

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ NÜKLEER ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**GAMA RADYASYONUNUN TOPRAK İLE
ZIRHLANMASININ İNCELENMESİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM VE
BİLİM VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI
DOKÜMENTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Özlem TOPRAK
304981007**

104067

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Haziran 2001**

Tez Danışmanı :

Doç.Dr. Filiz BAYTAŞ

F. Baytaş 24/7/2001

Diğer Jüri Üyeleri:

Prof.Dr. Beril TUĞRUL

Beril Tuğrul 24.07.2001

Prof.Dr. Melih GEÇKİNLİ

Melih Geçkinli
24.07.2001

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında farklı elementlerden oluşan toprak bir gama radyasyonu zırlama malzemesi olarak incelenmiştir. Kimyasal yapısı bilinen toprak numunelerin radyasyon zayıflatma parametreleri ve onları etkileyen faktörler teorik ve deneysel olarak saptanmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışması, İTÜ Araştırma Fonu tarafından Lisansüstü Tez Araştırma Projesi olarak desteklenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim gerek ders gerek tez aşaması sırasında benden her türlü desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Doç. Dr. Filiz BAYTAŞ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Haziran, 2001

Özlem TOPRAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. GAMA RADYASYONUNUN ZIRHLANMASI	5
2.1. Zırhlamanın Amacı	5
2.2. Radyasyon Kaynakları	6
2.2.1. Gama fotonu kaynakları	7
2.3. Gama Fotonlarının Malzeme İçerisinde Zayıflatılması	9
2.3.1. Etkileşme mekanizmaları	9
2.3.2. Tesir kesitleri	11
2.3.3. Foton demeti geometrileri	16
2.4. Bazı Zırhlama Parametreleri	18
3. EFEKTİF ATOM NUMARASININ İNCELENMESİ	21
3.1. Efektif Atom Numarası ile İlgili Çalışmalar	21
3.2. Efektif Atom Numarasının Saptanması	24
4. DENEY KOŞULLARININ TANITIMI	27
4.1. Deney Düzenegine Ait Bilgiler	27
4.1.1. Gama radyasyon kaynakları	27
4.1.2. Radyasyon ölçüm sistemi	29
4.2. Kolimatörler	29
4.3. Toprak Numuneler	32
5. TOPRAĞIN GAMA RADYASYONU ZIRHLAMA MALZEMESİ OLARAK İNCELENMESİ	33
5.1. Toprak Numunelerin Foton Zayıflatma Katsayılarının ve Efektif Atom Numaralarının Hesaplanması	33
5.2. Deneysel Çalışmalar	43
5.2.1. Zırh kalınlığının bulunması	43
5.2.2. Toprakların foton zayıflatma parametreleri	46
5.2.3. Tane boyutu etkisinin incelenmesi	49

5.2.4. Katmanlı zırh çalışmaları	54
5.2.5. Demir katkılı toprak ile yapılan çalışmalar	60
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	63
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	68



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Gama kaynaklarının özellikleri.....	29
Tablo 4.2. Topraklardaki elementlerin ağırlıksal yüzdeleri.....	32
Tablo 4.3. Toprakların yoğunlukları.....	32
Tablo 5.1. Toprakların toplam kütleli zayıflatma katsayıları.....	35
Tablo 5.2. Toprakları oluşturan elementlerin bazı özellikleri.....	37
Tablo 5.3. Topraklarda bulunan elementlere ait toplam foton tesir kesitleri..	38
Tablo 5.4. Topraklara ait toplam foton tesir kesitleri.....	39
Tablo 5.5. Topraklara ait efektif atom numaraları.....	41
Tablo 5.6. Deneylerde kullanılan enerjilerdeki ışınlama hızları.....	46

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. ^{137}Cs ve ^{60}Co gama kaynaklarının bozunum şemaları.....	8
Şekil 2.2. Fotonun malzeme içerisinde zayıflatılması.....	14
Şekil 2.3. Çeşitli malzemeler için kütleli zayıflatma katsayısının foton enerjisine bağıli değişimi.....	15
Şekil 2.4. Kurşun için kütleli zayıflatma katsayısının değişimi.....	16
Şekil 2.5. Dar demet geometrisi.....	16
Şekil 2.6. Geniş demet geometrisi.....	17
Şekil 3.1. Çok katmanlı zırh.....	26
Şekil 4.1. Ölçüm sisteminin blok şeması.....	28
Şekil 4.2. Deney düzeneği ve ölçüm sistemi.....	30
Şekil 4.3. Kolimatörlerin karakteristikleri.....	31
Şekil 5.1. Toprakların toplam kütleli zayıflatma katsayıları.....	34
Şekil 5.2. Çalışılan enerjiler için toprakların kütleli zayıflatma katsayıları.....	36
Şekil 5.3. Topraklardaki elementlere ait σ -Z eğrileri.....	40
Şekil 5.4. Toprakların efektif atom numaralarının Si yüzdesine göre değişimi.....	41
Şekil 5.5. Toprakların efektif atom numaralarının Fe yüzdesine göre değişimi.....	42
Şekil 5.6. Toprakların efektif atom numaralarının Ca yüzdesine göre değişimi.....	42
Şekil 5.7. 662 keV enerjili fotonlar için toprak kalınlığı.....	44
Şekil 5.8. 1173 keV enerjili fotonlar için toprak kalınlığı.....	44
Şekil 5.9. 1332 keV enerjili fotonlar için toprak kalınlığı.....	45
Şekil 5.10. Toprakların lineer zayıflatma katsayıları.....	47
Şekil 5.11. Toprakların yarıkalınlık değerleri.....	47
Şekil 5.12. Toprakların ortalama serbest yol değerleri.....	48
Şekil 5.13. Toprakların kütleli zayıflatma katsayıları.....	48
Şekil 5.14. Kütahya toprağı için lineer zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağıli değişimi.....	49
Şekil 5.15. Kütahya toprağı için (a) yarıkalınlığın (b) kütleli zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağıli değişimi.....	50
Şekil 5.16. Çanakkale toprağı için (a) lineer zayıflatma katsayısının (b) yarıkalınlığın tane boyutuna bağıli değişimi.....	51
Şekil 5.17. Çanakkale toprağı için kütleli zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağıli değişimi.....	52
Şekil 5.18. Batman toprağı için lineer zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağıli değişimi.....	52
Şekil 5.19. Batman toprağı için (a) yarıkalınlığın (b) kütleli zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağıli değişimi.....	53

Şekil 5.20.	662 keV enerjide toplam toprak kalınlığına göre I/I_0 değerleri...	55
Şekil 5.21.	662 keV enerjide toplam toprak + Al kalınlığına göre I/I_0 değerleri.....	56
Şekil 5.22.	662 keV enerjide toplam toprak + Fe kalınlığına göre I/I_0 değerleri.....	56
Şekil 5.23.	1173 keV enerjide toplam toprak kalınlığına göre I/I_0 değerleri.	57
Şekil 5.25.	1173 keV enerjide toplam toprak + Al kalınlığına göre I/I_0 değerleri.....	57
Şekil 5.25.	1173 keV enerjide toplam toprak + Fe kalınlığına göre I/I_0 değerleri.....	58
Şekil 5.26.	1332 keV enerjide toplam toprak kalınlığına göre I/I_0 değerleri.	58
Şekil 5.27.	1332 keV enerjide toplam toprak + Al kalınlığına göre I/I_0 değerleri.....	59
Şekil 5.28.	1332 keV enerjide toplam toprak + Fe kalınlığına göre I/I_0 değerleri.....	59
Şekil 5.29	Demir katkılı toprağın gama radyasyonunu zayıflatma etkisi.....	60
Şekil 5.30.	Demir toprak karışımı için lineer zayıflatma katsayısının değişimi.....	61
Şekil 5.31.	Demir toprak karışımı için yarıkalınlığın değişimi.....	62

SEMBOL LİSTESİ

μ	:Lineer zayıflatma katsayısı
$\mu_{\text{foto elektrik}}$	:Foto elektrik etki lineer zayıflatma katsayısı
μ_{compton}	:Compton saçılması lineer zayıflatma katsayısı
$\mu_{\text{çift oluşumu}}$	:Çift oluşumu lineer zayıflatma katsayısı
ϕ	:Radyasyon akısı
μ / ρ	:Kütlesel zayıflatma katsayısı
σ	:Mikroskopik tesir kesiti
$\sigma_{\text{foto elektrik}}$	:Fotoelektrik etki mikroskopik tesir kesiti
σ_{compton}	:Compton saçılması mikroskopik tesir kesiti
$\sigma_{\text{çift oluşumu}}$	:Çift oluşumu mikroskopik tesir kesiti
N_0	:Hedef atom ya da elektron yoğunluğu
N_A	:Avogadro sayısı
ρ	:Yoğunluk
ρ_{nom}	:Nominal yoğunluk
A	:Atomun kütle numarası
w_i	:i. Elementin karışım içerisindeki ağırlıksal yüzdesi
I_0	:Gelen gama ışını şiddeti
I	:Malzemedan geçen gama ışını şiddeti
B	:Buildup factor
B_{beton}	:Betonun buildup faktörü
S	:Kaynak aktivitesi
$\dot{x}$	:Zırhın ön yüzündeki ışınlama hızı
E	:Foton enerjisi
λ	:Ortalama serbest yol
$x_{1/2}$	:Yarı tabaka kalınlığı
x_{10}	:Onuncu tabaka kalınlığı
Z	:Malzemenin atom numarası
n_i	:Bileşiğin i. atomunun sayısı
x	:Toprak kalınlığı
$\dot{x}_z$	:Zırhın arka yüzündeki ışınlama hızı
Z_{eff}	:Efektif atom numarası

ÖZET

GAMA RADYASYONUNUN TOPRAK İLE ZIRHLANMASININ İNCELENMESİ

Radyasyonun veya iyonizan parçacıkların ışınımının tüm canlı organizmalar için zararlı olması radyasyonun zırh malzemeleriyle zırhlamasını önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir. Zırhlamanın temel problemi, radyasyon dozunu önceden belirlenmiş biyolojik doz oranlarına indirmek için gerekli malzeme kalınlığı ve malzemenin kompozisyonunun tespit edilmesidir. Gama aktif izotopların çeşitli alanlarda kullanımının artmasıyla gama radyasyonunun malzeme içerisinde yutulması çalışmaları önem kazanmıştır. Gama radyasyonunun kullanımı için güvenli seviyelerde korunmak gereklidir. Laboratuvar çalışmalarında kurşun genellikle zırhlama amacı ile kullanılır, fakat sahra çalışmalarında kurşun kullanımı hantal ve kullanışsızdır. Sahra çalışmalarında bulunabilirliği ve maliyeti açısından kurşundan çok daha uygun olan toprak kullanılabilir.

Bu çalışmada, gama radyasyonu için toprak bir zırhlama malzemesi olarak incelenmiştir. Bu amaçla ^{137}Cs (662 keV) ve ^{60}Co (1173 ve 1332 keV) gama kaynakları ve kimyasal kompozisyonu bilinen toprak örnekleri kullanılmıştır.

Gama radyasyonunun ortamda nüfuziyetini ve yayılımını karakterize eden en önemli büyüklük zayıflatma katsayısıdır. Dikkate alınması gereken zayıflatma parametreleri ise, ortalama serbest yol, yarı tabaka kalınlığı, onuncu tabaka kalınlığıdır. Bu çalışmada, bahsedilen parametreler, gama zayıflatma ölçümleri kullanılarak toprak için tespit edilmiştir. Ayrıca, katmanlı sistemlerin (Fe + toprak ve Al + toprak) zırh kalınlığına etkisi incelenmiştir. Ve toprak için kütleli zayıflatma katsayıları, atomik tesir kesitleri ve efektif atom numaraları hesaplanmıştır.

