

Radyasyon Zırhlamaları

Ayhan Akkaş¹

Özet

Günümüzde teknolojinin ilerlemesi ile birlikte birçok yapay radyasyon kaynağı sağlık sektöründe (radyoloji, nükleer tıp vs.), nükleer enerji santrallerinde, uzay araştırmalarında ve endüstriyel uygulamalarda insan hayatına girmiştir. Uygulamalarda radyasyon maruziyetinin insanlar için istenilen seviyelere düşürmek için en etkin yollardan biri, radyasyon yayan cihaz ile bu cihazın kullanıldığı alanın uygun bir malzeme ile zırhlanmasıdır. Radyasyon zırhlaması birçok farklı parametrenin hesaba katılması ile mümkün olmaktadır. Radyasyon zırh malzemesi seçimi, radyasyonun enerjisi ve tipine göre farklılıklar göstermektedir. Bununla beraber kullanılan malzemenin yoğunluğu, ısı iletkenliği, radyasyon hasarlarına karşı gösterdiği direnç gibi yapısal özellikleri ile ekonomik maliyeti ön plana çıkan diğer parametrelerdir.

1. GİRİŞ

Radyasyon zırhlaması, iyonlaştırıcı radyasyonun insan sağlığı ve çevre üzerindeki zararlı etkilerini en aza indirmek için kullanılan bir koruma yöntemidir. İyonlaştırıcı radyasyon, canlı organizmalar üzerinde ciddi hasarlara yol açabilen bir tür enerjidir. Bu tür radyasyon kaynakları, tıp, nükleer enerji üretimi, sanayi ve araştırma gibi birçok alanda kullanılır. Ancak, bu radyasyonla doğrudan temas, canlılar için tehlikeli olabilir. Bu nedenle radyasyonun etkilerini sınırlandırmak amacıyla zırhlama yapılır.

Zırhlama, radyasyonun enerjisinin tutulmasını sağlayarak geçişini engelleyen bir bariyer oluşturur. Bu bariyerler, radyasyonun türüne ve enerjisine göre farklı malzemelerden yapılabilir. Örneğin, gama ve X-ışınlarına karşı en yaygın kullanılan malzemelerden biri kurşundur, çünkü kurşun yüksek yoğunluğa sahip olup, gama radyasyonunu etkin bir şekilde tutabilir. Beta radyasyonunun da oluşacak ikincil radyasyon olan “bremsstrahlung” ışıması

1 Dr., Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, ayhan.akkas@tenmak.gov.tr
Orcid: 0009-0001-6196-7923

da göz önünde tutularak genellikle daha hafif materyaller, örneğin plastik veya cam kullanılır. Nötron radyasyonu gibi daha farklı radyasyon türlerine karşı beton, su veya polietilen gibi malzemeler tercih edilir (Bor, 2016).

1.1. Genel Radyasyon Zırh Malzemesi Özellikleri

Temel olarak her malzemenin radyasyon zırhlama etkinliği mevcuttur. Ancak radyasyonun soğurmasının yanında farklı özelliklere de sahip olması istenir. Malzemenin sahip olduğu bu özelliklere göre, dünya genelinde radyasyon zırh malzemesi olarak yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Bir malzemenin radyasyon zırh malzemesi olarak seçilebilmesi için, birçok farklı parametre vardır. Bunlardan öne çıkanları;

- Malzemenin radyasyonu zayıflatması
- Malzemenin ısı iletkenlik katsayısı
- Malzemenin radyasyon hasarına karşı gösterdiği direnç
- Malzemenin yoğunluk ve kalınlık değeri
- Malzemenin radyasyon karşısında kullanım süresi
- Radyasyonun zırhlanmasında homojen etki göstermesi
- Malzemenin kolay elde edilebiliyor olması
- Malzemenin ekonomik maliyeti

sayılabilir. (Low & Noor Azman, 2020)

1.2. Radyasyon Zırh Malzemesinin Zayıflatma Özelliklerinin Belirlenmesi

Zırhlama amacıyla kullanılacak radyasyon zırh malzemesi için zayıflatma özellikleri belirlenirken, enerjisi 1,3 MeV'e kadar olan gama radyasyon yayıcılarını kapsamaktadır (TSE, 2014). Bir malzemenin zayıflatma miktarı,

- Radyasyonu zayıflatma oranı,
- Büyüme Faktörü (Build-up factor)
- Radyasyon zayıflatma eşdeğeri

cinsinden verilir. Malzemenin radyasyon zayıflatma oranını bulmak için dört farklı geometri mevcuttur. Bunlar;

- Zayıflatma oranının dar demet geometri kullanılarak belirlenmesi (F_N)
- Zayıflatma oranının geniş demet geometrisi ile belirlenmesi (F_B)
- Zayıflatma oranının ters geniş demet ile belirlenmesi (F_{IB})

