

Radyasyon Zırhlama

Mehmet Tombakoğlu

Hacettepe Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

15. Medikal Fizik Kongresi

Neden Radyasyon Zırhlama

- Kanser tedavisinde kullanılan radyolojik tekniklerin gelişmesi ve cihazların değişimi ve yüksek enerjili radyasyon demetlerinin tedavi amaçlı kullanımı, bu tesislerin zırhlanmasında ve bu tesislerden kaynaklı çalışanlar ile halkın alacağı dozun kabul edilebilir seviyede sınırlandırılmasında düzenlemeler yapılmasını gerektirmektedir.

Temel Tanımlar ve Birimler

- H : doz eşdeğeri, birimi (J kg^{-1}) sievert (Sv).

Kalite faktörü ile Yutulan(absorbe) doz (D) [gray (Gy)] çarpımı cinsinden tanımlanmıştır.

- Kontrollü-denetimli alan: Tedavi odası ve kontrol odası gibi girişlerin sınırlandırıldığı ve radyasyondan korunma görevlisinin kontrolü altında çalışanların izlendiği yerler
- Kontrollü alan harici tüm yerler ise denetimli olmayan alan ya da SRS-47 raporundaki tanım ile gözetlenen alan

Temel Tanımlar ve Birimler

- P: Tasarım hedefleri tanımlanırken doz eşdeğeri (H) kullanılmakta ve etkin doz, E, hesaplarda dikkate alınmamaktadır.
- Kontrollü alanlarda: Zırhlama tasarım hedefi (P) (doz eşdeğeri): 0.1 mSv /hafta ve (5 mSv/yıl)
- Kontrolsüz alanlar: Zırhlama tasarım hedefi (P) (doz eşdeğeri): 0.02 mSv /hafta ve (1mSv/yıl)
- Bu sınırlamalar NCRP raporunda önerilen değerler olup IAEA tarafından önerilen tasarım kriterleri farklılıklar göstermektedir.

Tasarım Kriterlerinin, Tasarım Hedeflerinden (P), Etkin Doza (E) Geçiş Etkileri

- Kullanılan tasarım kriterleri ve kabuller etkin doz limitlerinin de aşılmadığını göstermektedir.
- Bunun nedenleri ise,
 - Birincil ışın demetinin hasta üzerinde soğurulması ihmal edilmekte, yaklaşık %30
 - Zırhlama hesabında zırh kalınlıkları parçacıkların en kısa mesafeyi kat edecekleri düşünülerek yapılmakta
 - Radyoterapi cihazlarındaki sızıntı miktarı önerilen sınırların maksimumu alınarak yapılmaktadır
 - Meşguliyet faktörleri pratik değerlerden yüksek tutulmuştur
 - Kullanım alanlarının en kısa mesafesi 0.3 m alınmıştır
 - Verilerin kısıtlı olduğu durumlarda ise güvenlik çarpanı kullanılmıştır.
 - İki farklı kaynak ya da farklı iki enerjiye sahip radyasyonun kullanımı söz konusu olduğunda girişimi fazla olan radyasyon kaynağından elde edilen zırh kalınlıkları kullanılmaktadır

Tasarım hedeflerinin uygunluğu

- Zırhlama hesaplarının tasarım hedeflerine uygunluğunun ölçümlerle kontrolü ve uygunluğunun tespiti
- Hesaplar bir haftalık olarak yapılmakta olup, anlık ve kısa süreli ölçümlerin hesaplarda kullanımı için uygun dönüşümlerin uygun faktörlerle yapılması gerekmektedir.

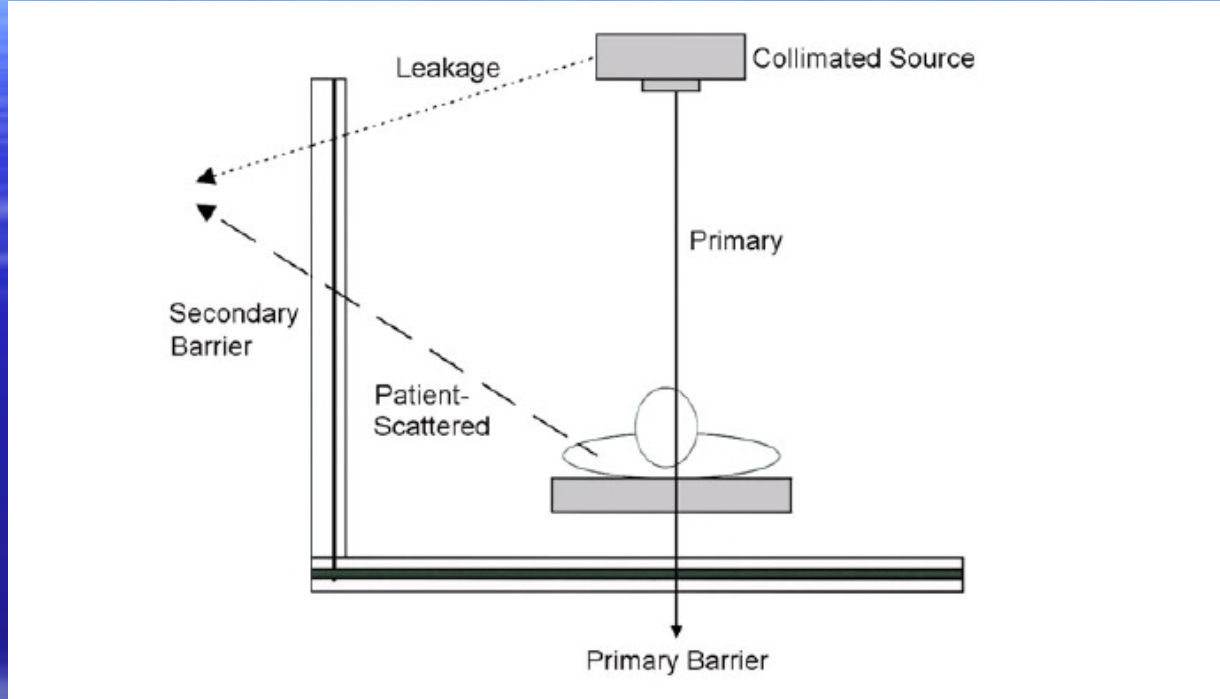
Temel Tanımlar ve Birimler

- W (workload) İş-yükü (soğurulan absorbe dozun zaman üzerinden integrali olup kaynaktan 1 m uzaktaki maksimum doz değeridir.
- Standart yöntem: NCRP49 da $W=1,000$ Gy/hafta 10 MV altı hızlandırıcılarda ve daha yüksek enerjilerde ise NCRP51 $W=500$ Gy/hafta önerilen değerler olup iş-yükü hesaplamaları yapılamadığı zamanlarda kullanılmaktadır.

Temel Tanımlar ve Birimler

- Use Factor, (**U**) Kullanım faktörü, tedavi tipine ve yöntemine göre kullanılacak birincil zırhlama bariyerlerinin toplam iş yükünün yüzde kaçında etkin olarak işlevi olduğunu belirlemek amacıyla kullanılmaktadır,
- Occupancy Factor, T, zırhlama yapılan bölgedeki radyasyona maruz kalınan ortamın kullanım oranı olarak tanımlanabilir.
- Örneğin tedavi odasının bitişiğindeki kontrolsüz bir alan için $T=1/40$ verilmiş ise, bunun anlamı o alanın bir yıl boyunca ortalama olarak haftada 1 saat maksimum ışınlanmış birey tarafından kullanılacağı kabul edilmektedir

Temel Tanımlar



- Birincil Bariyer, tedavi amaçlı kullanılan ışın demetinin zırhlanmasında kullanılmakta
- İkincil Bariyer ise hastadan saçılan ve tedavi cihazından sızan radyasyonun zırhlanmasında kullanılmaktadır.

Zırhlamada Temel Prensipler

- Eşdeğer doz mesafenin karesiyle ters orantılı
- Işınlama süresinin sınırlandırılması
- Kaynak ve ışınlamaya maruz kalması muhtemel birey arasında koruyucu zırhlama yapılması bireyin alması muhtemel eşdeğer dozu da sınırlandıracaktır.