SUMMARY

SOIL AS A GAMMA RADIATION SHIELDING MATERIAL

Because the exposure of ionizing particles or radiation is very harmful to all living organisms the protection of radiation by shielding materials is considered to be one of the most important researches. The central problem of shielding is to determine the thickness and/or the composition of the shielding material that is required to reduce the biological dose rate to certain predetermined levels. With the increasing use of gamma-active isotopes in various fields, the study of the absorption of gamma radiation in material became an important subject. To use gamma radiation for various fields, protection of the safety level is very important. In laboratory experiments lead is generally used for shielding purposes but in field experiments its use is somewhat cumbersome. Instead of lead, soil may be used as a gamma-ray shielding material in field experiments that is highly suitable from points of view of cost and availability.

In this study, the soil was investigated as a shielding material for gamma radiation. For this aim, ^{137}Cs (662 keV) and ^{60}Co (1173 and 1332 keV) gamma sources and the soil samples which known their chemical compositions were used.

The most important quantity, characterizing the penetration and diffusion of gamma radiation in extended media is the attenuation coefficient. There are some essential attenuation parameters to be taken into account, such as the mean-free-path, the half-value thickness and the tenth-value thickness. In this study, these quantities for soil samples were determined by using gamma attenuation measurements. Furthermore, it was searched the effect of multi-layered systems (Fe + soil and Al + soil) on the thickness of the shield. Also, some parameters such as the mass attenuation coefficients, atomic cross-sections, and effective atomic numbers of soils were calculated.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Radyasyon ve radyoaktivite 20. yüzyılda modern teknoloji çağının en temel unsurlarından biri olmuştur. Radyasyon çeşitlerinin karakteristiklerinin tanımlanması, bunların potansiyel faydalarının anlaşılması yanında, radyasyona maruz kalma halinde olabilecek potansiyel zararların da farkına varılmıştır. Böylece radyasyondan korunmak için radyasyon zırhlaması analizi ve dizaynı üzerine araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Zırhlama genel anlamda, radyasyonun nasıl meydana geldiğini, kaynağından nasıl yayıldığını, malzemeye nasıl etkileştiğini, geçtiği ortamda nasıl mikroskobik değişimler meydana getirdiğini ve bu değişimlerin ortamı nasıl etkilediğini inceleyen bir daldır.

20. yüzyılın başlarında gama ışını bulunmuş ve alfa ve beta parçacıklarının özellikleri tanımlanmıştır. Bu radyasyonlar, çeşitli malzemelerde zayıflatılarak karakterize edilmişlerdir ki bu da ilk zırhlama analizi olarak belirlenmiştir. Polonyum, radyum ve radonun yanında uranyum ve toryum da yaydıkları radyasyonlarla karakterize edilip, tanımlanmıştır. X-ışınlarının, radyum ve radonun tıpta teşhis ve tedavi için kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bununla birlikte, radyasyon nüfuziyetinin hastalık etkileri de gözlenmiştir. Maruz kalınan radyasyonun miktarını belirleme ve standardize etme, radyasyon risklerinin ve radyasyondan korunma standartlarının belirlenmesi uzun yıllar almıştır.

20. yüzyılın ilk çeyreği, iyonizan radyasyonun tehlike ve risklerinin anlaşıldığı, ve X-ışını ve gama fotonlarına karşı kurşun gibi malzemelerden yapılmış levhaların zırhlama için kullanıldığı periyoddur. Zırhlama parametreleri olarak; yarı kalınlık değeri ve absorpsiyon katsayılarını içeren basit exponansiyel faktörler düzenlenmiştir. 1932 yılında nötronun keşfi nükleer reaktörlerin ve silahların kullanımını gündeme getirmiştir. Nötronun en çok tehlike arzeden ve kalın zırhlama isteyen bir parçacık olduğu da kısa süre içinde farkedilmiştir.

Nükleer silah testleri için yapılan geniş deneysel çalışmaların sonucunda 1950'lerde gama radyasyonu hakkında daha ayrıntılı teorik bilgiler kaydedilmiştir. 1960'lardan sonra nükleer silah radyoaktif serpintilerindeki gama radyasyonunun zırhlaması konusuna önem verilmiştir ve teorik hesaplarla, deneysel çalışmaların kombinasyonu ile iyi geliştirilmiş bir zırhlama analizi yapılmıştır.

Radyasyonun tıpta teşhis ve tedavi amacı ile kullanılması, radyasyonun zararlı etkilerinden hastanın korunmasını da beraberinde getirmektedir. X-ışınlarının teşhiste kullanımı ve gama ışınlarının tedavide kullanımı uzun yıllardır gerçekleştirilmektedir. Ancak günümüzde hala hastanın ilgili organının dışındaki vücut bileşenlerinin radyasyondan etkilenmesini azaltmak için zırhlama yöntemleri önerilmektedir.

Bu çalışmalara bir örnek **Prasad ve diğerleri (1998)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, elektronlarla kanser tedavisinde doku bozukluğuna uğramış bölge dışında kalan organların radyasyondan etkilenmesini azaltmak için kurşun ya da Lepowitz metali ile zırhlama incelenmiştir. Alüminyum, bakır, kalay ve kurşun için olabilecek minimum kalınlık, tıbbi lineer hızlandırıcıda üretilmiş 6, 12 ve 20 MeV enerjilerinde ölçümlenmiştir. Bu minimum kalınlıkta, zırhın arkasında kalan organların aldıkları dozun, 99-86% oranlarında azaldığı görülmüştür.

Radyasyonun tıpta kullanımında sadece hastaların değil aynı zamanda bu alanda çalışanların da korunmasını gerektirmektedir. Bu amaca yönelik bir çalışma **Kobayashi ve diğerleri (1997)** tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, bazı tungsten alaşımlarının radyasyonu zırhlama etkileri ^{133}Ba (356 keV) ve ^{137}Cs (662 keV) gama kaynakları kullanılarak değerlendirilmiştir. Tungsten karpit (WC), yaygın olarak kullanılan kurşunla aynı etkiye sahipken, tungsten bakır (WCu) alaşımı tungsten kadar iyi bir etki vermiştir.

Sanayide radyasyonun kullanımı genellikle gama radyasyonu yayan kaynaklarla gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle gama ışınlarının zırhlamasına yönelik çok sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalarda, çoğunlukla çeşitli malzemeler ile gama ışınlarının zayıflaması ve zırhlamada önemli bir parametre olan build up faktörünün zırh malzemesi bileşenlerine göre değişimi incelenmektedir. **Bakos (1995)** tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çok enerjili gama ışınlarının Al, Fe ve Pb zırh malzemeleri ile oluşturulan katmanlı zırh bloklarındaki zayıflaması ve bu zırh modeli

için build up faktörleri incelenmiştir. Malzeme olarak kullanılan Al, Fe ve Pb 6 farklı şekilde yerleştirilerek çift katmanlı zırh tabakaları hazırlanmış ve 1.6, 6.13 ve 7.10 MeV foton enerjileri için build up faktörleri literatürde yer alan formülasyonlarla hesaplanmıştır.

Nükleer reaktörlerin zırh dizaynında göz önüne alınan radyasyon, nötronlar ve gama ışınlarıdır. Zira fisyon ürünlerinin bozunumundan gama ışınları da ortaya çıkmaktadır. Bazı zırh malzemesi kombinasyonları hem nötronu hem de gama ışınlarını zırhlamaya yöneliktir. Bu tip zırh malzemelerine en iyi örnek betondur. **Makarios ve diğerleri (1996)** tarafından yapılan bir çalışmada, ağır beton, nötron ve gama ışını zırhlaması açısından incelenmektedir. Bu çalışmada yoğunluğu $3,5\text{g/cm}^3$ olan ve demir içermeyen bir beton kullanılmış ve daha önce incelenen $4,6\text{g/cm}^3$ yoğunluğundaki bir beton ile karşılaştırılmıştır. İncelenen betonun hızlı nötronları zayıflatmada daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, ikincil gama ışınlarında da azalma gözlenmiştir. Hızlı nötronların toplam makroskobik tesir kesitleri, gama ışınlarının lineer zayıflatma katsayıları ve zayıflatma uzunlukları hem tüm enerji aralığında hem de farklı enerjilerde tespit edilmiştir. Sonuçlar daha önce yayınlanmış bilgilerle karşılaştırıldığında birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Gama ışınlarının zırhlanmasında, Portland çimentosunun sıkıştırılıp bloklar haline getirilerek kullanımı **Faramawy ve El-Hosiny (1998)** tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, çimento, içerisine silika ilave edilerek ve çeşitli basınçlar uygulanarak blok haline getirilmiştir. Silika ilavesinin ve çimentonun blok haline getirilmesinde kullanılan yöntemdeki farklılıkların gama ışınlarının zayıflatılmasındaki etkisi incelenmiştir. Çalışmada ^{137}Cs kaynak kullanılmış ve sonuçta silika ilavesi ile çimento blokların gama radyasyonunun zırhlanmasında kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Gama ışınlarının zırhlanmasında ucuz ve kolay bulunabilir bir malzeme de topraktır. Özellikle sahra çalışmalarında diğer zırh malzemelerinin temini ve taşınması zor olmaktadır. Toprağın bir zırh malzemesi olarak incelendiği bir çalışma **Mudahar ve Sahota (1985)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı enerjiler için kaynak ve dedektör arasına konulan toprak örneklerinin optimum kalınlığının bulunması amaçlanmıştır. Çalışmada ^{203}Hg , ^{137}Cs ve ^{60}Co kaynakları, NaI(Tl) dedektör ve iki çeşit toprak kullanılmıştır. Toprak örneklerinin kalınlıkları farklı

gama ışını enerjileri için farklı seçilmiştir. Örneğin, 279 keV için 3 cm, 662 keV için 5 cm, 1173 keV için 7 cm kullanılmıştır. Ölçme prosedürü her enerji için aynıdır. İlk sayım kaynak ve dedektör arasında boş kutular varken alınmıştır. Sonra bir numaralı kutu toprakla doldurulmuş ve sayımı alınmıştır. Bu işlem toprak dolu kutuların artırılmasıyla tekrar edilmiştir. Toprağın ölçülen zayıflatma katsayıları kimyasal bileşenlerine ve neme göre değişmemiştir. 279-1173 keV enerji aralığında optimum kalınlık ve gama enerjisi arasında doğru bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Toprağın zırh malzemesi olarak inceleyen bir diğer çalışma, yine **Mudahar ve Sahota**'ya (1988) aittir. Bu çalışmada toprağın zayıflatma katsayısı tane boyutu ve uygulanan basınca bağlı olarak 279-1250 keV enerji bölgesinde incelenmiştir. Çalışmada ^{203}Hg , ^{137}Cs ve ^{60}Co kaynakları kullanılmıştır. Optimum bir zırh kalınlığı bulmak için farklı tane boyutlarında ve foton enerjilerinde yarıdeğer kalınlıkları da hesaplanmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda 279 keV ve üzerinde çalışılırsa kimyasal bileşimin kütleli zayıflatma katsayısı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu, 150 keV foton enerjisine kadar kimyasal bileşimin etkisinin baskın olduğu, 150-300 keV arasında sadece demir yoğunluğu fazla olan toprakta etkili olduğu görülmüştür. Çalışmada lineer zayıflatma katsayısının ve yarı kalınlığın tane boyutuna bağlı olarak değiştiği, malzeme üzerine uygulanan basıncın ise belli bir değerden sonra lineer zayıflatma katsayısı üzerinde etkisinin olmadığı gösterilmiştir. Ayrıca kütleli zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağlı olarak bir miktar azaldığı buna karşılık uygulanan basınca bağlı olarak değişmediği gözlenmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında da toprak, zırh malzemesi olarak incelenmiştir. Özellikle endüstride kullanımı yaygın olan ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1173 ve 1332 keV) kaynakları için kimyasal bileşenleri bilinen topraklarla zırhlama parametreleri saptanmıştır. İncelenen parametreler içerisinde kullanılabilecek minimum zırh kalınlığı, yarı kalınlık, ortalama serbest yol bulunmaktadır. Ayrıca demir ve alüminyum kullanılarak topraklarla birlikte katmanlı zırh şekilleri oluşturulmuş ve radyasyonun zayıflaması incelenmiştir.