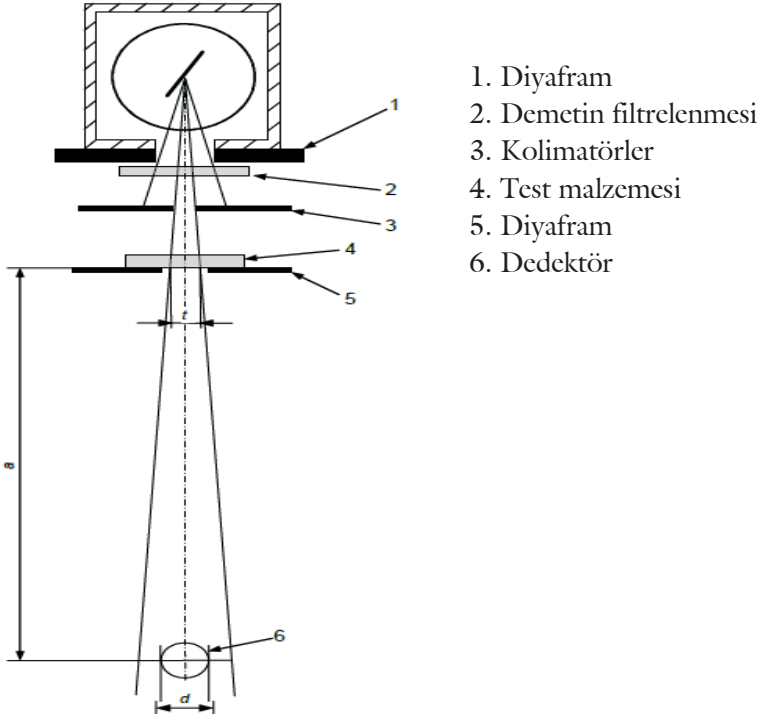
- Zayıflatma oranının foton yayan bir kaynak için belirlenmesi ($F_{N,R}$)

Bu geometrilerden en sık kullanılanları dar demet geometridir (Low & Noor Azman, 2020)

1.2.1. Dar Demet Geometrisi ile Zayıflatma Oranının Belirlenmesi

Dar demet geometrisi, sadece birincil radyasyonda meydana gelen zayıflatmayı incelemek için Şekil 1'de verildiği üzere tasarlanmıştır. Birincil radyasyonun malzemelerle etkileşmesi nedeniyle ortaya çıkan ikincil radyasyonun detektöre ulaşması minimize edilmiştir. X ışını tüpünden çıkan radyasyon diyafram yardımıyla iyice daraltılır.

Şekil 1'de verilen 5 numaralı diyaframın amacı, fotonların madde ile etkileşmesi ile ortaya çıkan ikincil radyasyonun detektöre ulaşmasını engellemektir. Bu geometride kullanılan test malzemesinin detektöre olan uzaklığı, detektörün çapının veya demet genişliğinin en az 10 katı olmalıdır. Burada detektör çapı veya demet genişliğinden hangisinin değeri daha büyükse ona göre mesafe belirlenir. Detektörden duvara veya zemine olan en küçük mesafe demet yönünde 700 mm olmalıdır (TSE, 2014).



Şekil 1. Dar demet geometrisinin şematik gösterimi (TSE, 2014).

Fotonların çeşitli soğurucu malzemeler tarafından ideal dar demet koşulları altında zayıflatılması aşağıdaki eşitlik ile verilir;

$$I_{(x)} = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

I_0 : malzeme üzerine düşen foton şiddeti (genellikle akı olarak ifade edilir)

$I_{(x)}$: soğurucu malzemeden geçtikten sonraki foton şiddeti

x : malzemenin kalınlığı (cm)

μ : fotonların saçılma reaksiyonlarını da kapsayan toplam zayıflatma katsayısıdır (cm^{-1}).

Zayıflatma katsayısı μ , hem soğurucu ortamın türüne hem de foton enerjisine bağlıdır. Bu nedenle, farklı malzemelerin zayıflatma katsayılarını içeren kapsamlı listelere ihtiyaç duyulur.

Genel olarak, soğurucunun atom numarası arttıkça μ değerleri de artar. Bunun nedeni, yüksek atom numarası değerine sahip malzemelerde fotonların madde ile etkileşim olasılığı artmaktadır. Bu özelliğe sahip olan elementlerden biri olan kurşun, röntgen odalarının duvarlarını kaplamada ve personel koruması amacıyla önlüklerin yapımında en sık kullanılan malzemelerden biridir.