Radyasyon Zırhlama Hesabı

- Radyasyon Kaynağı tipi
- Radyasyonun konum ve enerji bağımlılığı
- Zamana göre dağılımı
- Radyasyonun madde ile etkileşme mekanizmaları
- Radyasyonun etkileşimi sonucu açığa çıkan ikincil radyasyon kaynaklarının belirlenmesi

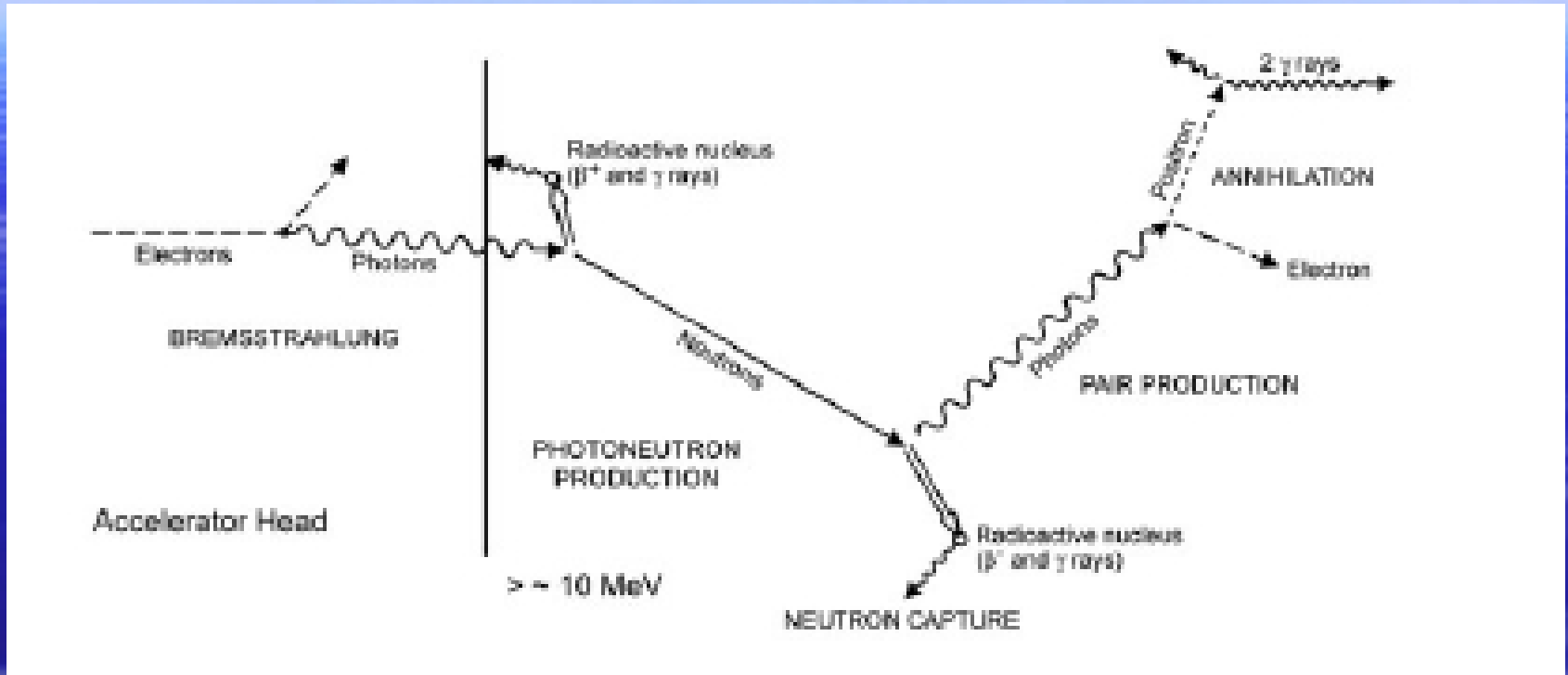
Radyasyon Zırhlama Hesaplama Yöntemleri

- Radyasyon taşınım denklemini çözmek
Deterministik yöntemler kullanarak
Stokastik yöntemler kullanarak
Standart deneysel ve hesaplama yöntemleri
sonucu oluşturulmuş ampirik denklemleri
kullanarak

Radyasyon Zırhlama Hesaplama Yöntemleri

- Radyasyon taşınım denklemini çözmek
 - Foton transport denklemini konumun enerjinin ve acının fonksiyonu cinsinden yazarak enerji açısı ve konum üzerinden sayısal yöntemler kullanılarak çözümü,
 - Foton etkileşme mekanizmalarını tanımlayan tesir kesitlerinin (Compton saçılması, fotoelektrik etki ve çift oluşumu gibi) malzeme özelliklerine göre ve foton enerjileri için tanımlanması gerekir. Açığa ikincil parçacık foto nötron da olabilir.

Radyasyonun madde ile etkileşimi



Foton etkileşme mekanizmaları ve ikincil parçacıklar

(<http://t2.lanl.gov>)

(<http://www-nds.iaea.org>)

Radyasyon Zırhlama Hesaplama Yöntemleri

- Stokastik yöntemler (Monte Carlo Yöntemi)
 - Monte Carlo metodu, fiziksel olayların olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak hesaplanması olarak adlandırılabilir. Deterministik yöntemler sistemdeki parçacıkların transportu incelendiğinde sistemdeki etkileşmeler sonucu oluşan ortalama yanıt ne olur sorusuna cevap vermektedir.

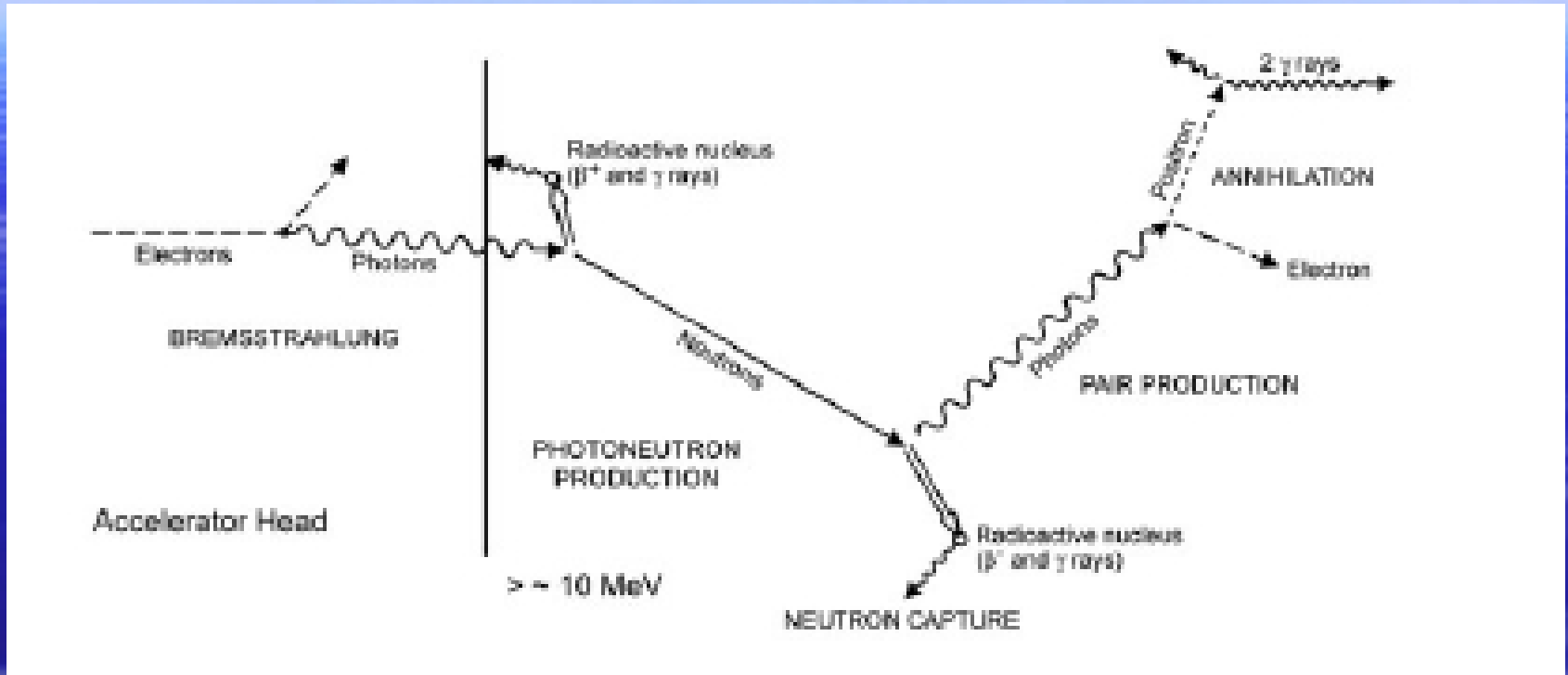
Radyasyon Zırhlama Hesaplama Yöntemleri

- Stokastik yöntemler (Monte Carlo Yöntemi)
 - Örnek: Tamamen nötron yutucu bir malzemenin kalınlığı x_1 (yarılanma mesafesi) olsun.
 - İki nötron sisteme soldan dik olarak girdiğinde sağdan kaç parçacık çıkacak diye sorarsak cevap deterministic yöntemleri uygularsak 1 deriz. Üç nötron girerse sisteme ???