BÖLÜM 2

GAMA RADYASYONUNUN ZIRHLANMASI

2.1 Zırhlamanın Amacı

Radyasyonun zırhllanması çeşitli amaçlara yönelik olarak gerçekleştirilir. Bu amaçlardan birisi, radyasyon kaynağına yakın mesafede çalışmak zorunda kalan insanlar üzerinde radyasyonun zararını azaltmaktır. Buna biyolojik zırhlama adı verilir. Nükleer reaktörlerde, reaktör kabının gama ışınlarının absorpsiyonu ile oluşan ısıdan korunması termal zırhlama ile sağlanır. Radyasyonla çalışılan alandaki elektronik cihazların korunması için yapılan zırhlama, alet zırhlaması adını alır (Lamarsh, 1977). Zırhlama hesaplamaları genellikle gama ışınları ve nötron için yapılmaktadır. Zira alfa ve beta parçacıklarının tamamen zayıflatılacakları zırh kalınlıkları, bilinen menzilleri sayesinde kolaylıkla bulunmaktadır. Ancak, foton radyasyonu, zırh malzemesinde tamamen zayıflatılamaz, ıslama kabul edilebilir seviyelere indirilebilir (Hallenbeck, 1994). Zırhlamada temel problem, belirli noktalardaki biyolojik dozu daha önce belirlenmiş seviyelere indiren malzeme kalınlığı ve/veya malzeme kompozisyonunun saptanmasıdır. Zırhlama için, ortamın iyonizasyonuna neden olan radyasyonun tipini bilmek önemlidir. Radyasyon, alfa, beta parçacıkları, protonlar gibi elektrik yükü taşıyan parçacıklar olabilir. Bunlar, geçtikleri ortamdaki atomların elektronlarını direkt olarak etkilediklerinden direkt iyonizan (directly ionizing) olarak adlandırılırlar. Nötronlar, X-ışınları veya gama fotonları yüklü değildir ve böylece oluşan ikincil yüklü parçacıklar iyonizasyona sebep olurlar. Bu tip radyasyon da dolaylı iyonizan (indirectly ionizing) radyasyon olarak adlandırılırlar. Direkt iyonizan radyasyonun zırh malzemesinde durdurulması kolaydır. Dolaylı iyonizan radyasyonun zırh malzemesinden geçme olasılığı yüksektir, dolayısıyla zırh büyük çaplı ve pahalı olmaktadır.

2.2 Radyasyon Kaynakları

Bir zırlama probleminin çözümü, radyasyon kaynağının karakteristiklerini anlamayı gerektirir. En temel kaynak tipi, nokta kaynaktır. Eğer bir kaynağın;

- i. boyutları kaynak ve dedektör arasındaki mesafeden önemli derecede küçükse,
- ii. kaynağın kendi hacmi içindeki radyasyon etkileşimleri ihmal edilebilir düzeyde ise

bu kaynak, nokta kaynak olarak kabul edilir. Genellikle bir nokta kaynak, enerjiye, yöne ve zamana bağlı olarak karakterize edilir. Hemen hemen tüm zırlama uygulamalarında, zaman bağımsız bir değişken olarak ele alınabilir. Kaynaktan radyasyon yayını ile, hedef malzemede enerji depolanması arasında geçen zaman ihmal edilebilir olduğu için, radyasyon problemleri zamandan bağımsız olarak değerlendirilir. Böylece nokta kaynağı karakterize eden en genel ifadeler enerji ve yön olur. Zırlama uygulamalarında kullanılan çoğu radyasyon kaynağı izotropiktir. Bu durumda kaynak karakterizasyonu sadece enerji bilgisini gerektirir. Zırlama hesaplamalarında radyasyon kaynaklarının doğasının, şiddetinin, enerjisinin, uzaysal dağılımlarının tayin edilmesi gerekir. Önemli radyasyon kaynakları şu başlıklar altında sınıflandırılır:

1. Nükleer reaktörler
2. Radyoaktif Kaynaklar
3. Parçacık Hızlandırıcılar

Nükleer reaktörlerin zırlanmasını diğer kaynaklardan ayıran unsurlar, radyasyon kaynaklarının şiddeti ve çeşitliliğidir. Nükleer reaktörlerde zırla dizaynı için temel alınan radyasyon tipleri, ne tür reaktör olursa olsun, nötronlar ve gama ışınlarıdır.

Nükleer reaktörlerdeki radyasyon tiplerini sınıflandırırken birincil ve ikincil radyasyonlar olarak ayırım yapılmalıdır. Birincil radyasyon nükleer fisyon kaynaklı radyasyon olarak tanımlanır. Fisyon ürünlerinin bozunumundan yayılan gama radyasyonu buna örnek teşkil eder. İkincil radyasyon diğer tüm radyasyonları

içerir. Örneğin, birincil nötronların zırh malzemesi içinde etkileşmesiyle ortaya çıkan gama radyasyonu ikincil radyasyondur.

Fisyon sonrası yakıt elemanları yüksek derecede radyoaktiftirler. Bu yakıt elemanları kullanılmak ya da imha edilmek amacıyla reaktörden çıkarıldıklarında zırhlınmaya ihtiyaç duyulur.

Radyoaktif malzeme depolanacak veya bu malzemeyle çalışılacak birçok bina vardır. Bu binalar inşa edilirken zırhlama ile birlikte düşünülüp dizayn edilmelidir. Bu binalara örnek olarak gama ışını kullanılan tıp merkezleri, ısıtılmış yakıt elemanı işleyen fabrikalar, radyoaktif atık depolanan tanklar verilebilir.

Radyoizotopların bir kısmı doğal radyoaktif malzemelerden elde edilebilirler. Ancak bu tip radyoizotopların sayısı, miktarı ve uygulama alanları sınırlıdır. Bu nedenle, radyoaktif kaynaklar yapay olarak, genellikle nükleer reaktörlerde, üretilirler. Radyoizotoplar çeşitli radyasyonları yayabilirler ve her radyoizotop farklı hızda bozunuma uğrar. Her radyoizotopun karakteristik bozunum sabiti ve yarı ömrü vardır. Endüstri, bilimsel araştırmalar ve tıpta yaygın kullanımı olan radyoaktif kaynaklar kullanım, taşıma ve saklama aşamalarında zırhlama gerektirirler.

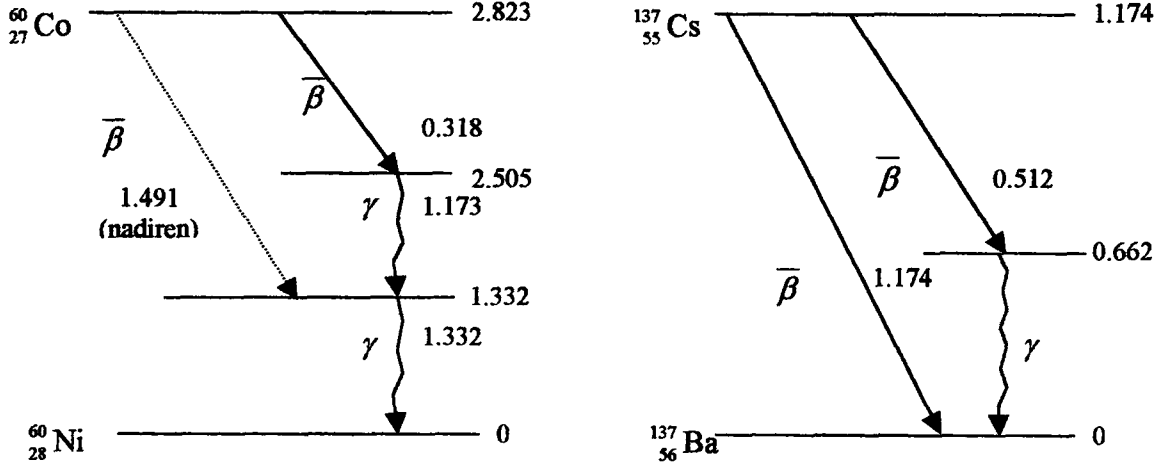
Bundan sonraki bölümde, tez çalışmasında zırhlama parametreleri incelenecek olan gama fotonu kaynaklarına değinilecektir.

2.2.1 Gama Fotonu Kaynakları

Gama fotonları, radyoaktif kaynakların bozunumunda ve nükleer reaktörlerde fisyon sırasında, fisyon ürünlerinin bozunumunda, nötronun malzeme ile etkileşmeleri sırasında yayınabilirler (Shultis and Faw, 1996).

Gama radyoizotopları, eğitim, tıp, araştırma, endüstri alanlarında geniş çapta kullanılmaktadır. Bu kaynaklar bir veya daha fazla gama ışını yayarak bozunuma uğrarlar. Her radyoizotopun karakteristik bir gama spektrumu mevcuttur. Endüstride en geniş uygulama alanı bulunan ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoizotoplarının bozunum

şemaları Şekil 2.1 de görülmektedir. Radyoaktif kaynaklar zırlama analizinde önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 2.1 ^{137}Cs ve ^{60}Co gama kaynaklarının bozunum şemaları

Gama ışınları fisyon olayının ilk 60 saniyesinde (öncü gama fotonları) veya fisyon ürünlerinin bozunumundan meydana gelirler. Toplam fisyon enerjisinin yaklaşık %10-12 kadarı gama ışını olarak yayınlanır (Almenas,1992). Her iki tip gama radyasyonu da reaktörün zırlanmasında önemlidir. Öncü gama fotonlarının enerji aralığı 0.1-10.5 MeV civarındadır. Nükleer reaktörlerde fisyon ürünlerinin bozunumu sırasında hayli uzun süren gama aktivitesi oluşmaktadır. Gecikmiş gama fotonlarının toplam enerjisi 6-8 MeV civarındadır. Birçok malzeme için, nötron absorpsiyonu sonucunda, yarı ömrü saniyeden yıllara kadar dağılım gösteren bir radyoizotop oluşur. Bu aktivasyon çekirdeklerinin sonradan bozunumundan çıkan radyasyon özellikle reaktör kalbindeki yapısal malzemeler için önem taşır. Bu gibi radyoizotoplar genellikle beta radyasyonu yayarak kız çekirdeği uyarılmış seviyede bırakır. Kız çekirdek ise 10^{-14} sn'de gama fotonu yayarak bozunur ve temel seviyeye iner.

Radyoizotopların pozitron bozunumu ya da çift oluşumunda meydana gelen pozitronlar, 10^{-10} sn'de malzeme içinde yavaşlar ve elektronlarla birleşerek yok olurlar. Elektron ve pozitronun kalan kütle enerjisi her biri 0.511 MeV enerjiye sahip iki anihilasyon fotonu şeklinde yayınır. Çift oluşumunda meydana gelen

ikincil anihilasyon radyasyonu, zırlama analizlerinde ihmal edilebilir, çünkü birincil fotonların enerjileri çok daha yüksektir.

Diğer bir nötron reaksiyonu olan, ısınlı yakalanmada uyarılmış çekirdek 10^{-14} sn içerisinde temel enerji seviyesine bozunur ve bu arada bir veya daha fazla gama fotonu yayınlanır (Shultis and Faw, 1996).Düşük enerjili nötronların inelastik saçılmaları sonucu oluşan ikincil gama fotonları enerjilerinin düşük olması nedeni ile, genellikle zırlama açısından önem taşımaz.

2.3 Gama Fotonlarının Malzeme İçerisinde Zayıflatılması

Gama fotonları yüksüz olmaları nedeni ile, malzeme içerisinde etkileşme yapmaksızın uzun mesafe katedebilirler. Bir fotonun malzeme içerisinde alacağı yol, istatistiksel olarak birim mesafede yapacağı etkileşmelere bağlıdır. Bu etkileşmeler de fotonun enerjisine ve fotonun yol almakta olduğu malzemeye bağlıdır. Bir gama fotonu malzeme ile etkileştiği zaman, malzeme tarafından yutulabilir, enerji kaybederek veya kaybetmeden saçılır ve yönü değişebilir. Genellikle, gama fotonları malzeme ile etkileşerek tamamen yok olmayabilirler ancak zayıflayabilirler.