Malzemenin yoğunluğu, toplam zayıflatma katsayısını değiştirmektedir. Malzemenin yoğunluktan bağımsız olarak kütle zayıflatma katsayısı tanımlanmaktadır. Kütle zayıflatma katsayısı (μ_m);

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada;

μ : toplam zayıflatma katsayısı

ρ : soğurucu malzemenin yoğunluğu

olarak verilir. Soğurucu malzeme bir bileşik ise kütle zayıflatma katsayısı,

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (3)$$

ile hesaplanmaktadır (Knoll, 2002). Burada w_i , bileşiğin içindeki i . elementinin ağırlık faktörünü temsil etmektedir.

Dar demet halinde malzeme ile etkileşen ışınlar üstel fonksiyon bağıntısına uymakta fakat saçılan ışınla burada söz konusu olmamaktadır. Pratikte zırhlama hesaplarında kompton saçılmasını da göz önüne alan “büyüme faktörü” denilen bir faktör kullanılır. Bu faktör gelen ışının enerjisi,

soğurucu malzemenin etkin kesit alanı, kaynak ve zırhın geometrisinin bir fonksiyonudur. Büyüme faktörü için en genel tanım, gerçek radyasyon dozun hesaplanan radyasyon doza oranı olarak tanımlanabilir. Büyüme faktörü dahil edildiğinde, radyasyon şiddeti şu şekilde ifade edilir:

$$I_{(x)} = B.I_0.e^{-\mu \cdot x} \quad (4)$$

I_0 : malzeme üzerine düşen foton şiddeti

$I_{(x)}$: malzeme üzerinden geçtikten sonraki foton şiddeti

μ (cm^{-1}): toplam zayıflatma katsayısı

x : malzemenin kalınlığı

B : Büyüme faktörü (build-up factor)

olarak verilir (Martin, 2013).

1.3. Yarı Değer ve Onda Bir Değer Kalınlığı

Fotonların üstel zayıflamasını yarı kalınlık veya yarı değer tabakası (HVL) terimleriyle ifade edilir. HVL, bir foton demetinin şiddetinin başlangıç değerinin yarısına düşürmek için gereken soğurucu malzemenin kalınlığıdır. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir;

$$X_{1/2} = \text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (6)$$

Aynı şekilde onda bir değer kalınlığı hesaplandığında;

$$\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (7)$$

olarak verilir (Low & Noor Azman, 2020)

Tablo 1. Farklı malzemeler için foton enerjisine bağlı HVL (cm) değerleri (Martin, 2013).

Enerji (MeV)	Kurşun (11.35 g/cm ³)	Demir (7.874 g/cm ³)	Alüminyum (2.699 g/cm ³)	Su (1.00 g/cm ³)	Hava (0.001205 g/cm ³)	Beton (2.30 g/cm ³)
0.1	0.011	0.237	1.507	4.060	3.726 x 10 ³	1.734
0.3	0.151	0.801	2.464	5.843	5.372 x 10 ³	2.747
0.5	0.378	1.046	3.041	7.152	6.600 x 10 ³	3.380
0.662	0.558	1.191	3.424	8.039	7.420 x 10 ³	3.806
1.0	0.860	1.468	4.177	9.802	9.047 x 10 ³	4.639
1.173	0.987	1.601	4.541	10.662	9.830 x10 ³	5.044
1.132	1.088	1.702	4.829	11.342	1.047 x10 ⁴	5.368
1.5	1.169	1.802	5.130	12.052	1.111 x10 ⁴	5.698
2.0	1.326	2.064	5.938	14.028	1.293 x10 ⁴	6.612
2.5	1.381	2.271	6.644	15.822	1.459 x10 ⁴	7.380
3.0	1.442	2.431	7.249	17.456	1.604 x10 ⁴	8.141
3.5	1.447	2.567	7.813	19.038	1.747 x10 ⁴	8.828
4.0	1.455	2.657	8.270	20.382	1.868 x10 ⁴	9.366
5.0	1.429	2.798	9.059	22.871	2.094 x10 ⁴	10.361
7.0	1.348	2.924	10.146	26.860	2.449 x10 ⁴	11.846
10.0	1.228	2.940	11.070	31.216	2.817 x10 ⁴	13.227

1.4. Ortalama Serbest Yol

Tek enerjili bir fotonun veya nötronun madde ile etkileşmeden o madde içinde alabileceği ortalama yoldur. Gama ve X ışınları için bu ortalama yol (τ), zayıflatma katsayısı ile ters orantılıdır ve eşitlik 8 ile verilir.

$$\delta = \frac{1}{\mu} \quad (8)$$

μ (cm⁻¹) : toplam zayıflatma katsayısı

olarak verilir (Mann & Singh, 2020).