Radyasyon Zırhlama Hesaplama Yöntemleri

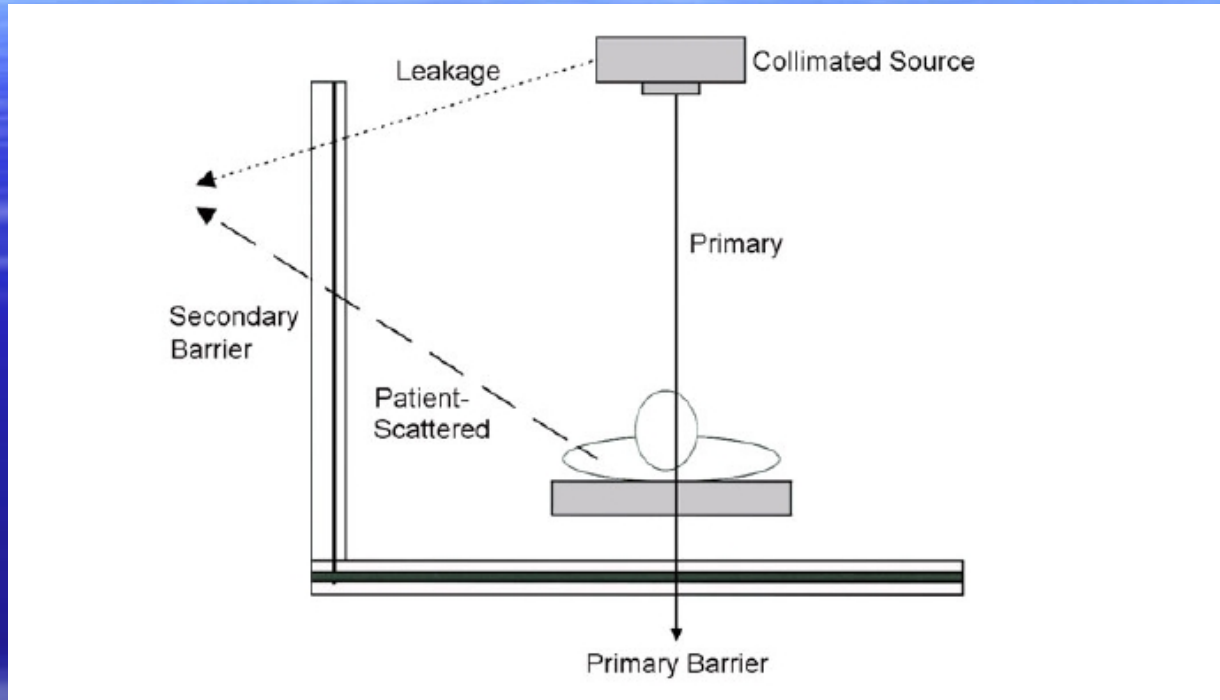
- Stochastic yöntemler (Monte Carlo Yöntemi)
 - Monte Carlo yönteminde ise nötronun etkileşme yapacağı mesafe olasılık dağılım fonksiyonu kullanılarak örneklenir ve parçacığın bazen ikisi bazen üçü bazen ise hiç biri sistemden çıkamaz. Sistemdeki etkileşme mekanizmalarını kullanarak bu benzeşimler tekrarlandığında ortalama değer belli bir hata sınırı içinde bulunur.

Radyasyonun madde ile etkileşimi



Foton etkileşme mekanizmaları ve açığa çıkan ikincil parçacıklar benzeşim yöntemi sonucu bulunmaktadır.

Monte Carlo Yöntemi



Geometri ve malzeme bilgileri, Kaynak terimleri, Hesaplanması istenen niçelikleri belirlemek için kullanılan ceteleme ve benzeri .

Monte Carlo Yöntemi Gerekli Mi

- National Council on Radiation Protection and Measurements Raporları (NCRP Report Nos. 51, 79, and 151).
- Standart malzemenin, geometrinin yada uygulamaların dışına çıkıldığında Monte Carlo yöntemi kullanmak gerekmektedir.

Monte Carlo Yöntemi

- Sonuçların yorumlanması ve belirsizlikler
 - Kullanılan geometri ile kaynak tanımı ve malzeme etkileşim tesir kesitlerindeki belirsizlikler (sistemetik hata)
 - Olayın doğası gereği örneklemeelerin yeterli olmamasından kaynaklı (rastsal hatalar)

AMPİRİK YÖNTEMLER

- NCRP 151 (national council on radiation protection and measurement) NCRP'den medikal radyoterapi merkezlerinin tasarımı ile ilgili bilim kurulu ile Amerika Medikal Fizikçileri Birliği tarafından yüksek enerjili X ışınları ile γ -ışınları kullanan tedavi merkezlerinin tasarım ve zırhlanmasında referans kaynak oluşturmak ve teknik verileri sunmak üzere hazırlanmıştır.

NCRP-151

- NCRP-151 1979 yılında çıkarılan NCRP Rapor No. 49 un yerini almıştır. Fakat 500 kV altı X-ışınları tedavi merkezleri ve brachytherapy tesisleri için NCRP Rapor No. 49'daki bilgiler geçerli olup, tedavi benzeşim üniteleri için ise NCRP 147 görüntüleme merkezleri zırhlanması raporu kullanılmalıdır.

NCRP-151

NCRP no 49 dan sonra ortaya çıkan temel değişimler

- – yeni cihazlar,
- – 10 MV üzerinde parçacıklar,
- – yeni kullanım teknikleri,
- – aynı anda iki farklı enerji,
- – oda tasarımlarındaki değişiklikler,
- – yeni zırhlama malzemeleri ve kompozitler
- – ampirik metotlar la ilgili yeni veriler
- – anlık doz hızı yorumları

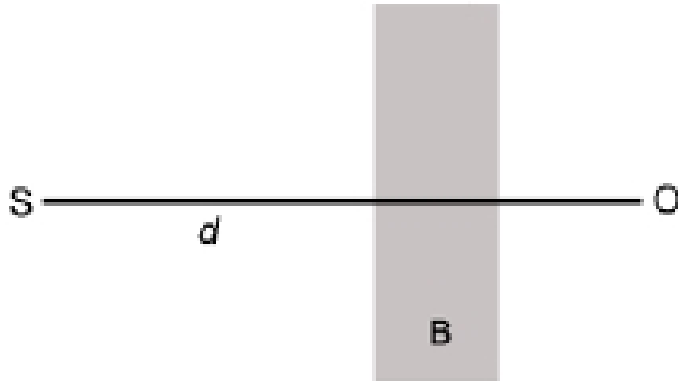
SRS-47 Raporu

- Bu rapor

H.M. Morgan, The Royal United Hospital, Bath, United Kingdom, ile

R.K. Wu The Eastern Virginia Medical School, Norfolk, Virginia, and Ohio Health Hospitals, Columbus, Ohio, USA. tarafından hazırlanmış olup, IAEA sorumlusu ise E. Reber (Division of Radiation, Transport and Waste Safety).

Basit zırhlama şeması



$$B_{\text{pri}} = \frac{P d_{\text{pri}}^2}{WUT}$$

- O noktasındaki bireyin S noktasındaki kaynaktan B deki zırhla korunması,

Zırh kalınlığı hesabı

Birincil bariyer

P tasarım hedefi

$$B_{pri} = \frac{P d_{pri}^2}{WUT}$$

T=meşguliyet faktörü

B_{pri}=geçiş faktörü

Bariyer kalınlığı

TVL sayısı n ile verilmekte olup, bariyer kalınlığı için
T_{barrier} değeri tabloda verilmektedir.