2.3.1 Etkileşme Mekanizmaları

Thomson ve Rayleigh saçılmaları, gama fotonlarının malzemeye enerji transferi yapmadıkları etkileşme mekanizmalarıdır. Thomson saçılmasında, bir serbest elektron ile gama fotonunun elastik çarpışması gerçekleşir. Bu tip saçılma, çok düşük enerjili gama fotonlarının malzeme ile etkileşmesinde oluşabilir. Serbest elektron gelen gama fotonunun frekansı ile aynı frekansta titreşim yapar ve aynı frekansta ikincil elektromanyetik radyasyon yayar.

Rayleigh saçılmasında malzeme üzerine gelen gama foton enerjisinin çok az miktarını kaybeder ve küçük bir açı ile saçılır. Bu tip saçılma düşük enerjili gama fotonları ve yüksek atom numaralı malzemeler için sözkonusu olabilir.

Thomson ve Rayleigh saçılmaları zırlama problemlerinde dikkate alınmazlar. Gama fotonlarının malzeme ile etkileşme mekanizmalarının en etkin olanları fotoelektrik etki, Compton saçılması, çift oluşumu ve fotonükleer reaksiyonlardır.

- **Fotoelektrik Etki**

Bu olayda, gelen foton yok olur, enerjisini bir yörünge elektronuna transfer eder ve elektron atomdan ayrılır. Elektron “fotonun enerjisi - elektronun bağlanma enerjisi” kadar enerjiyi dışarı taşır. Bu, özellikle düşük enerjili fotonlar için yüksek atom numaralı malzemelerde önemli bir etkidir. Fotoelektrik olayı sonucunda salınan fotoelektron ve floresan radyasyonu yeterli enerjiye sahip olmadığından zırlama çalışmalarında bu mekanizma bir yutulma etkileşmesi sayılır.

- **Compton Saçılması**

Bu mekanizmada bir foton bir atomun elektronuyla çarpışır, enerjisinin bir kısmını kaybeder ve geliş yönünü değiştirir. Gelen fotonun üzerinde, atom çekirdeğinin bir nötron üzerinde olduğuna benzer bir etkisi vardır. Her iki durumda da gelen parçacık çarpışmadan sonra ortamda kalır. Compton saçılması, 1 MeV ile 10 MeV enerji aralığındaki gama fotonları, düşük ve orta değerli atom numaralı elementler için baskınlık gösterir. Gama zayıflatma hesaplamalarında ana zorluk, Compton saçılmasında ortamda mevcudiyetini sürdüren gama fotonlarından kaynaklanır. Gama radyasyonunun zırlanması konusunda Compton saçılması önemli bir mekanizmadır.

- **Çift Oluşumu**

1.02 MeV’de yüksek enerjili fotonların oluşturduğu bu etkide, gelen foton yüklü bir parçacığın alanında yok olur ve bir elektron-pozitron çifti oluşur. Hedef parçacık, elektron veya genellikle çekirdek olur. Toplam çift oluşumu tesir kesiti atom numarasının artmasıyla süratle artar. İlk yaklaşım çift oluşumunun yutulma reaksiyonu olarak düşünülmesidir ve gelen fotonun toplam enerjisinin etkileşim anında dağıldığı kabul edilir. Ancak pozitronun elektron ile birleşmesi sonucunda düşük enerjili iki anhilasyon gama ışını yayılmaktadır.

- **Fotonükleer Reaksiyonlar**

Bir gama fotonu atom çekirdeği ile etkileşerek sonuçta bir parçacık yayınlanabilir. Buna en iyi örnek $^{206}_{82}\text{Pb}(\gamma, n)^{205}_{82}\text{Pb}$ reaksiyonudur. Fotonükleer reaksiyonun gerçekleşmesi için, foton enerjisinin parçacığın bağ enerjisini yenecek kadar büyük olması gerekir. Bu da gelen fotonun birkaç MeV enerjiye sahip olması anlamına gelir (Turner, 1995). Bu etkileşme mekanizması sonucu oluşan parçacığın kinetik enerjisi, foton enerjisi ile parçacığın bağ enerjisi arasındaki farka eşittir.

Fotonükleer reaksiyonun gerçekleşme olasılığı, diğer üç etkileşme mekanizmasına göre daha zayıftır. Bununla birlikte, fotonükleer reaksiyonda ortaya çıkan radyasyondan korunma problemi büyüktür. Ayrıca parçacığın ayrıldığı çekirdek radyoaktiftir. Fotonükleer reaksiyonlar, yüksek enerjili fotonların üretildiği hızlandırıcılarda zırlama konusunda önem kazanmaktadır.

Radyasyon zırlama analizinde 10 eV ile 10 MeV arasındaki foton enerjileri önemlidir. Bu enerji bölgesinde, fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu mekanizmaları meydana gelmektedir. Bu üç etkileşme mekanizması içerisinde fotoelektrik etki düşük enerjili fotonlar, çift oluşumu ise yüksek enerjili fotonlar için önem kazanmaktadır. Compton saçılması orta enerji bölgesinde hakim olan bir etkileşme mekanizmasıdır.

2.3.2 Tesir Kesitleri

Radyasyonun malzeme ile olan etkileşimi doğada her zaman istatikseldir, bu yüzden olasılık terimleriyle tanımlanmaktadır. Homojen bir malzemeyi geçen bir parçacık düşünelim ve P, Δx mesafesini geçerken parçacığın absorbe olma olasılığını gösterebilir.

$$\mu \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (P/\Delta x) \quad (2.1)$$

büyüklüğü verilen etkileşim için malzemenin bir özelliğidir. Küçük uzunlukların limitinde μ ; birim diferansiyel yol uzunluğunda bir parçacığın etkileşime girme olasılığı olarak ifade edilir.

μ verilen malzeme için sabit ve verilen etkileşim tipinde, etkileşimden önce aldığı yoldan bağımsızdır. Birim yol uzunluğunda etkileşim olasılığı radyasyonun malzemeyle nasıl etkileştiğini tanımlar ve genellikle lineer zayıflatma katsayısı olarak adlandırılır. Terminolojide, μ , makroskopik tesir kesiti olarak geçer ve nötron etkileşimleri tanımlanırken Σ sembolüyle gösterilir, birimi cm^{-1} dir.

Radyasyon akısı ϕ olmak üzere, $\mu \phi$ ifadesi birim hacimdeki etkileşme sayısını gösterir. Bu ifade malzemenin yoğunluğuna bölünürse, $(\mu/\rho)\phi$, birim kütledeki etkileşme sayısı elde edilir. Lineer zayıflatma katsayısı, gelen parçacığın tipine ve enerjisine, etkileşme mekanizmasına, radyasyonun etkileştiği malzemenin kompozisyonuna ve yoğunluğa bağlıdır (Shultis, 1996). Lineer zayıflatma katsayısını belirleyen önemli bir büyüklük de malzemedeki hedef atom veya elektronların yoğunluğudur. Hedef atom ya da elektron yoğunluğu, N_0 , ile lineer zayıflatma katsayısının doğru orantılı olması beklenir.

$$\mu = N_0 \sigma \quad (2.2)$$

Bu denklemde σ mikroskopik tesir kesiti olarak tanımlanır ve birimi barn'dır.

Foton etkileşimleri için toplam mikroskopik tesir kesiti, üç önemli foton-madde etkileşmesi tesir kesitlerinin toplamından oluşur.

$$\sigma = \sigma_{\text{foto elektrik}} + \sigma_{\text{compton}} + \sigma_{\text{çift oluşumu}} \quad (2.3)$$

Malzemedeki hedef atomların yoğunluğu, Avogadro sayısı, N_A , malzeme yoğunluğu, ρ , ve kütle numarası, A , cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$N_0 = \frac{\rho \cdot N_A}{A} \quad (2.4)$$

Buna göre Denk.(2.2) yeniden yazılıp, düzenlenirse;

$$\mu / \rho = \frac{N_A}{A} \sigma \quad (2.5)$$

μ / ρ , fotonun etkileştiği malzemenin bir özelliğidir ancak yoğunluğuna bağlı değildir. Geniş bir foton enerjisi aralığında malzemenin doğasına çok az bağımlılık gösteren bu büyüklük, kütleli zayıflatma katsayısı olarak tanımlanır ve birimi cm^2/g dır.

Bileşikler ve homojen karışımlar için lineer ve kütleli zayıflatma katsayıları aşağıdaki denklemlerle bulunabilir.

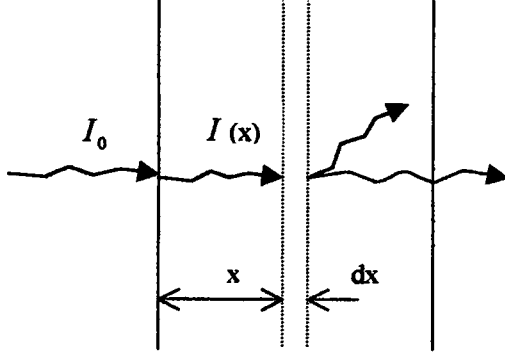
$$\mu = \sum_i \mu_i = \sum_i N_{oi} \sigma_i \quad (2.6)$$

ve

$$\mu / \rho = \sum_i w_i (\mu / \rho)_i \quad (2.7)$$

Denklem (2.6) da, i . bileşene ait atomik yoğunluk N_{oi} ile, mikroskopik tesir kesiti σ_i ile gösterilmiştir. Denklem (2.7) deki w_i ise i . Bileşenin karışım içerisindeki ağırlıksal oranıdır.

Tek enerjili fotonlar homojen bir ortamda eksponansiyel olarak zayıflarlar. Şekil 2.2 de görüldüğü gibi, I_0 şiddetindeki bir foton malzeme üzerine düştüğünde, foton demetinin bir kısmı malzeme tarafından yutulur ve bir kısmı da malzeme içerisinde saçılır.



Şekil 2.2 Fotonun malzeme içerisinde zayıflatılması

Şekil 2.2 de $I(x)$, x kalınlığındaki malzemeyi etkileşmeksizin geçen foton şiddetini vermektedir.

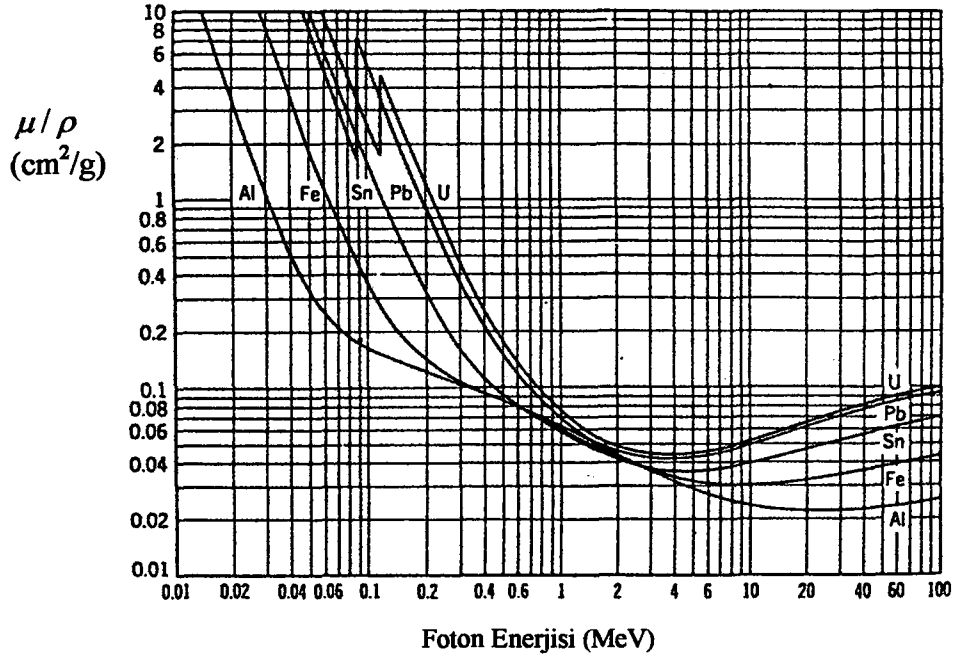
$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.8)$$

Denklem (2.8) deki $e^{-\mu x}$ gelen gama fotonunun x kalınlığındaki malzemeyi etkileşmeden geçme olasılığını vermektedir. Sonuçta, $e^{-\mu x}$ bir zırh malzemesinde zırhtan etkileşmeden geçen foton kesrini tarif etmektedir.

