	60
30 MV	3.5	3.0	2.7	2.4	1.5
18 MV	3.9	3.4	3.2	2.8	1.8
10 MV	4.5	3.9	3.6	3.2	2.2
6 MV	5.0	4.5	4.2	3.8	2.6
4 MV	5.9	5.2	4.7	4.2	3.0

(f)

45 derece için	Kurşundan yansına veya saçılma açısı (yüzey normaline göre)(derece)				
	Kaynak	0	30	45	60
30 MV	4.1	4.2	4.1	3.7	3.2
18 MV	4.9	5.0	5.0	4.8	4.5
10 MV	5.4	5.8	6.0	5.9	5.8
6 MV	6.5	6.8	7.0	7.3	7.8
4 MV	6.5	7.6	8.3	8.6	9.0

Çizelge 9 Kaynaktan 1.41 metre uzakta nötron doz eşdeğeri ( $H_0$ )'nin izomerkezdeki x ışınlarının birim soğrulan doza oranı (mSv/Gy) ve kaynak kafasından (gantri) yayılan toplam nötron kaynak gücü ( $Q_n$ ).  $Q_n$ 'nin uç enerjiye bağlı fonksiyonel grafiği ek 2 şekil 1'de verilmiştir.

Marka	Model	Uç enerji (MV)		$H_0$ mSv / Gy	$Q_n$ Birim Gray başına nötron ( $\times 10^{12}$ )	Referans
		Nominal	Using AAPM (1983)			
Varian	1800	18	16.6	1.02 – 1.6	1.22	McGinley (2002)
	1800	15		0.79 – 1.3	0.76	McGinley (2002)
	1800	10		0.04	0.06	McGinley (2002)
	2100C*	18			0.96	Followill <i>et al.</i> (2003)
	2100C*	18			0.87	Followill <i>et al.</i> (2003)
	2300CD	18			0.95	Followill <i>et al.</i> (2003)
	2500	24			0.77	Followill <i>et al.</i> (2003)
Siemens	KD	20	16.5	1.1 – 1.24	0.92	McGinley (2002)
	MD*	15		0.17	—	McGinley (2002)
	MD2	10			0.08	Followill <i>et al.</i> (2003)
	MD*	15			0.2	Followill <i>et al.</i> (2003)
	KD	18			0.88	Followill <i>et al.</i> (2003)
	Primus	10			0.02	Followill <i>et al.</i> (2003)
	Primus*	15			0.12	Followill <i>et al.</i> (2003)
Philips/Electa	SL25*	25	22	2.0	2.37	McGinley (2002)
	SL20	20	17	0.44	0.69	McGinley (2002)
	SL20	18			0.46	Followill <i>et al.</i> (2003)
	SL25	18			0.46	Followill <i>et al.</i> (2003)
	SL25*	25			1.44	Followill <i>et al.</i> (2003)
GE	Saturne41	12	11.2	0.09	0.24	McGinley (2002)
	Saturne41	15	12.5	0.32	0.47	McGinley (2002)
	Saturne43*	18	14.0	0.55	1.50	McGinley (2002)
	Saturne43*	18			1.32	Followill <i>et al.</i> (2003)
	Saturne43	25	18.5	1.38	2.4	McGinley (2002)



Şekil 1 çizelge 9 yardımıyla çizilen nötron kaynak gücün enerjiye bağlı fonksiyonunun grafiği

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Mehmet Nuri ÇATAK

**Doğum Yeri** : İdil / Şırnak

**Doğum Tarihi** : 1979

**Medeni Hali** : Evli

**Yabancı Dili** : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

**Lise** : Mersin Anadolu Meslek Lisesi, 1998

**Lisans** : ODTÜ, Fizik Bölümü, 2004

**Yüksek Lisans** : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı (Şubat 2012)

### Çalıştığı Kurum / Kurumlar ve Yıl:

Hacettepe Üniversitesi Hastaneleri, Fizikçi / Radyasyon Güvenlik Uzmanı,  
2009 - ...