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

$$t_{\text{barrier}} = TVL_1 + (n - 1) TVL_e$$

Toplam geçiş faktörü bariyer kalınlığının fonksiyonu olarak

Beton kullanıldığında zaman bu denklem kullanımı farklı

$$B = (10^{-1}) 10^{-\left[\frac{(1 - TVL_1)}{TVL_0} \right]}$$

Geçiş faktörü hesabı

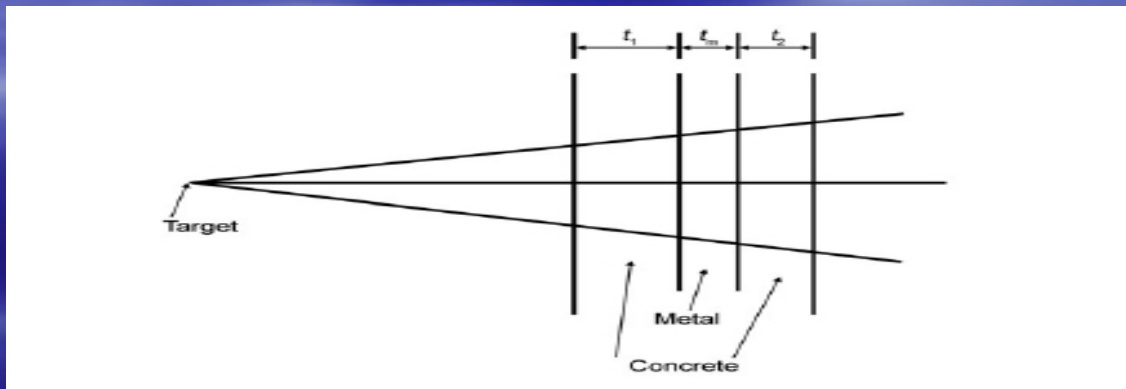
Toplam geçiş faktörü her bir bariyer malzemesi için hesaplanan geçiş faktörlerinin çarpımı cinsinden yazılabilir ve

$B_T = B_{\text{beton}} * B_{\text{kurşun}} * B_{\text{çelik}}$ olarak verilir.

Foton enerjisi $E < 10$ MeV ise

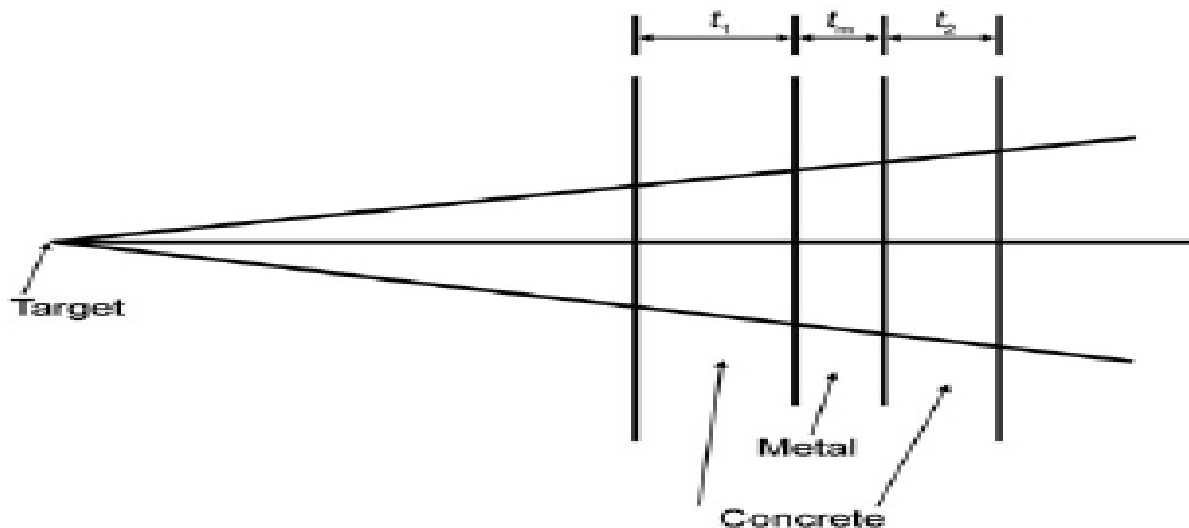
Toplam geçiş faktörü

Foton enerjisi $E < 10$ MeV değil ise, foto-nötronlarla, ikincil γ -ışınlarından kaynaklanacak zırhlama gereksinimleri dikkate alınmalıdır. McGinley metodu bu amaçla kullanılmaktadır ve basitçe çizimi verilen sistem için



1. Nötron doz eşdeğeri hesabı

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



2. Toplam doz eşdeğeri hesabı

$$H_{\text{tot}} = H_n + H_{\text{phtr}}$$

$$H_{\text{phtr}} = 2.7 * H_{\text{tr}}$$

H_{phtr} = toplam doz eşdeğeri x-ve γ - ışınından kaynaklı

H_{tot} = toplam doz eşdeğeri, tasarım kriterini P sağlamalı.

İkincil Bariyer

- Sızıntı kaynaklı
- Saçılma kaynaklı Hastadan
- Saçılma kaynaklı Duvarlardan
- Hızlandırıcıda oluşan ikincil radyasyonlara karşı foto-nötron ve γ -ışınları

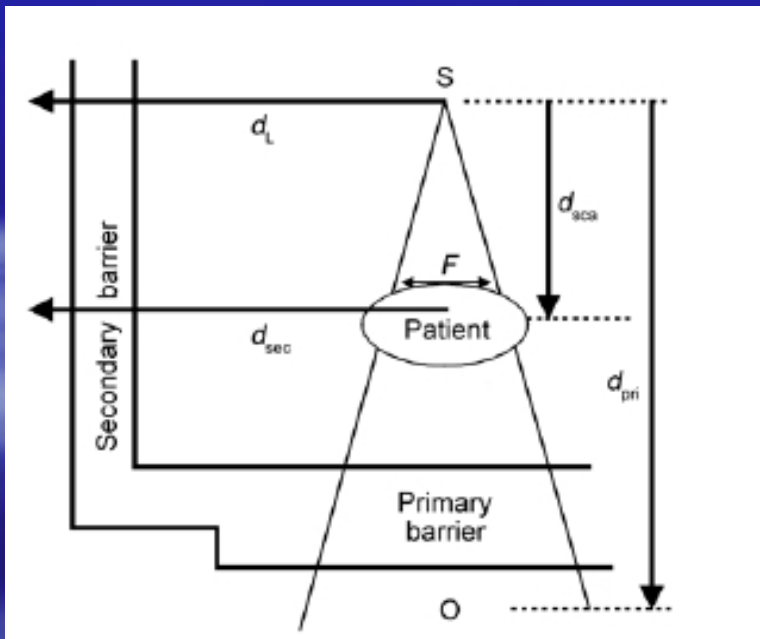
Her bir durum için ayrı ayrı hesap yapılmakta ve iki kaynak yöntemi bariyer kalınlığı hesabında kullanılmaktadır.

İkincil Bariyer

Sızıntı geçiş faktörü

- Sızıntı kaynaklı
IMRT W İş Yüğü Faktörü
düzeltmesi yapılmalı

$$B_L = \frac{P d_L^2}{10^{-3} W T}$$

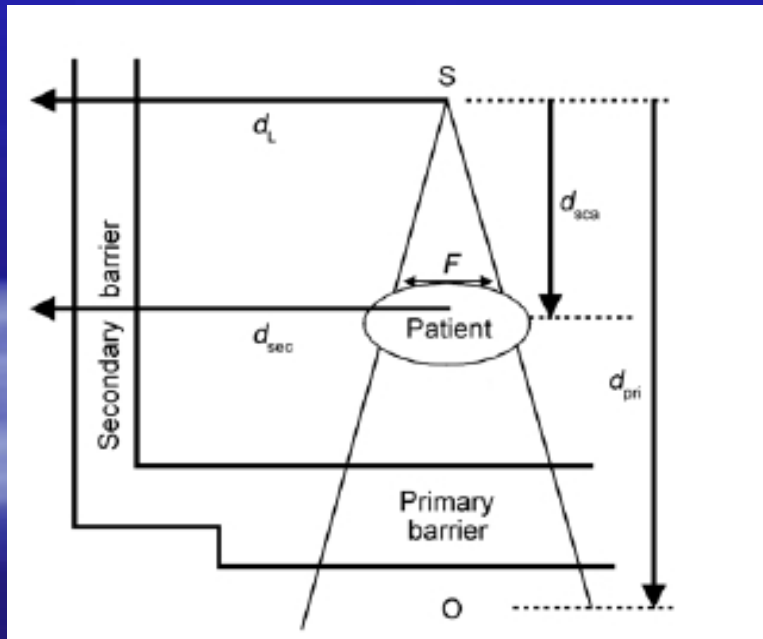


İkincil Bariyer

Sızıntı geçiş faktörü

- Saçılma kaynaklı

$$B_{ps} = \frac{P}{aWT} d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{F}$$



İkincil Bariyer

İki kaynak yöntemi

- Bu hesaplamalar sonucu bulunan bariyer kalınlıkları aynı ise bir HVL eklenerek toplam bariyer kalınlığı bulunur eğer iki ölçüm arası 1 TVL den fazla ise büyük değer kullanılarak bariyer kalınlığı seçilir.