Fotonlar için verilen bir malzemede ve verilen bir foton enerjisi için toplam lineer zayıflatma katsayısı, foton etkileşme mekanizmalarına ait lineer zayıflatma katsayılarının toplamına eşittir.

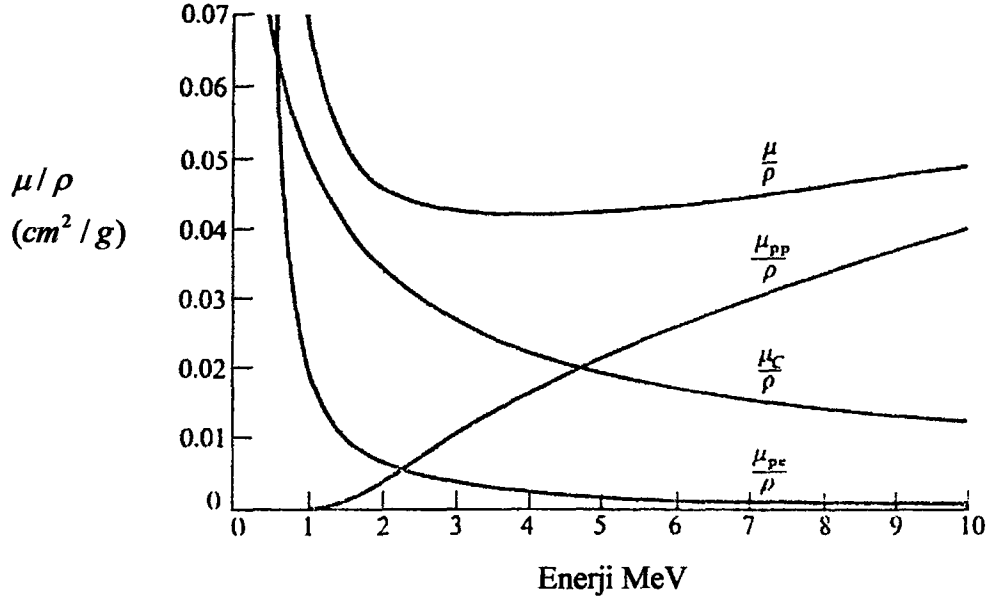
$$\mu = \mu_{\text{foto elektrik}} + \mu_{\text{compton}} + \mu_{\text{çift oluşumu}} \quad (2.9)$$

Verilen bir foton enerjisi ve verilen bir malzeme için toplam kütleli zayıflatma katsayısı da benzer şekilde bulunur. Çeşitli malzemeler için foton enerjisine bağlı olarak kütleli zayıflatma katsayılarının değişimi Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3 Çeşitli malzemeler için kütleli zayıflatma katsayısının foton enerjisine bağlı değişimi (Turner, 1995).

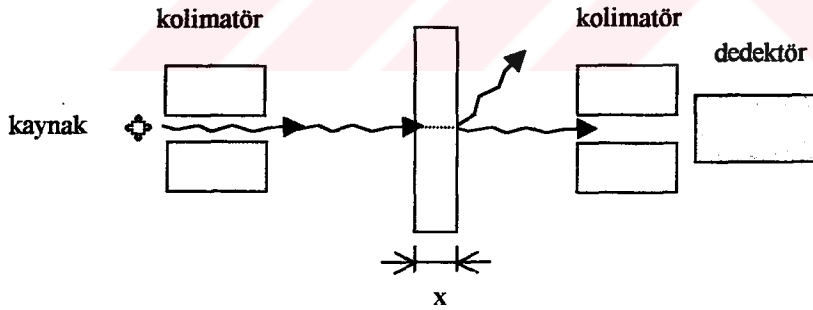
Şekil 2.3'den görüldüğü gibi U ve Pb için kütleli zayıflatma katsayısı, foton enerjisi fotoelektrik etkiyi oluşturacak seviyeye gelince ani bir artış göstermektedir. Diğer malzemeler için düşük enerjilerde eğrilerin yapıları birbirine benzemektedir. Foton enerjisi birkaç yüz keV veya daha büyük olunca, atomik elektronların bağ enerjisi daha önemsiz olur ve bu bölgede Compton saçılması en baskın etkileşme şeklidir. Bu enerji bölgesinde farklı malzemelerin kütleli zayıflatma katsayıları birbirine yakın değerdedir. Compton saçılması çift oluşumunun eşik enerjisi olan 1.02 MeV'in üzerinde de etkili olmaya devam eder. Çift oluşumunun en fazla etkin olduğu enerji bölgesinde artık Compton saçılmasının etkisi görülmez. Kurşun için 1-10 MeV enerji aralığında kütleli zayıflatma katsayısının değişimi Şekil 2.4'de verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği gibi yüksek foton enerjilerinde fotoelektrik etki olasılığı hızla azalırken, çift oluşumu olasılığı sürekli artmaktadır.



Şekil 2.4 Kurşun için kütleli zayıflatma katsayısının değişimi (Lamarsh, 1977).

2.3.3 Foton Demeti Geometrisi

Lineer zayıflatma katsayısı, Şekil 2.5’de görülen dar demet geometrisi ile ölçülen foton zayıflatma bilgisi kullanılarak bulunabilir.

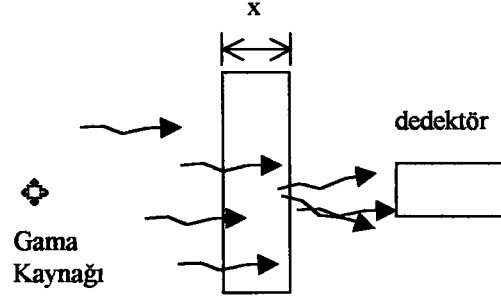


Şekil 2.5 Dar demet geometrisi

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi kaynak ve dedektörün kurşun kolimatörler içerisine yerleştirilmesi ile oluşturulan bu tip geometride, sadece malzemeyi etkileşme yapmadan geçen gama fotonlarının dedektöre ulaşması sağlanır. Zırhlama problemlerinin çözümünde, belli bir ışınlama şiddetine göre minimum zırh kalınlığının bulunması gereklidir. Dar demet geometrisi kullanılarak, verilen bir

foton enerjisi için kullanılacak minimum zırh malzemesi kalınlığı hesaplanabilir (Hallenbeck, 1994).

Foton demeti Şekil 2.6’da görüldüğü gibi paralel ve geniş bir yapıya sahip ise, ölçülen radyasyon şiddeti saçılan fotonları da içerir.



Şekil 2.6 Geniş demet geometrisi

Bu nedenle zırh malzemesini geçen radyasyon şiddeti dar demet geometrisine göre daha büyük olur ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I = B I_0 e^{-\mu x} \quad (2.10)$$

Bu denklemde B buildup faktörü ($B \geq 1$) olarak tanımlanır. Verilen bir zırh malzemesi, kalınlık, foton enerjisi ve kaynak geometrisi için build up faktör hesaplanır veya ölçülür. Bu faktör deneysel olarak elde edilen foton zayıflatma ölçümleri kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$B = \frac{\text{Zırhın arkasında ölçülen radyasyon şiddeti}}{\text{Hesaplanan radyasyon şiddeti}} \quad (2.11.)$$

Buildup faktör ile ilgili teorik çalışmalar, bu faktörün

- (i) zayıflatma ortamının doğasına
- (ii) kaynak fotonlarının enerjisine

- (iii) kaynak ve ilgilendiğimiz nokta arasındaki uzaklığın ortalama serbest yol cinsinden değerine
- (iv) kaynağın geometrisine

bağlı olduğunu göstermiştir (Wood, 1987). Literatürde yer alan çeşitli ampirik formüller kullanılarak, çeşitli foton enerjileri, malzemeler için, μx faktörüne bağlı olarak buildup değerleri hesaplanıp, tablolar haline getirilmiştir. Beton gibi birden fazla elementten oluşan zırh malzemeleri için buildup faktör her elemente ait buildup faktörlerin aritmetik ortalamasıdır (Turner, 1995).

$$B_{beton} = \frac{1}{2} (B_{Al} + B_{Fe}) \quad (2.12)$$

Çok katmanlı zırh sistemlerinde ise buildup faktör, her zırh tabakasının buildup faktörlerinin çarpımı ile hesaplanır.

$$B = B_1(\mu_1 x_1) \times B_2(\mu_2 x_2) \times \dots \quad (2.13)$$

Bu denklemde 1 ve 2 zırh katmanlarını ifade etmektedir. Verilen bir foton enerjisi ve zırh malzemesi için minimum kalınlık bulunurken, dar demet geometrisi kullanılır ($B = 1$). Eğer istenirse geniş demet geometrisi ve buildup faktör gözönüne alınarak kalınlık arttırılabilir.

2.4 Bazı Zırhlama Parametreleri

Bir radyasyon kaynağından yayılan radyasyon dozu, kaynak ile aradaki mesafenin arttırılması, ışınlama süresinin minimumda tutulması ve zırhlama ile azaltılır. Prensipde zırhlama tek başına radyasyon dozunu istenilen seviyeye indirebilir.

Bir nokta kaynaktan R mesafedeki radyasyon şiddeti, S kaynak aktivitesi olmak üzere

$$I_0 = \frac{S}{4\pi R^2} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Aynı mesafeye yerleştirilmiş x kalınlığındaki bir zırh malzemesini geçen radyasyon şiddeti ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I = \frac{S e^{-\mu x}}{4\pi R^2} \quad (2.15)$$

Bir nokta kaynaktan R mesafedeki ışınlama hızı, $\dot{x}$,

$$\dot{x} = \frac{0.5SE}{R^2} \quad (2.16)$$

şeklindedir. Burada S kaynağın aktivitesi (Ci), E foton enerjisi (MeV) olmak üzere, ışınlama hızı R/h olarak elde edilir. Nokta kaynaktan yayılan gama fotonları x kalınlığında bir zırhtan geçerse, zırhın arka yüzündeki ışınlama hızı, $\dot{x}_z$, aşağıdaki gibi bulunur (Turner, 1995).

$$\dot{x}_z = \frac{0.5SE}{R^2} e^{-\mu_z x} \quad (2.17)$$

Burada μ_z zırh malzemesinin lineer zayıflatma katsayısıdır.

- **Ortalama Serbest Yol**

Zırhlama çalışmalarında kullanılan bu parametre gerek yüklü parçacıklar için gerekse fotonlar için tariflenebilir. Bir gama fotonunun malzeme ile etkileşmeden aldığı yola ortalama serbest yol denir. Ortalama serbest yol lineer zayıflatma katsayısı cinsinden ifade edilebilir.

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (2.18)$$

- **Yarı Tabaka Kalınlığı**

Yarı tabaka kalınlığı, $x_{1/2}$, malzeme ile etkileşime girmemiş radyasyonun başlangıçtaki değerinin yarısına indiği kalınlıktır. Bu kalınlık değeri,

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer şekilde onuncu tabaka kalınlığı ϕ , başlangıçtaki radyasyonun %10'una inmesi için katetmesi gereken mesafe olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x_{10} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.20)$$

BÖLÜM 3

EFEKTİF ATOM NUMARASININ İNCELENMESİ

3.1 Efektif Atom Numarası ile İlgili Çalışmalar

Gama fotonlarının malzeme ile etkileşme mekanizmaları genellikle foton enerjisinin yanı sıra, malzemenin atom numarası ile ilgilidir. Fotoelektrik etki olasılığı, yüksek atom numaralı malzemeler ve düşük enerjili fotonlar için büyüktür. Fotoelektrik tesir kesiti, n enerjinin bir fonksiyonu olmak üzere, Z^n ile değişir. Compton saçılması olasılığı atom numarasına bağlı olarak büyük değişim göstermez. Buna karşılık çift oluşumu tesir kesiti, foton enerjisi arttıkça ve Z^2 ile büyür (Turner, 1995).