1.5. Tıbbi X-Ray Görüntüleme Odaları İçin Zırhlama Parametreleri

X ray cihazları temel olarak medikal tanı ve tedavi ile medikal olmayan alanlarda kullanılır. Tıbbi X ray görüntüleme odalarının planlama ve zırhlamaları radyasyonla çalışan personeli ve toplum üyesi kişileri radyasyona

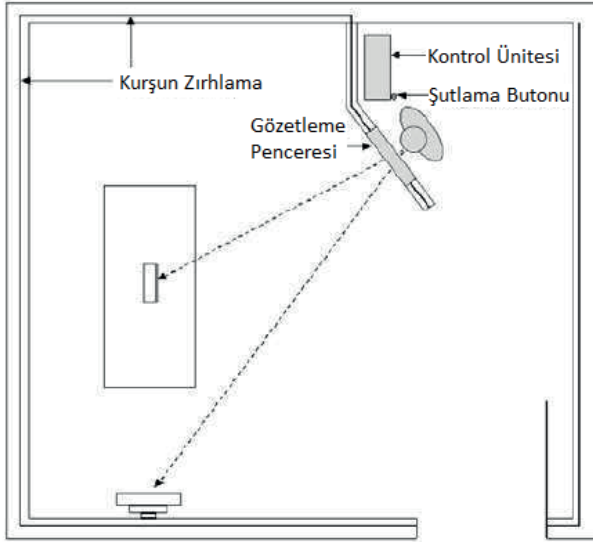
karşı koruma yönünden önemlidir. Yayınlanan iyonlaştırıcı ışınların cins ve enerjilerine bağlı olarak odaların duvar kalınlıkları değişir. Zırhlamada genel olarak üç temel unsur vardır.

- Radyasyonun üretildiği X ışını tüpünün zırhlanması
- Cihazın zırhlanması
- Yapıya ilişkin zırhlama

X ray üreten tüpler sadece belli bir yönelimde ışın üretebilmek için ağır metal malzemelerle zırhlanmaktadır. Genelde üretilen x ışınları metal filtrelerden (Al, Cu vb.) geçerek, oluşan spektrumda giriciliği az olan (düşük enerjili) kısmın engellenmesi sağlanır. Filtrelerden geçen ışının kolimatörler yardımıyla genişliği azaltılır. X ray tüpünün koruyucu kılıfı tüpten yayılacak sızıntı radyasyonun azaltılmasını sağlar (Shapiro, 2002).

Cihaza ilişkin zırhlama, cihazı kapsamakta ve çalışan personelin direkt ışınlar maruz kalmasını engellemektedir.

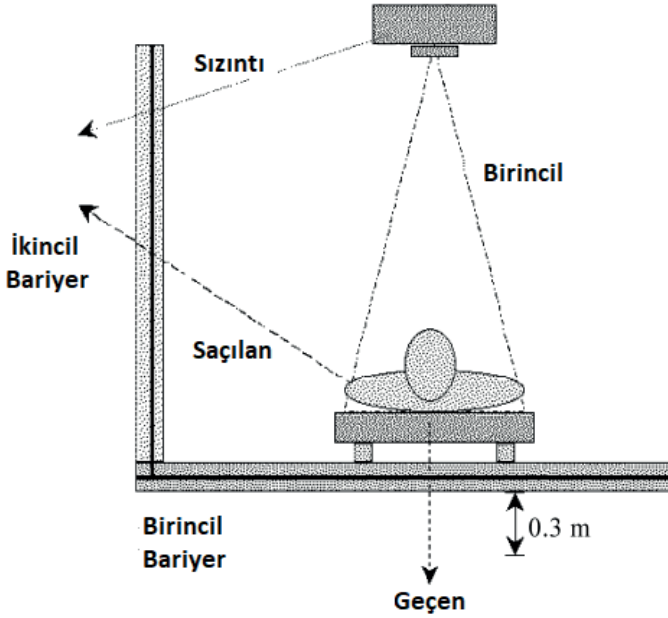
Yapıya ilişkin zırhlamada engel kalınlıklarının belirlenebilmesi için odanın boyutlarının ve cihazın yerleştirileceği yerin bilinmesi gereklidir. Şekil 2'de genel olarak bir X ray odasının şematik resmi verilmiştir (NCRP 147, 2005).