Kapılar ve Şaşırtma Koridoru

- Bu hesaplamalar da ikincil bariyer hesaplamalarıyla benzeşim göstermekte ve hesaplamalarda saçılan radyasyondan kaynaklanan ya da ikincil radyasyonun zırhlanmasını gerektiren durumlar irdelenmektedir. Bu nedenle birincil radyasyon enerjisine göre de metot farklılık gösterecektir.

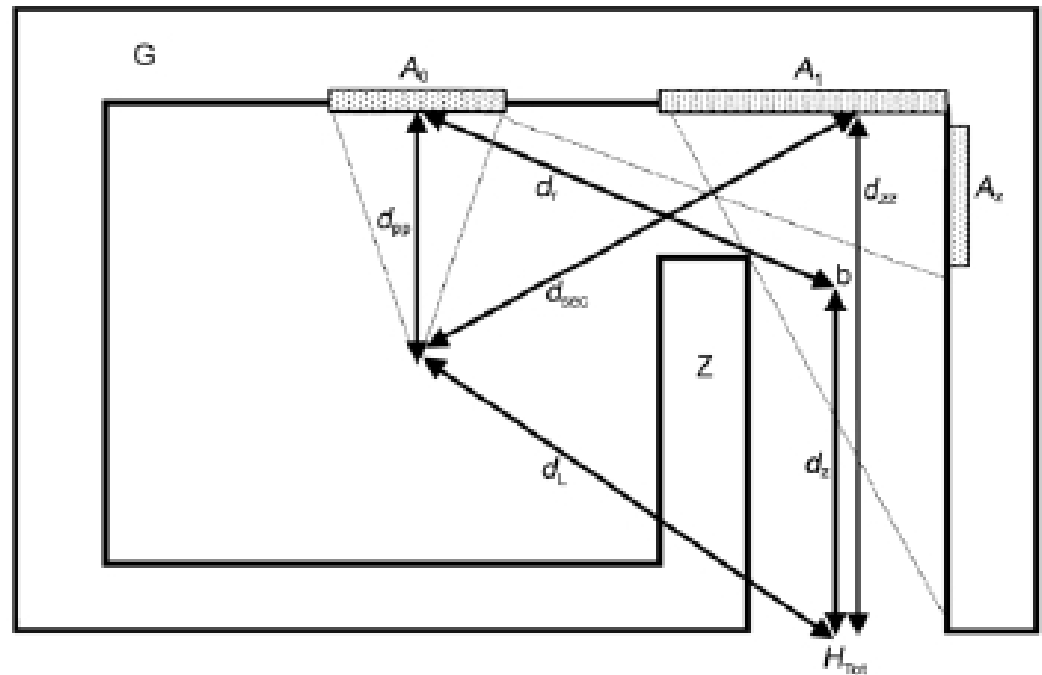
Kapılar ve Labirentler(Koridorlar)

$$E < 10 \text{ MeV}$$

- Labirent kapısındaki radyasyonun temel nedeni olarak (nötron dahil değil)
 - Oda yüzeylerinden saçılan birincil radyasyon
 - Sızıntı kaynaklı radyasyonun oda da saçılması
 - Birincil radyasyonun hastadan saçılması
 - İç koridor duvarından geçen radyasyon

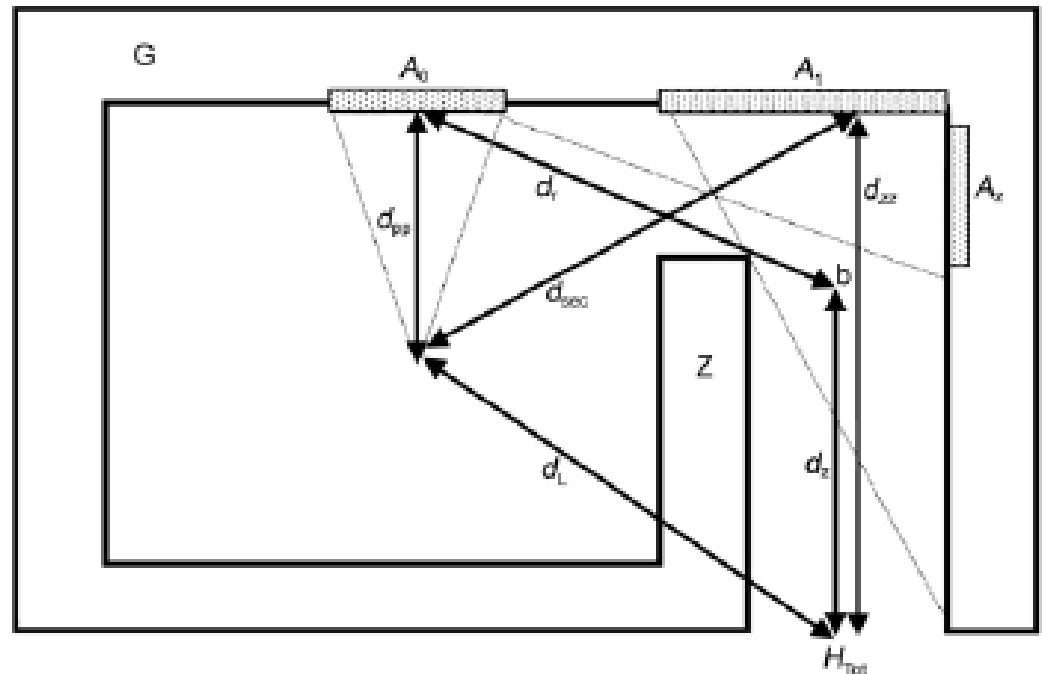
Oda yüzeylerinden saçılan birincil radyasyon

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



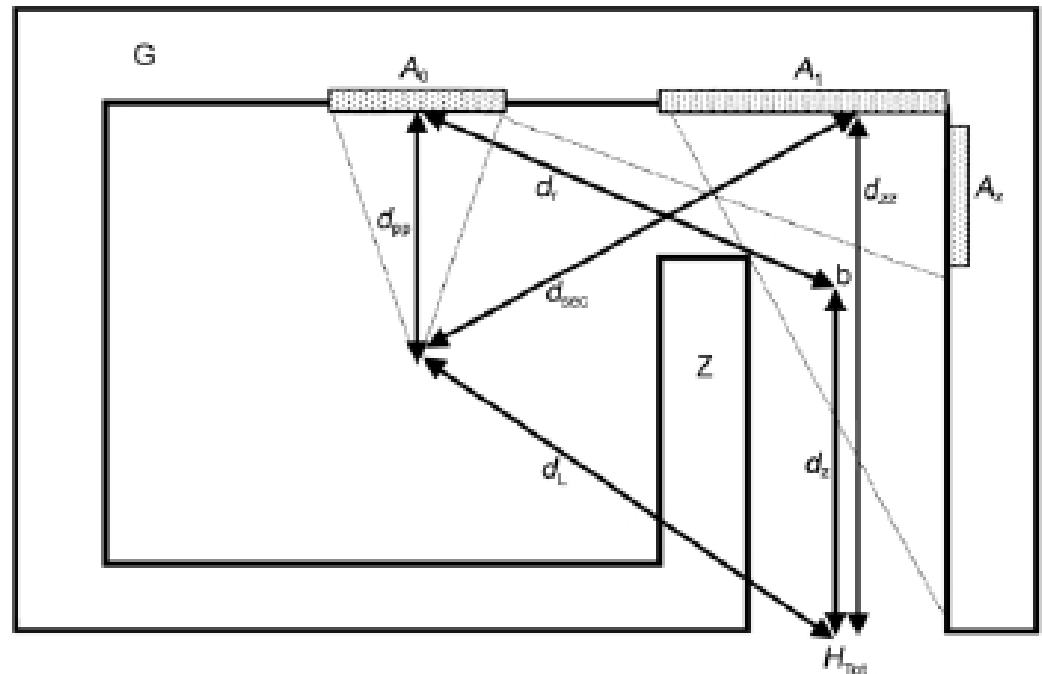
Sızıntı kaynaklı radyasyonun oda da saçılması