Birden fazla elemente sahip malzemelerin de tek bir atom numarası ile temsil edilmesi düşüncesi, efektif atom numarası parametresini ortaya çıkarmıştır. Foton zayıflatma katsayılarında olduğu gibi efektif atom numarası da çok bileşenli malzemeler için hesaplanabilir. Bu konuda yapılan deneysel ve teorik çalışmalar sonucu, malzeme içerisindeki her bileşenin ağırlıksal yüzdesini dikkate alan bazı formülasyonlar elde edilmiştir. Efektif atom numarası çok elementli ortamlarda X veya gama radyasyonunun zayıflatılmasının açıklanması için yararlı parametrelerden birisidir, radyasyonun etkileştiği hedef hakkında bilgi verir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalar, çeşitli elementlerden oluşan bir malzemenin efektif atom numarasının tek bir sayı ile ifade edilemeyeceğini, her foton etkileşme mekanizması için farklı olabileceğini göstermiştir.

Ayrıca efektif atom numarasının, elementlerin malzeme içerisindeki ağırlıksal oranlarına, malzemedeki element sayısına da bağlı olduğu gösterilmiştir. Endüstri, tıp, tarım, radyasyon zırhlaması gibi alanlarda kullanılan malzemeler için, kısmi ve

toplam foton etkileşimleri açısından efektif atom numarasının bulunmasına yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur.

Bu çalışmalardan bazıları biyolojik örnekler için efektif atom numarasının bulunmasını hedeflemektedir. **Murty ve diğ. (1999)** tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada doku eşdeğer malzemelerde efektif atom numarası, foton tesir kesiti ilişkisi ile efektif atom numarasının foton enerjisi ve elementel kompozisyonuna bağlılığı incelenmiştir. 13-60 keV enerji aralığında gerçekleştirilen çalışmada, efektif atom numarası fotoelektrik etki ve koherent saçılma mekanizmalarının etkisi altındadır.

Tıbbi malzemeler için yapılan bir diğer çalışma, **Koç ve Özyol (2000)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada 10-150 keV enerji aralığında 11 farklı biyolojik örnek için efektif atom numarası bulunmuştur. Çalışılan biyolojik örnekler için 10-150 keV aralığında efektif atom numarasının eksponansiyel bir değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Murty ve diğ. (2000) tarafından yapılan bir çalışmada, bir yüksek bir düşük atom numaralı elementten oluşan W/Cu alaşımı için 60-400 keV enerji aralığında efektif atom numarası saptanmıştır. Alaşımdaki W ve Cu yüzdeleri değiştirilerek iki farklı yapı elde edilmiş ve bu yapılara ait deneysel olarak bulunan foton zayıflatma katsayıları kullanılarak tesir kesiti, efektif atom numarası bilgilerine ulaşılmıştır. 80.9 keV den itibaren efektif atom numarasının büyük değişimler göstermediği sonucuna varılmıştır.

Çeşitli bileşiklerin foton zayıflatma katsayıları ve efektif atom numaralarının bulunduğu bir çalışma **Singh ve diğ. (1995)** tarafından gerçekleştirilmiştir. BaF_2 , NaCl , TiO_2 , H_3BO gibi bileşikler için çeşitli foton enerjilerine sahip kaynaklarla deneysel olarak bulunan foton zayıflatma katsayıları kullanılarak tesir kesiti bilgilerine ulaşılmıştır. Tesir kesiti bilgileri yardımı ile de bileşiklere ait efektif atom numaralarına ulaşılmıştır. Çalışmada efektif atom numaralarının foton enerjisine bağlı olarak değişimi incelenmiş ve düşük foton enerjilerinde bu değişimin daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır.

Radyasyon zırhlaması için kullanılan malzemelerin bazıları da çok elementlidir. Buildup ve zırhlama hesaplamalarında malzemeyi temsil edecek efektif atom numarasının bulunması önemlidir. Zırh malzemesi olabilecek bazı malzemeler için efektif atom numarasının saptanmasına yönelik çalışmalardan birisi **El-Kateb ve diğ. (2000)** tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, pirinç, bronz, çelik, Al-Si alaşımı ve Pb-Sb alaşımı için efektif atom numaraları incelenmiştir. Deneysel ve teorik olarak bulunan foton tesir kesitleri kullanılarak efektif atom numaralarına ulaşılmıştır. Hem tesir kesitlerinin hem de efektif atom numarasının enerjiye bağlı değişimleri incelenmiştir. Sonuçta alaşım malzemeleri için efektif atom numarasının enerjiye bağlı büyük değişim göstermediği, diğer malzemelerde ise düşük enerjilerde değişim olduğu anlaşılmıştır.

Bhandal ve Singh (1993), aralarında zırh malzemesi olarak kullanılan beton ve tıbbi malzemelerin de bulunduğu 8 farklı malzeme için efektif atom numarasının enerjiye bağlı değişimini incelemişlerdir. Çalışmada yüksek atom numaralı elementlerden oluşan malzemelerde, düşük foton enerjilerinde büyük efektif atom numaralarına ulaşılmıştır.

Mudahar ve Sahota (1988) tarafından, 12 farklı toprak için 10-5000 keV enerji aralığında efektif atom numaraları bulunmuştur. Toprak birçok elementten meydana gelen bir karışımdır. Söz konusu çalışmada efektif atom numarasının enerjiye bağlı değişimi incelendiğinde şu sonuçlara varılmıştır: 10-20 keV arasında toprakların efektif atom numaralarında artış görülmüştür; 40keV'e kadar değişim olmamıştır; 40 keV'den 500 keV'e kadar efektif atom numarası ani bir düşme göstermiştir. 1500 keV enerjiye doğru efektif atom numarası yavaş bir azalma eğilimindedir ve 1500-5000 keV arasında yavaş bir artış gözlenmiştir.

Kumar ve diğ. (1996) tarafından yapılan çalışmada çeşitli kil numuneleri için efektif atom numarasının enerjiye bağlı değişimi incelenmiştir. Kil, toprağa benzer bileşenlere sahiptir ve efektif atom numarasının enerjiye bağlı değişimi de toprağına benzer şekilde olmuştur. 14 farklı kil tipi için 10 keV-10 MeV enerji aralığında efektif atom numaraları hesaplanarak bulunmuştur. Çalışmada ayrıca karışımı meydana getiren elementlerin atom numaralarının bu değişimde rol oynadığı vurgulanmaktadır.

3.2 Efektif Atom Numarasının Saptanması

Efektif atom numarası, foton zayıflatma katsayısı ve tesir kesiti bilgileri kullanılarak bulunmaktadır. Benzer formülasyonlarla karışım ve bileşikler için söz konusu büyüklükler elde edilmektedir.

Bir element için toplam atomik tesir kesiti

$$\sigma_T = (\mu / \rho) \frac{A}{N_A} \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada A kütle numarasını, N_A Avogadro sayısını vermektedir.

Eğer malzeme bir bileşik ise, toplam tesir kesiti aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir, Singh (1995).

$$\sigma_{Tb} = \frac{(\mu / \rho)_{bilesik}}{N_A} \sum_i n_i A_i \quad (3.2)$$

Bu denklemde n_i bileşikteki i atomunun sayısını ve A_i i atomunun kütle numarasını belirtmektedir. Bileşiğe ait toplam tesir kesiti, σ_{Tb} , efektif atom numarası ile ilgilidir.

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i n_i Z_i \sigma_{Tb}}{\sum_i n_i \sigma_{Tb}} \quad (3.3)$$

Eğer malzeme toprak gibi çok sayıda elementten oluşan bir karışım halinde ise, elementlerin karışım içerisindeki yüzdeleri dikkate alınır. Bir karışım için toplam foton tesir kesiti, σ_{Tk} ,

$$\sigma_{Tk} = \sum_{i=1}^N w_i \sigma_i \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada N element sayısını, w_i i . elementin karışımdaki ağırlıksal yüzdesini ve σ_i i . elementin atomik tesir kesitini vermektedir. Doğal olarak tüm elementlere ait ağırlıksal yüzdelerin toplamı,

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (3.5)$$

şeklindedir.

Bir karışım için toplam foton tesir kesiti

$$\sigma_{Tk} = \frac{(\mu/\rho)_{karisim}}{N_A \sum_{i=1}^N w_i / A_i} \quad (3.6)$$

şeklinde de bulunabilir. Murty (2000), El-Kateb (2000), Bhandal (1993), Kumar (1996). Literatürde genellikle toplam foton tesir kesiti denklem (3.6) ile bulunmaktadır. Karışıma ait kütleli zayıflatma katsayısı, (μ/ρ) , teorik olarak hesaplanırsa denklem (3.6) teorik tesir kesiti değerini vermektedir. Eğer dar demet geometrisi kullanılarak gama ışını zayıflatma tekniği ile kütleli zayıflatma katsayısı bulunmuşsa, denklem (3.6) deneysel tesir kesiti değerini vermektedir.

Efektif atom numarası aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Wood, 1987).

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i w_i Z_i / A_i}{\sum_i w_i / A_i} \quad (3.7)$$

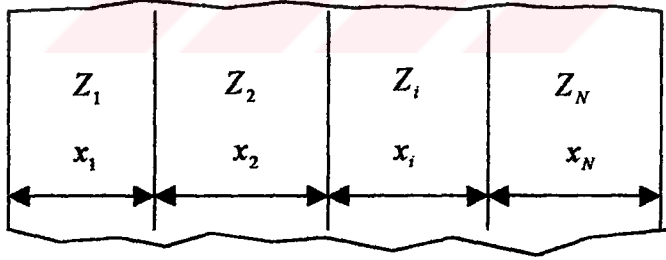
Burada Z_i i . atoma ait atom numarası vermektedir. Ancak efektif atom numarası ile ilgili çalışmalarda, genellikle efektif atom numarası grafiksel olarak elde edilmektedir. Bunun için karışımı oluşturan her elemente ait foton tesir kesiti ve elementlerin atom numarası arasındaki eğriler çizdirilmektedir. Bu eğriler kullanılarak, hesaplanan ya da deneysel olarak bulunan toplam tesir kesit değerleri

yardımları ile efektif atom numarasına ulaşılmaktadır, **Mudahar (1998)** , **El- Kateb (2000)**, **Kumar (1996)**, **Murty (2000)**.

Radyasyon zırhlamasında bazen çok katmanlı zırhlama tercih edilebilir. Bu durumda farklı malzelerle oluşturulacak zırh katmanları için ortak bir atom numarası bulunması ortaya çıkmıştır. Ortak bir atom numarası tespiti zırh malzemesinde homojenleşmeyi sağlamak ve doğru buildup hesaplamaları yapmak amacına yöneliktir, **Wood (1987)**. Bu durumda Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir katmanlı zırh için atom numarası aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i \mu_i x_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i x_i} \quad (3.8)$$

Burada N katman sayısını, Z_i i. katmanın atom numarasını, μ_i i. katmana ait lineer zayıflama katsayısını ve x_i i. katmanın kalınlığını ve $\sum_{i=1}^N \mu_i x_i$ ifadesi zayıflama kalınlığını göstermektedir.



Şekil 3.1 Çok katmanlı zırh

Denklem (3.8) ile bulunan $\bar{Z}$, bazı yazarlar tarafından efektif atom numarası olarak da tanımlanmaktadır. Ancak bu büyüklük daha ziyade çok katmanlı zırh için ortalama atom numarası değerini vermektedir, **Wood (1987)**.