Şekil 2. X ray odalarının genel şematik görünümü (NCRP 147, 2005)

X ray odasının duvarları birincil ve ikincil duvarlar olarak adlandırılır. Şekil 3'te verildiği üzere birincil duvar, X ray tüpünün yönlendirildiği ve faydalı

ışının çarptığı duvarlardır. İkincil duvarlar, tüpten gelen sızıntı radyasyonu ile faydalı ışının oda içinde etkileştiği malzemelerden gelen saçılan radyasyonun yönlendiği duvarlardır. X ray odaları tasarlanırken, oda dışında radyasyon değerinin azaltılması için genelde kurşun plakalarla güçlendirilmiş beton duvarlar kullanılır. X ray odasının uygun bir şekilde zırhlanması için birçok farklı parametrenin (tasarım hedef dozu, iş yükü, meşgulliyet faktörü vs.) belirlenmesi gerekir (NCRP 147, 2005)



Şekil 3: Bir radyografi odasında birincil ve ikincil duvarlar ile saçılan, sızıntı ve iletilen radyasyon (NCRP 147, 2005)

1.4.1. Tasarım Hedefleri ve Etkin Doz

Radyasyonun güvenli sınırlarda tutulması hem hastalar hem de sağlık çalışanları için büyük bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, zırhlama tasarımı ve tasarım dozu kavramları, radyasyon güvenliği açısından önemli yer tutmaktadır. Zırhlama tasarım hedefleri (P), çalışanların ve halkın korunması için inşa edilen bariyerlerin tasarım hesaplamalarında ve değerlendirilmesinde kullanılan hava kerma seviyeleridir. Kontrollü ve gözetimli alanlar için tasarım dozları değişmektedir (NCRP 147, 2005).

Kontrollü alanlarda bulunan radyasyon çalışanların, görevleri sırasında radyasyona maruz kalma olasılıkları göreceli olarak daha yüksektir. Bu alanlarda çalışan personel radyasyondan korunma eğitimi alırlar ve bu

alanlara giriş ve çıkışları belli kurallara tabidir. Radyasyondan korunma yönetmeliğine göre görevi gereği radyasyonla çalışan bir personelin yıllık etkin doz sınırı 50 mSv iken beş yılın ortalama değeri 20 mSv değerini geçmemesi gerekmektedir. Bu çerçevede tasarım dozu hedefi (P), radyoloji cihazının faaliyette bulunduğu oda, cihazın kontrol edildiği kumanda odası gibi radyasyon alanlarında yıllık 5 mSv etkin doz üzerinden haftalık 100 μ Sv olarak hesaplanır, bu değer; rapor odası, muayene odası, tuvalet, çocuk oyun alanları gibi gözetimli alanlar için yıllık 1 mSv etkin doz üzerinden haftalık 20 μ Sv'dir (NDK, RSGD-KLV-006 kılavuz).

1.4.2. X Işını Tüpü ile Meşgul Edilen Alan Uzaklığı

X ışını tüpü ile zırhlanması planlanan alana olan mesafe olarak tanımlanır. Bu mesafeye duvarın arkasında 30 cm'lik mesafe eklenir. Tavan hesaplamalarında hasta masasından tavana kadar olan uzaklık alınır. Taban mesafesi için; radyoloji odasının alt katındaki tavan ile taban arasındaki mesafeden ortalama bir insan boyu (170 cm) çıkartılarak kalan mesafe hesaplanır (NDK, RSGD-KLV-006 kılavuz).

1.4.3. Meşguliyet Faktörü (T)

Meşguliyet faktörü (T), bir alanın ne kadar süreyle meşgul edildiği ve bu alanın ne kadar sürede radyasyona maruz kalındığını belirten bir ölçüdür. X-ışını ünitesinin hafta boyunca rastgele kullanıldığı varsayıldığında, bir kişinin yıl boyunca belirli bir alanı işgal edeceği haftalık çalışma saatlerinin kesridir. Örneğin meşguliyet faktörü 1/40 olarak belirlenen bir alan için x ray cihazı açık konumda iken yıl boyunca haftalık 1 saat bu konumda bulunulduğunu gösterir. Bu alanlara örnek olarak genellikle yalnızca yaya veya araç trafiği için kullanılan alanlar (örneğin, kaldırımlar, yollar, bank veya oturma yeri olmayan çim alanları vb.) verilebilir (NDK, RSGD-KLV-007 kılavuz)

Tablo 2: Meşguliyet faktörleri için kullanılan alanlara göre öneriler (NDK, RSGD-KLV-006 kılavuz)

ALANLAR	T
Kumanda odası, rapor odası, hasta kayıt alanı, laboratuvar, poliklinik, muayene/tehdavi odası, teşhis/tehdavi cihazı bulunan oda, ameliyathane, çocuk oyun alanı, mesken, işyeri, boş oda	1 (Tam meşguliyet)
Mutfak, çamaşırhane, hasta gözlem odası	1/2 (Yarım meşguliyet)
Oturma alanı bulunan salon/koridor, konferans salonu, personel dinlenme odası	1/5 (Kısmi meşguliyet)
Kontrollü alandaki koridorlara açılan kapılar	1/8 (Kısmi meşguliyet)
Tuvalet, depo, asansör, bahçe, teknik oda, bina içi merdiven, hasta soyunma kabini, arşiv, otopark	1/20 (Aralıklı meşguliyet)
Trafiğe açık yol, yangın merdiveni, çatı/teras	1/40 (Nadir meşguliyet)