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



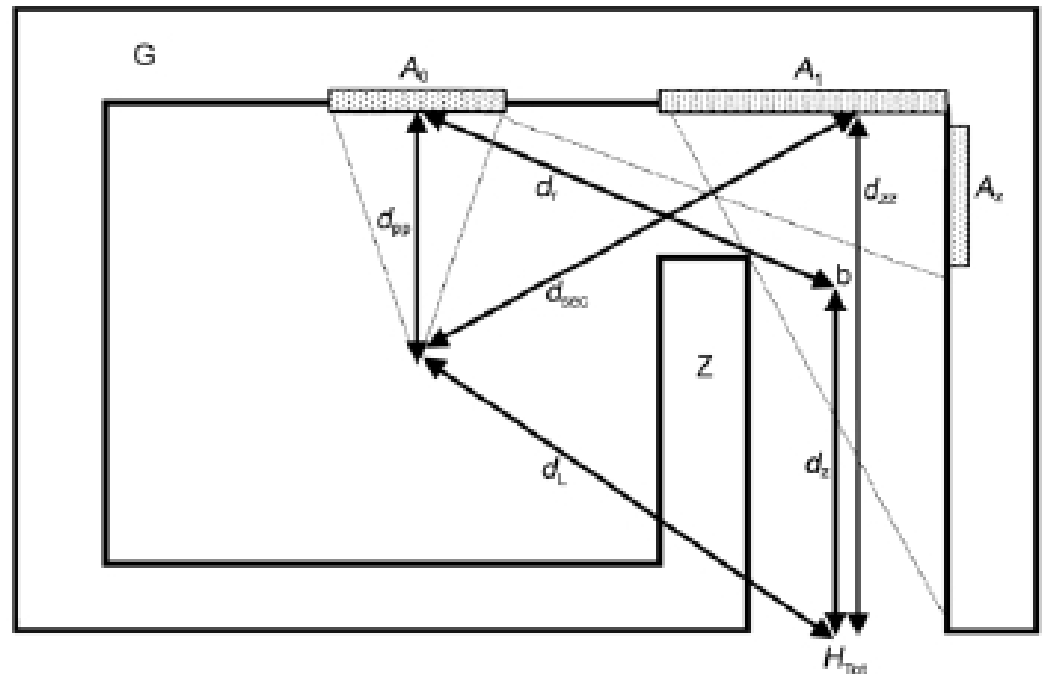
Birincil radyasyonun hastadan saçılması

$$H_{ps} = \frac{a(\theta) W U_G \left(\frac{F}{400} \right) \alpha_1 A_1}{(d_{sca} d_{sec} d_{zz})^2}$$



İç koridor duvarından geçen radyasyon

$$H_{LT} = \frac{L_f W_L U_G B}{d_L^2}$$



Kapılar ve Labirentler(Koridorlar)

$$E < 10 \text{ MeV}$$

- Labirent çıkış kapısında doz eşdeğeri ışın demetinin G duvarına tutulmasından dolayı

Burada f carpanı yaklaşık 1/4 olarak alınmakta

1600 3 fantom da
ve to

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

$$H_{\text{Tot}} = 2.64 H_G$$

Kapılar ve Labirentler(Koridorlar)

$$E > 10 \text{ MeV}$$

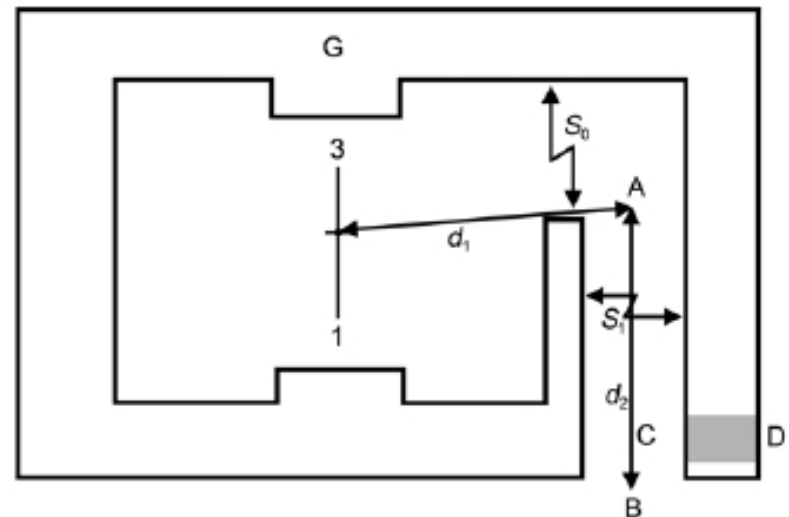
- Nötron yutulması sonucu açığa çıkan γ -ışınları betonda yaklaşık 3.6 MeV enerjiye sahiptirler ve bu ışınlar saçılma sonucu oluşan fotonlara göre daha fazla zırhlama gerektirdiğinden ve foto-nötronlar için gerekli zırhlama da dikkate alındığında saçılma sonucu oluşan düşük enerjili fotonlar önemini yitirmekte ve zırhlama γ -ışınları için yapılmaktadır.

Kapılar ve Labirentler(Koridorlar)

$E > 10 \text{ MeV}$

$$h_{\varphi} = K \varphi_A 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)}$$

h_{φ} , Nötron yutulması sonucu açığa çıkan γ -ışınları için doz eşdeğeri, $K=6.9 \cdot 10^{-16}$ Sv m² birim nötron akısı başına ,TVD=5.4 m 18-25MV TVD=3.9 m 15 MV



E>10MeV

- [Home](#)
[About Us](#)
[Services](#)
[Testimonials](#)
[Contact Us](#)

Kapılar ve Labirentler(Koridorlar)

$E > 10 \text{ MeV}$

Nötron yutulması sonucu açığa çıkan γ -ışınları için foton doz eşdeğeri labirent kapısında

$$H_{cg} = W_L h_{\phi}$$

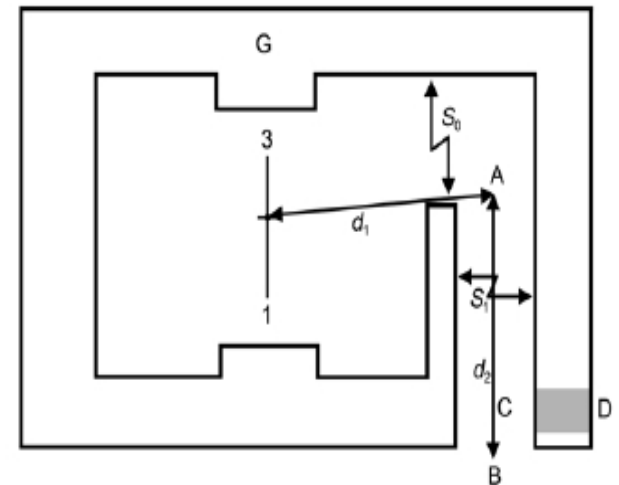
W_L = Haftalık sızan radyasyonun iş yükü

Kapılar ve Labirentler(Koridorlar)