BÖLÜM 4

DENEY KOŞULLARININ TANITIMI

4.1 Deney Düzenine Ait Bilgiler

Toprağın bir zırh malzemesi olarak özelliklerinin belirlenmesinin amaçlandığı bu tez çalışmasında, dar demet geometrisine sahip bir gama ışını zayıflatma düzeneği kullanılmıştır. İ.T.Ü. NEE Nükleer Uygulamalar Anabilim Dalı Radyoizotop Laboratuvarında bulunan deney düzeneği aşağıdaki elemanlardan oluşmuştur:

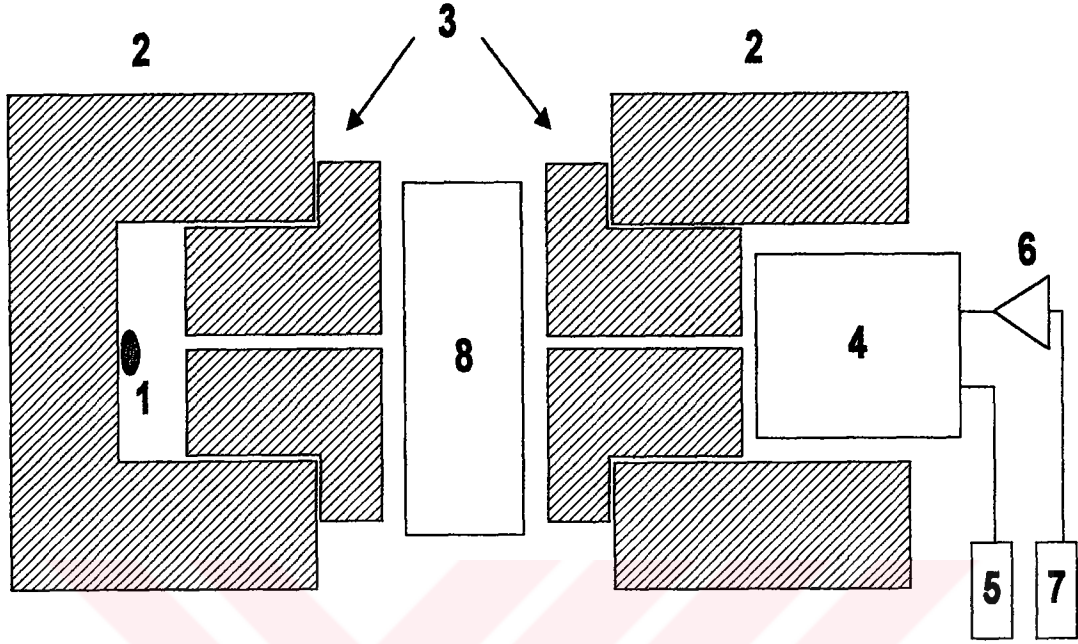
- NaI (Tl) sintilasyon dedektörü
- Kolimatörler
- Çok kanallı analizör
- Gama radyasyon kaynakları

Şekil 4.1' de blok şeması verilen deney düzeneğinde dar demet geometrisi, kaynak ve dedektörün yerleştirildiği kolimatörler vasıtasıyla elde edilmektedir. Bu kolimatör düzeni, daha önce İ.T.Ü. Lisansüstü tezleri destekleme programı tarafından desteklenen 1116 no'lu proje ile kurulmuştur.

4.1.1 Gama Radyasyon Kaynakları

Endüstride ve laboratuvar ortamlarında en yaygın olarak kullanılan gama kaynakları ^{137}Cs ve ^{60}Co 'dır. Bu nedenle, toprak bir gama zırhlama malzemesi olarak incelenirken, Tablo 4.1'de özellikleri verilen bu iki kaynak seçilmiştir.

Çalışmalarda kullanılan kaynaklar, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nden temin edilmiştir. Tablo 4.1'deki aktivite değerleri, bu merkezden verilen değerler referans alınarak ve deneylerin gerçekleştirildiği süre dikkate alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1 Ölçüm sisteminin blok şeması

1. Radyasyon kaynağı
2. Kolimatörler
3. Dar demet tıkaçları
4. NaI (TI) dedektörü
5. Yüksek voltaj kaynağı
6. Yükseltici
7. Çok kanallı analizör
8. Toprak numune

Tablo 4.1 Gama kaynaklarının özellikleri

Kaynak	Yarı Ömür	Enerji (keV)	Aktivite (μCi)
¹³⁷ Cs	30 yıl	662 (%89.9)	11.13
⁶⁰ Co	5.27 yıl	1173 (%100) 1332 (%100)	47.38

4.1.2 Radyasyon Ölçüm Sistemi

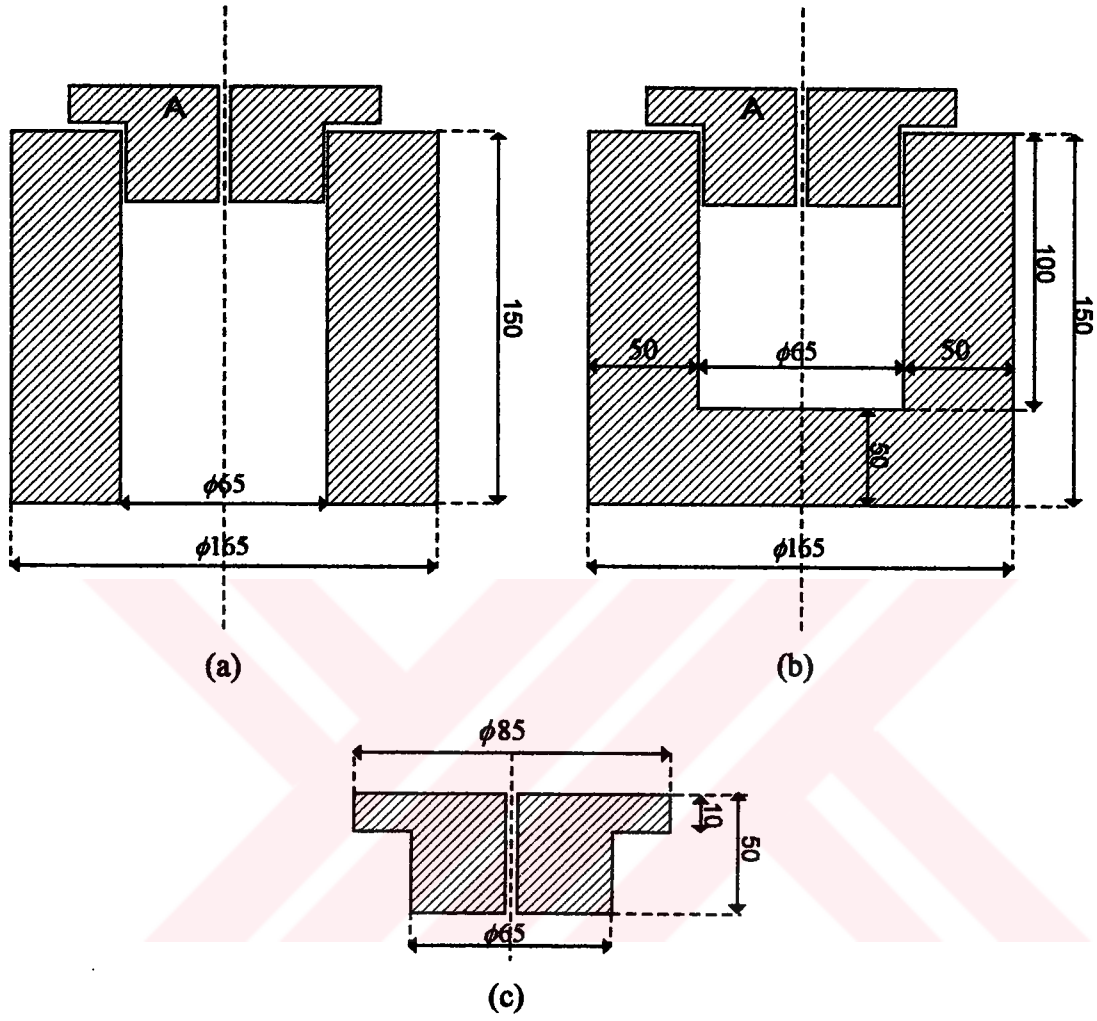
Çalışmada, gama verimi yüksek olan NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ve 256 kanala sahip bir çok kanallı analizör ölçüm sistemini oluşturmaktadır. Çok kanallı analizörde oluşabilecek sistematik hataları minimuma indirmek amacı ile, her çalışmanın başında ve gerekirse ara kademelerde standart kaynaklar ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co ile kalibrasyon kanal başına 10 keV enerji gelmek üzere gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sisteminin yer aldığı deney düzeneğine ait bir fotoğraf Şekil 4.2’de verilmiştir.

4.2 Kolimatörler

Bu çalışmada dar demet geometrisi, kaynak ve dedektörün yerleştirildiği kurşun kolimatörler sayesinde elde edilmektedir. Şekil 4.3’ de kolimatör grubu verilmiştir. Şekil 4.3c’ de yer alan dar demet tıkaçı yine kurşundan yapılmıştır ve çeşitli çaplarda dar demet elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Kolimatör çapı 5mm seçilmiştir. Kaynak tarafındaki kolimatörün hareketli olması kaynak-dedektör mesafesinin istenildiği gibi ayarlanmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.2 Deney düzeneği ve ölçüm sistemi



Şekil 4.3 Kolimatörlerin karakteristikleri

- a. Dedektör kolimatörü
- b. Kaynak kolimatörü
- c. Dar demet tıkaçı

4.3 Toprak Numuneler

Deneyleerde kullanılan toprak numuneler Türkiye'nin 7 farklı bölgesine aittir. Yüzeyden 15 veya 25 cm derinliğe kadar olan toprak kitlesinin toplanması ile elde edilen numunelerin ortalama tane boyutları sırası ile 0.85, 1.4 ve 2 mm'dir. Toprağın kimyasal yapısının diğer toprak parametrelerini nasıl etkilediğinin incelenmesi için, mümkün olduğunca kimyasal yapı bileşenleri farklı yüzdelere sahip topraklar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan toprakların kimyasal yapısı Tablo 4.2'de ve söz konusu toprakların yoğunlukları Tablo 4.3'de verilmiştir. Toprak numunelerin kimyasal analizi Lüleburgaz Set Çimento Fabrikası'nın laboratuvarlarında XRF tekniği ile yapılmıştır (Akbal, 1999).