1.4.4. Kullanım Faktörü (U)

Genel olarak, birincil radyasyon demeti tüm çalışma süresi boyunca herhangi bir bariyere doğrudan yönlendirilmez. Kullanım faktörü, birincil radyasyon demetinin belirli birincil bariyere yönlendirilen kesridir. U değeri, radyasyon tesisinin türüne ve ilgili bariyere bağlı olarak değişir. Tablo 3'te örnek olarak bazı kullanım faktörü değerleri verilmiştir. Birincil radyasyona maruz kalmayan ama saçılan ve sızıntı radyasyona maruz kalan engeller için $U=1$ değeri alınmaktadır (NDK, RSGD-KLV-007 kılavuz)

Tablo 3. Birincil radyasyona maruz kalan bazı engeller için kullanım faktörü (NDK, RSGD-KLV-007 kılavuz)

Cihaz	Duvarlar	Taban	Tavan
Grafi	-	1	-
Akciğer grafi	1	-	-
Grafi + Akciğer grafi	1/2	1/2	-
Kemik Yoğunluk Ölçüm	-	1	-
Periapikal Diş Röntgen	1	-	-

1.4.5. İş Yüğü (W)

Tıbbi görüntüleme X-ray tüpünün iş yüğü (W), belirli bir süre boyunca x-ray tüp akımının zamana göre integralinin alınması ile bulunur ve genellikle miliampere-dakika ($\text{mA} \cdot \text{dakika}$) birimi ile ifade edilir. İş yüğü hesabı aşağıda verilen eşitlik ile yapılabilir.

$$W = I_{\max} \cdot t \cdot h \cdot s \quad (9)$$

W : iş yükü (mA.dak/hafta)

I_{\max} : tüp akımının en büyük değeri (mA)

t : çekim başına ışınlama süresi (dak)

h : hasta başına çekim sayısı

s : bir hafta süresince toplam hasta sayısı

ifade etmektedir.

Örneğin 250 KVp gerilim ve 20 mA tüp akımında günde 6 saat çalışılacaksa 1 haftada hesaplanan iş yükü $W = 20 \times (6 \times 60) \times 5 = 36000$ mA/dak.hafta olarak bulunur.

İş yükü değeri hastadan hastaya değişkenlik gösterebilir. Bazı hastalar için birden fazla görüntü çekilebilmektedir. Bu nedenle ortalama iş yükü değeri hesaplanır. Bu değer;

$$W_{\text{ort}} = \frac{W_{\text{TOPLAM}}}{N} \quad (10)$$

Burada, W_{ort} , ortalama iş yükü, W_{toplama} , belirlenen periyot üzerinden toplam iş yükü, N ise belirlenen periyotta toplam hasta sayısı olarak verilir (NCRP, 1976).

1.4.6. Birincil Engel Hesaplanması

Birincil engel, kullanılan x ışını tüpünün yönlendirildiği engeldir. Bu engelle birincil radyasyon ulaşacağından hesaplanması diğer engellerden farklılık gösterir. Bu hesaplama radyasyonun zayıflatma faktörü (geçiş faktörü) k aşağıdaki eşitlik ile verilir (NDK, RSGD-KLV-006 kılavuz).

$$k = \frac{P \cdot d^2}{W \cdot U \cdot T} \quad (11)$$

P : tasarım dozu ($\mu\text{Sv/hafta}$)

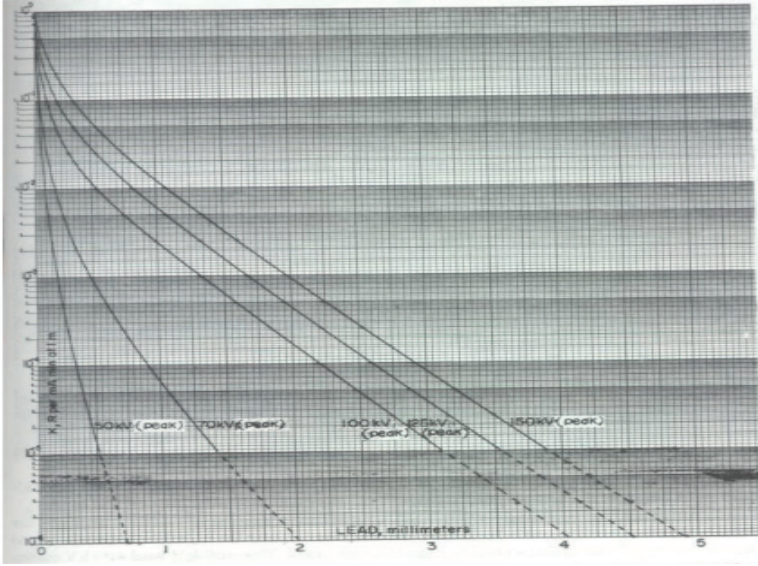
W : iş yükü (mA.dk/hafta)