$E > 10 \text{ MeV}$

- Nötron doz eşdeğeri için
- Kersey's metodu
- Değiştirilmiş Kersey's m

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



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

Kapılar ve Labirentler(Koridorlar)

$$E > 10 \text{ MeV}$$

Nötron doz eşdeğeri labirent kapısında

$$H_n = W_L H_{n,D}$$

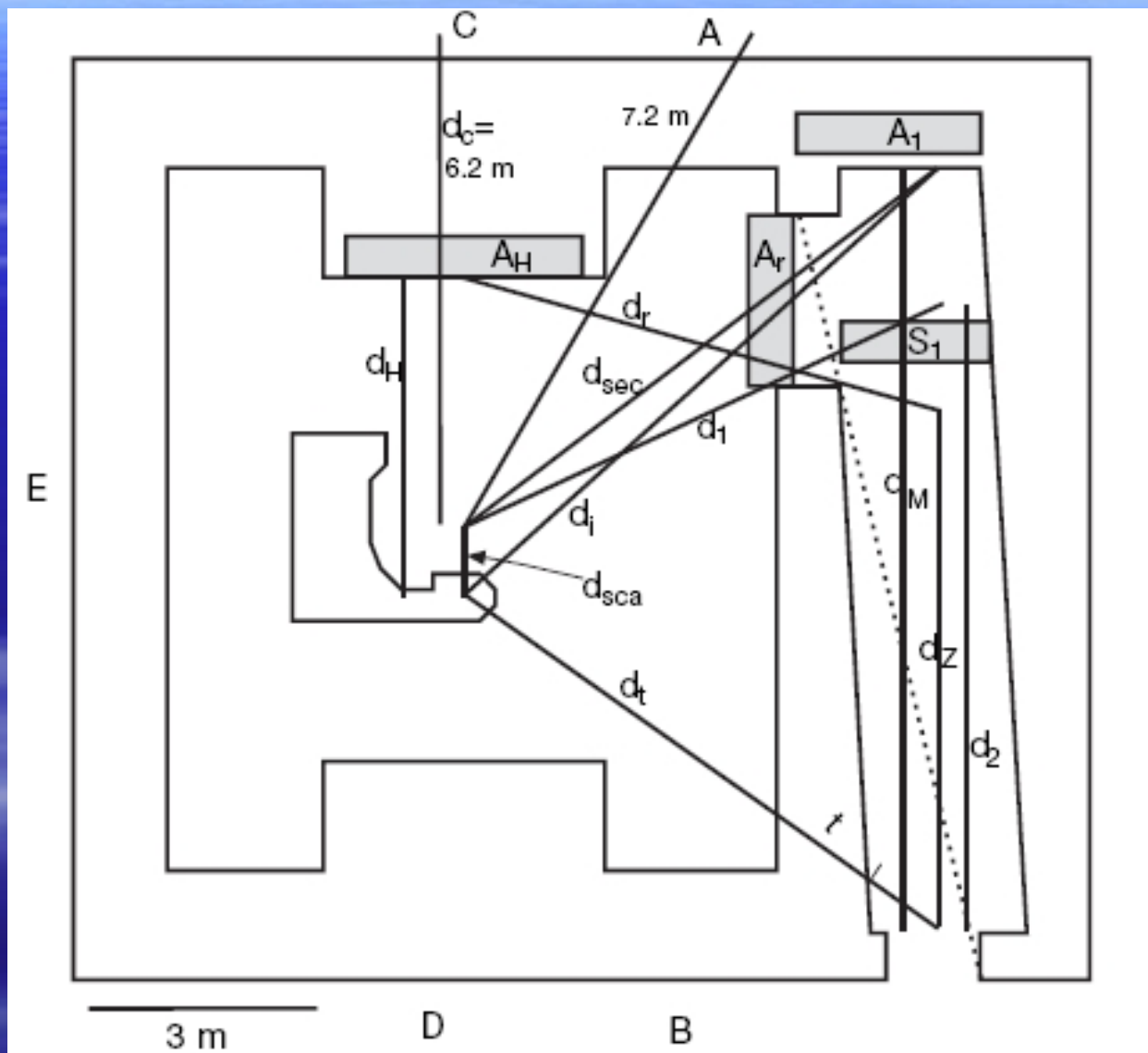
W_L = Haftalık sızan radyasyonun iş yükü

Toplam eşdeğer doz ise bu değerlerin toplamına eşit olup labirent çıkışında eşdeğer doz

$$H_W = H_{TOT} + H_{cg} + H_n$$

BPE ve Kurşun zırhlama amaçlı kullanılmaktadır.

18 MV LINAC ODASI



18 MV LINAC ODASI

- Tedavi odası için denetimli alanda yıllık 5mSv/yıl , gözetimli alan 1mSv/yıl
- Herhangi-bir-saat içinde max 20 μ Sv
- İşyükü 8 saatlik gün, 5 günlük hafta için 40 hasta/gün
- Her hasta için 3 Gy
- LINAC max(normal) doz 12(5) Gy/dakika

18 MV LINAC ODASI

- Birincil Bariyer (C noktası)
 - *P* Kontrolsüz alan dizayn limiti $20 \mu\text{Sv/hafta}$
 - d_c isosentra olan uzaklık, 6,2 m
 - *W* haftada 5 günden işyükü 600 Gy ($40 \times 3 \times 5$)
 - *U* Kullanım faktörü 0.25
 - *T* meşguliyet faktörü 0.0625 (1/16)

$$B = \frac{P(d+\text{SAD})^2}{WUT}$$

$$B = \frac{20 \times 10^{-6} \times (6.2 + 1)^2}{600 \times 0.25 \times 0.0625}$$

$$B = 1.11 \times 10^{-4}$$

18 MV LINAC ODASI

- Birincil Bariyer (C noktası)
 - TVL hesabı
 - $$\text{No. of TVLs} = \log_{10} \left(\frac{1}{B} \right)$$
 - 18 MV X-ışını, TVL=445 mm
Kalınlığı (3.96×445 =) 1762 mm.

18 MV LINAC ODASI

- Birincil Bariyer (C noktası)
 - TADR(Time-averaged dose rate) hesabı
 - LINAC max çıkış 12 Gy/dak
 - IDR(instant. dose rate) Anlık Doz Hızı= 1.54×10^{-3} Gy/saat
 - 1 saatte 12den fazla hasta alınamaz, Max işyükü $3 \times 12 = 36$ Gy
 - 20 μ Sylik sınıır altında kalabildik

$$R_h = \text{IDR} \times \frac{W_h U}{\text{DR}_0}$$

$$R_h = 1.54 \times 10^{-3} \times \frac{36 \times 0.25}{12 \times 60} = 1.93 \times 10^{-5} \text{ Sv}$$

18 MV LINAC ODASI

- Birincil Bariyer (C noktası)
 - Sızıntı (Leakage)

$$B_L = \frac{1000 P d_s^2}{WT}$$

$$B_L = \frac{1000 \times 20 \times 10^{-6} \times 6.2^2}{600 \times 0.0625} = 2.05 \times 10^{-2}$$

Ze radyasyonu korayınca engelleyecektir.

$$n = \log_{10} \left(\frac{1}{2.05 \times 10^{-2}} \right) = 1.69$$

18 MV LINAC ODASI

- Birincil Bariyer (D noktası)
 - Tedavi kontrol alanı için doz limiti 0.1 mSv/hafta
 - $B = \frac{0.1 \times 10^{-3} \times (6.2 + 1)^2}{600 \times 0.25 \times 1} = 3.46 \times 10^{-5}$
 - $(4.46 \times 445 =) 1985 \text{ mm}$

$$n = \log_{10} \left(\frac{1}{3.46 \times 10^{-5}} \right) = 4.46$$

18 MV LINAC ODASI

- İkincil Bariyer (A noktası)
 - Kontrolsüz alanda sızıntı ve hastadan saçılma
Minimum saçılma açısı 30°
 $P = 20 \times 10^{-6} \text{ Sv/hafta}$
 $F = 40 \times 40 \text{ cm}^2$
 $d_s = 7.2 \text{ m}, d_{sca} = 1 \text{ m}, d_{sec} = 7.2 \text{ m}$
 $a = 2.53 \times 10^{-3} (18 \text{ MV}, 2.5 \text{ cm derinlik})$

18 MV LINAC ODASI

- İkincil Bariyer (A noktası)
- Kontrolsüz alanda sızıntı

$$B_L = \frac{1000 \times 20 \times 10^{-6} \times 7.2^2}{600 \times 0.0625} = 2.76 \times 10^{-2}$$

- TVL 18MV 330 mm betondan (1.56x330=)515mm

18 MV LINAC ODASI

- İkincil Bariyer (A noktası)
- Kontrolsüz alanda hastadan saçılma

$$B_p = \frac{Pd_{sca}^2 d_{sec}^2}{aWT(F/400)}$$

$$B_p = \frac{20 \times 10^{-6} \times 1 \times 7.2^2}{2.53 \times 10^{-3} \times 600 \times 0.0625 \times (40 \times 40 / 400)} = \times 10^{-3}$$

- TVL 30° hastadan saçılma 288 mm betondan
(2.56×288 =) 737 mm
- 737mm-515mm 1TVLden küçük olduğundan gerekli kalınlığa 1HVL ekliyoruz. 330mm TVL için 1HVL=99mm. Gerekli bariyer kalınlığı=836 mm