U : kullanım faktörü

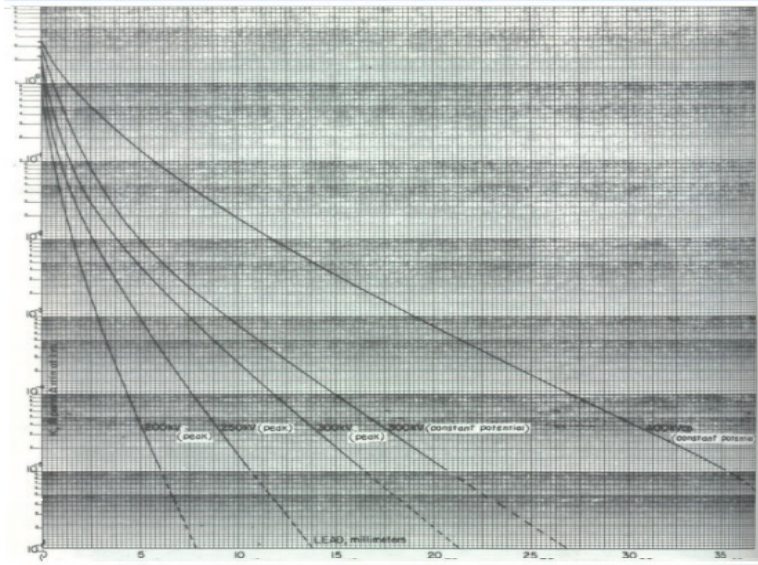
T : meşguliyet faktörü

d: kaynak ile engel arasındaki mesafe (m)

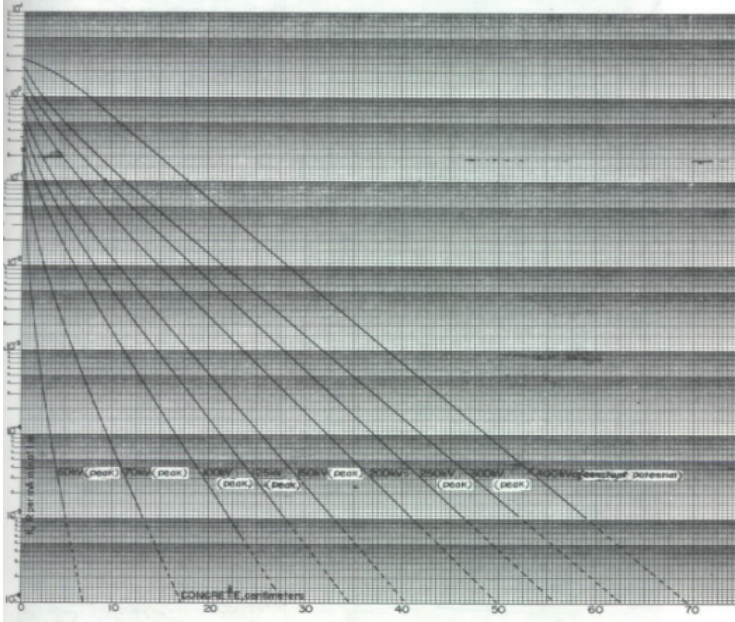
eşitlik 11 ile elde edilen k değeri; şekil 4, şekil 5 ve şekil 6' da kurşun ve beton malzeme için verilen eğrilerde yerine konularak gerekli malzeme kalınlığı elde edilir.



Şekil 4. 50-150 kV aralığında kurşun kalınlık eğrisi (NCRP 49, 1976).



Şekil 5. 200-400kV aralığında kurşun kalınlık eğrisi (NCRP 49, 1976).



Şekil 6. 50-300 KV arasında beton için zırh kalınlık eğrisi (NCRP 49, 1976).