18 MV LINAC ODASI

- İkincil Bariyer (A noktası)
- TADR(Time-averaged dose rate) hesabı
 - *Saçılma oranı* $a = 2.53 \times 10^{-3}$

$$\text{IDR}_p = \frac{12 \times 60 \times 2.53 \times 10^{-3} \times (40 \times 40 / 400) \times 1.25 \times 10^{-3}}{7.2^2} = 1.76 \times 10^{-4} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\text{IDR}_L = \frac{12 \times 60 \times 2.93 \times 10^{-3}}{1000 \times 7.2^2} = 4.07 \times 10^{-5} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$R_h = 2.2 \times 10^{-4} \times \frac{36 \times 1}{12 \times 60} = 1.1 \times 10^{-5} \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$$

18 MV LINAC ODASI

- Koridor Alanı

- Sızıntı ve saçılma

$$D_d = 2.64(D_{pH} + f \cdot D_{wH} + D_{LH} + D_{TH})$$

- Hastadan saçılma D_{pH}

$$D_p = \frac{WU_0 a (F/400) (\alpha_1 A_1) \cdots (\alpha_{n-1} A_{n-1})}{(d_{sca} \times d_1 \cdots d_n)^2}$$

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ yansıma katsayıları
 $A_1, A_2, \dots, A_n$ yansıyan alanlar
 $d_1, d_2, \dots, d_n$ yansıyan alanlardan koridordan uzaklıklar

$d_1 \dots d_n$ bir sonraki yansıma noktasına uzaklık

18 MV LINAC ODASI

- Koridor Alanı
- Hastadan saçılma D_{pH}

$$D_p = \frac{WU_0 a (F/400) (\alpha_1 A_1) \cdots (\alpha_{n-1} A_{n-1})}{(d_{sca} \times d_1 \cdots d_n)^2}$$

$$W = 600 \text{ Gy/hafta}$$

$$U = 0.25$$

$$F = 40 \times 40 \text{ cm}^2$$

$$d_{sca} = 1 \text{ m}, d_1 = 7.3 \text{ m}, \text{ isosentr ile A1 duvarı arası;}$$

$$d_M = 9.9 \text{ m}, \text{ A1 duvarı ile kapı arası;}$$

$$A1 \text{ } 2.8 \text{ m} \times 4.2 \text{ m} = 11.8 \text{ m}^2$$

$$a = 8.64 \times 10^{-4} \text{ saçılma fonksiyonu}(45^\circ \text{ saçılma açısı})$$

$$\alpha_1 = 2.03 \times 10^{-2}, \text{ yansım faktörü (0.5 MeV foton, } 45^\circ \text{ saçılma açısı)}$$

$$D_{pH} = \frac{600 \times 0.25 \times 8.64 \times 10^{-4} \times (40 \times 40 / 400) \times 2.03 \times 10^{-2} \times 11.8}{(1 \times 7.3 \times 9.9)^2} = 2.38 \times 10^{-5} \text{ Gy} \cdot \text{week}^{-1}$$

18 MV LINAC ODASI

- Koridor Alanı
- Duvardan saçılma D_{wH}

$$D_w = \frac{WU_H}{d_H^2} \times \frac{\alpha_H A_H \alpha_r A_r}{d_r^2 \times d_z^2}$$

$W = 600 \text{ Gy/hafta}$

$U = 0.25$

$d_H = 4.2 \text{ m}, d_r = 5.9 \text{ m}, d_z = 6.8 \text{ m}.$

$\alpha_H = 1.62 \times 10^{-3}$ (75° saçılma açısı 18 MV)

$\alpha_r = 7.54 \times 10^{-3}$ (75° saçılma açısı ,0.5 MeV)

$A_H = 2.82 \text{ m}^2, 40 \times 40 \text{ cm}^2$ H duvarına projeksiyon(= $168 \times 168 \text{ cm}^2$);

$A_r = 10.2 \text{ m}^2$ koridor girişi kesit alanı

$$D_{wH} = \frac{600 \times 0.25 \times 1.62 \times 10^{-3} \times 2.82 \times 7.54 \times 10^{-3} \times 10.2}{(4.2 \times 5.9 \times 6.8)^2} = 1.86 \times 10^{-6} \text{ Gy} \cdot \text{week}^{-1}$$

18 MV LINAC ODASI

- Kafadan sızıntı D_{LH}

$$\begin{aligned}L_0 &= 1 \times 10^{-3}; \\ W &= 600 \text{ Gy} \cdot \text{week}^{-1}; \\ U_H &= 0.25; \\ d_t &= 7.1 \text{ m.}\end{aligned}$$

$$D_L = \frac{L_0 W \alpha_1 A_1}{(d_i d_m)^2}$$

$$\begin{aligned}D_{LH} &= \frac{1 \times 10^{-3} \times 600 \times 0.25 \times 4.11 \times 10^{-3} \times 11.8}{(7.9 \times 9.9)^2} \\ &= 1.19 \times 10^{-6} \text{ Gy} \cdot \text{week}^{-1}\end{aligned}$$

18 MV LINAC ODASI

- Sızıntıdan dolayı oluşan radyasyonun iç duvardan koridora geçişi

$$D_T = \frac{L_0 WB}{(d_t)^2}$$

$$D_{TH} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 600 \times 0.25 \times 2.31 \times 10^{-4}}{(7.1)^2} = 6.87 \times 10^{-7} \text{ Gy} \cdot \text{week}^{-1}$$

18 MV LINAC ODASI

- Saçılma ve sızıntıdan kaynaklanan toplam doz D_d

- Bu doza ilave olarak nötron yutulması

$$\begin{aligned} D_d &= 2.64 \times (2.38 \times 10^{-5} + 0.34 \times 1.86 \times 10^{-6} + 1.19 \times 10^{-6} + 6.87 \times 10^{-7}) \\ &= 6.95 \times 10^{-5} \text{ Gy} \cdot \text{week}^{-1} \end{aligned}$$

gerekmektedir.

18 MV LINAC ODASI

- Nötron yutulmasından kaynaklanan γ -ışını dozu

$$\varphi_A = \frac{\beta Q_n}{4\pi d_1^2} + \frac{5.4 \beta Q_n}{2\pi S_r} + \frac{1.3 Q_n}{2\pi S_r}$$

$$Q_N = 1.22 \times 10^{12} \text{ neutrons per isocentre Gy.}$$

$$D_\varphi = 5.7 \times 10^{-16} \times \varphi_A \times 10^{-\frac{d_2}{6.2}}$$

$$D_c = 600 \times 1.9 \times 10^{-7} = 1.14 \times 10^{-4} \text{ Sv}\cdot\text{week}^{-1}$$

18 MV LINAC ODASI

- Foto-nötron kaynaklı doz hızı

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

$$D_n = 2.4 \times 10^{-15} \times \varphi_A \times \sqrt{A_r/S_1} \times \left[1.64 \times 10^{-\left(\frac{d_2}{1.9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{T_N}\right)} \right]$$

$$D_n = 2.4 \times 10^{-15} \times 7.85 \times 10^9 \times \sqrt{10.2/8.76} \times \left[1.64 \times 10^{-\left(\frac{8.5}{1.9}\right)} + 10^{-\left(\frac{8.5}{6.1}\right)} \right]$$

$= 0.83 \times 10^{-6}$ Sv per X ray·Gy at isocentre

18 MV LINAC ODASI

- Tasarım kriterine göre foto-nötronlardan kaynaklanan haftalık dozdan
- ~~Yusun dozunu ve saçılmalarından gelen dozlar~~

$$D_E = 600 \times 0.83 \times 10^{-6} = 5.0 \times 10^{-4} \text{ Sv}\cdot\text{week}^{-1}$$

$$n = \log_{10} \left(\frac{0.5}{0.1} \right) = 0.7$$

$$D_d + D_c = 6.95 \times 10^{-5} + 1.14 \times 10^{-4} = 0.18 \times 10^{-3} \text{ Sv}\cdot\text{week}^{-1}$$

$$n = \log_{10} \left(\frac{0.18}{0.1} \right) = 0.26$$

18 MV LINAC ODASI

- Foto-nötronların zırhlanması için 32 mm BPE ve fotonlar için ise 1.5 mm kurşun gerekmektedir.

TEŞEKKÜRLER