1.4.7 İkincil Engel Hesaplanması

İkincil engeller, x ışını tüpünden yayılan sızıntı radyasyon ile x ışını demetinin madde ile etkileşmelerinden ortaya çıkan saçılan radyasyon değerleri göz önüne alınarak hesaplanır. İkincil engelde saçılan radyasyondan kaynaklı zayıflatma faktörü,

$$k = \frac{P}{\alpha \cdot W \cdot T} \cdot d_{SCA}^2 \cdot d_{SEC}^2 \cdot \frac{400}{F} \quad (12)$$

k: zayıflatma faktörü

P: tasarım dozu ($\mu\text{Sv/hafta}$)

α :1 metrede saçılan radyasyonun şiddetinin gelen radyasyon şiddetine oranıdır

W: iş yükü (mA.dk/hafta)

T: meşguliyet faktörü

d_{SCA} : X ışını tüpü ile saçılmaya neden olan malzeme arasındaki mesafe

d_{SEC} : Saçılmaya neden olan malzeme ile engel arasındaki mesafe

F: Saçılmaya neden olan malzemenin x ışını ile etkileşen yüzey alanı

Tablo 4 'de I (mA) tüp akımı, α , F ve d_{SCA} değerleri farklı uygulamalar için verilmiştir. Saçılan radyasyon hesabında kullanma faktörü $U = 1$ alındığından hesaba dahil edilmez. İkincil engel kalınlıkları, saçılan için hesaplanan K değeri Şekil 3, Şekil 4 veya Şekil 5'te verilen grafikte yerine konularak kurşun ve beton cinsinden bulunur (NDK, RSGD-KLV-006 kılavuz).

Tablo 4. I, α , F ve d_{SCA} değerleri (NDK, RSGD-KLV-006 kılavuz)

Uygulama Türü	I(mA)	α^*	d_{SCA} (m)	F(cm ²)
100 kV skopi	5	0,0013	0,45	400
125 kV skopi	4	0,0015	0,45	400
150 kV skopi	3,3	0,0016	0,45	400
100 kV grafi	5	0,0013	0,8	1000
125 kV grafi	4	0,0015	0,8	1000
150 kV grafi	3,3	0,0016	0,8	1000

* 90 derecedeki değerler alınmıştır.

İkincil engeller için sızıntı radyasyonunu için geçiş faktörü aşağıda verilen eşitlik ile bulunur.

$$B = \frac{P \cdot d_{SEC}^2 \cdot 600 \cdot I}{W \cdot T} \quad (13)$$

B: zayıflatma faktörü

P: tasarım dozu (μ Sv/hafta)

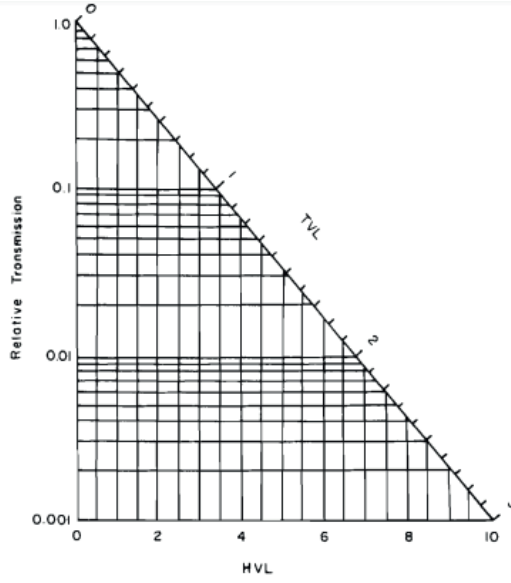
d_{SEC} : saçılmaya neden olan malzeme ile engel arasındaki mesafe (m)

I: tüp akımı (mA)

W: iş yükü (mA.dk/hafta)

T: meşguliyet faktörü

Bulunan B değerleri şekil 7'de doğrusal grafikte yerine konularak gerekli HVL ve TVL değerleri bulunur (NCRP 49, 1976).



Şekil 7. B değerine karşılık gelen HVL ve TVL değerleri (NCRP 49, 1976).

Kaynaklar

- Bor, D. (2016). Radyasyon: Sağlık riskleri ve tanısal incelemelerde korunma. Dünya Kitabevi. Ankara
- Knoll, G.F. (2002). Radiation Detection and Measurement, University of Michigan, John Wiley&Sons,Inc.
- Low, I.M. and Noor Azman, N.Z. (2020). Polymer Composites and Nanocomposites for X-Rays Shielding (Composites Science and Technology), Editor : Jawaid, M., Springer, Singapore
- Mann, K.S. and Singh, V.P. (2020). Computational Methods in Nuclear Radiation Shielding and Dosimetry (Physics Research and Technology), Nova Science, New York.
- Martin, J.E. (2013). Physics for Radiation Protection, Third Completely Updated Edition.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (2005). Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities, NCRP Report No.147.
- National Council on Radiation Protection and Measurements, (1976). Structural Shielding Design and Evaluation For Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV, NCRP Report No.49.
- Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK), RSGD-KLV-006 nolu kılavuz.
- Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK), RSGD-KLV-007 nolu kılavuz.
- Shapiro, J. (2002). Radiation Protection, Fourth Edition, Harward University Press.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2014). TS EN 61331-1, Tıpta Teşhis Amacıyla Kullanılan X-Işınına Karşı Koruyucu Cihazlar.