Tablo 4.2 Topraklardaki elementlerin ağırlıksal yüzdeleri

Alındığı yöre	Element (%)										
	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	K	Na	P	F	O
Edirne	30.92	6.58	3.31	1.42	0.77	0.07	0.71	4.02	6.01	3.68	44.62
Kütahya	19.24	4.44	2.55	14.95	0.97	0.11	0.59	0.13	13.12	8.04	34.75
Çanakkale	28.97	5.85	2.46	5.29	0.83	0.11	0.88	0.60	5.62	3.44	44.32
Tokat	24.99	8.91	6.74	1.46	2.17	0.08	1.06	0.59	4.18	2.56	43.88
Ankara	16.01	3.62	16.86	8.71	0.60	0.27	0.55	0.42	10.08	6.18	34.45
Batman	27.18	6.97	4.01	3.90	2.26	0.09	0.90	0.55	5.98	3.66	44.23
Trabzon	19.51	12.93	6.08	0.85	1.13	0.06	0.38	0.07	10.95	6.71	38.14

Tablo 4.3 Toprakların nominal yoğunlukları

Alındığı yöre	Edirne	Kütahya	Ç.kale	Tokat	Ankara	Batman	Trabzon
Yoğunluk (g/cm ³)	1.752	1.364	1.64	1.716	1.725	1.906	1.444

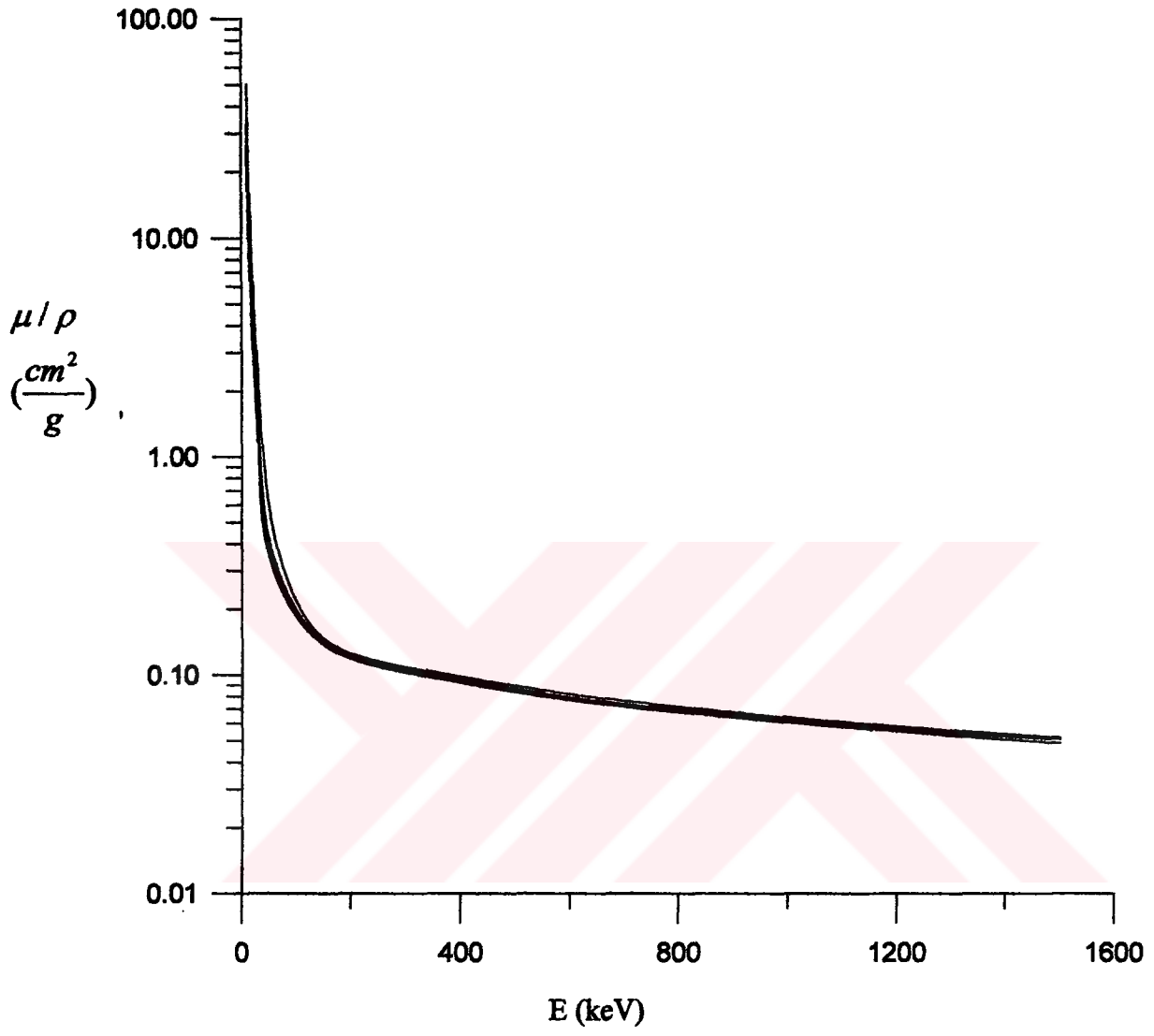
BÖLÜM 5

TOPRAĞIN GAMA RADYASYONU ZIRHLAMA MALZEMESİ OLARAK İNCELENMESİ

5.1 Toprak Numunelerin Foton Zayıflatma Katsayılarının ve Efektif Atom Numaralarının Hesaplanması

- **Kütlesel Zayıflatma Katsayısı**

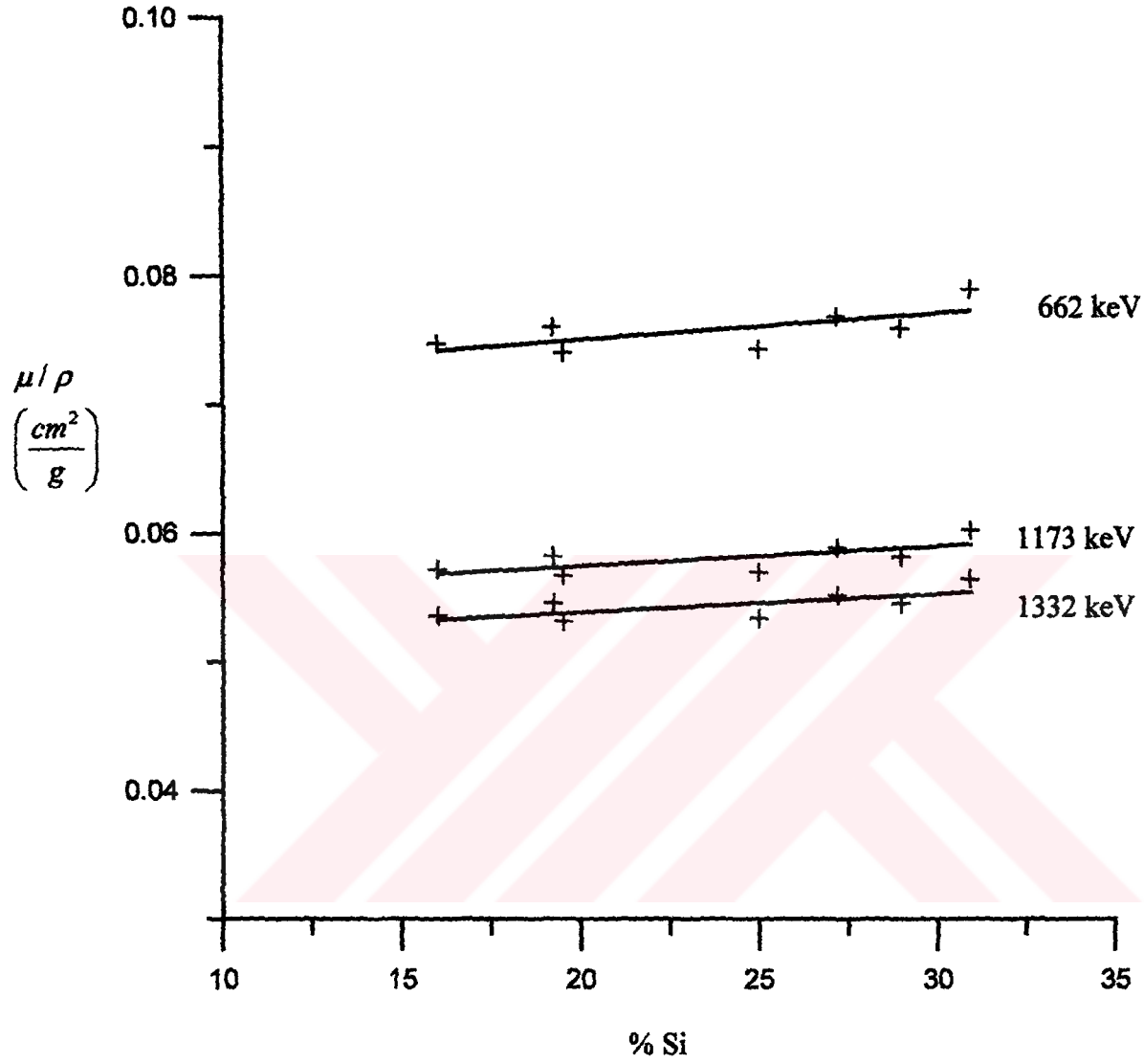
Bu tez çalışmasında, kimyasal yapısı bilinen toprak numunelere ait çeşitli parametreler teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Toprak numunelerin kütlesel zayıflatma katsayıları Hubbell (1982) tablolarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Toprak numunelerin içerdiği elementlere ait kütlesel zayıflatma katsayıları söz konusu tablodan 0.01–1.5 MeV enerji aralığında seçilmiştir. Denklem (2.7) kullanılarak topraklar için toplam kütlesel zayıflatma katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 5.1 kütlesel zayıflatma katsayısının foton enerjisine bağlı değişimini göstermektedir. Tablo 5.1’de de hesaplamada kullanılan foton enerjilerine karşılık toplam kütlesel zayıflatma katsayıları verilmiştir. Şekil 5.1’den görüleceği gibi düşük enerjilerde toplam kütlesel zayıflatma katsayısının değişimi büyüktür. Yaklaşık 200 keV’den daha büyük enerjilerde kütlesel zayıflatma katsayısının değişimi daha yavaş olmaktadır. Bu tez çalışmasında çalışılan foton enerjileri (662, 1173, 1332 keV) orta enerji bölgesi olarak anılan 300 keV-3 MeV aralığına düşmektedir ve bu bölgede kütlesel zayıflatma katsayısının değişimi düşük enerjilere göre daha yavaştır. Şekil 5.2’de tez çalışmasında kullanılan foton enerjileri için toprakların kütlesel zayıflatma katsayıları verilmiştir. Toprak numuneler bu grafikte içerdikleri Si yüzdesi ile temsil edilmiştir. Şekil 5.2’den görüleceği gibi, tezde çalışılan 662, 1173 ve 1332 keV enerjiler için kütlesel zayıflatma katsayısı tüm topraklar için birbirine yakın değerler almaktadır. Söz konusu enerjilerde toprağı oluşturan diğer elementler için de Şekil 5.2’deki eğrinin karakteri aynı kalmaktadır.



Şekil 5.1 Toprakların toplam kütlelesel zayıflatma katsayıları

Tablo 5.1 Toprakların toplam kütlelesel zayıflatma katsayıları

Enerji (keV)	μ / ρ (cm ² /g)						
	Edirne	Kütahya	Ç.kale	Tokat	Ankara	Trabzon	Batman
10	25.583	34.263	26.332	29.220	49.991	27.810	28.574
15	8.003	10.793	8.242	9.286	16.220	8.751	9.046
20	3.532	4.742	3.632	4.110	7.225	3.863	3.995
30	1.183	1.548	1.208	1.366	2.34	1.285	1.199
60	0.294	0.335	0.292	0.311	0.438	0.304	0.305
150	0.144	0.143	0.140	0.138	0.147	0.142	0.138
300	0.109	0.106	0.105	0.103	0.105	0.107	0.103
600	0.082	0.079	0.079	0.077	0.078	0.080	0.077
1000	0.064	0.062	0.062	0.061	0.061	0.063	0.061
1500	0.052	0.051	0.051	0.049	0.050	0.051	0.049



Şekil 5.2 Çalışılan enerjiler için toprakların kütesel zayıflatma katsayıları

- **Foton Tesir Kesiti**

Toprakları oluşturan elementlere ait bazı özellikler Tablo 5.2’de verilmiştir. Her elemente ait, çalışılan enerjilerdeki, foton tesir kesitleri denklem (2.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 5.3’de görülmektedir. Çalışmada kullanılan topraklara ait toplam foton tesir kesitleri ise denklem (3.6) kullanılarak bulunmuştur. Tablo 5.4’de topraklara ait toplam foton tesir kesitleri verilmiştir.

Tablo 5.2 Toprakları oluşturan elementlerin bazı özellikleri. (Almenas, 1992)

Element	Z	A	ρ (g/cm ³)
Si	14	28.09	2.42
Al	13	26.98	2.699
Fe	26	55.85	7.86
Ca	20	40.08	1.55
Mg	12	24.32	1.74
S	16	32.066	2.07
K	19	39.1	0.87
Na	11	22.991	0.971
P	15	30.975	1.82
F	9	19.0	0.0017
O	8	16.0	0.0014

Tablo 5.3 Topraklarda bulunan elementlere ait toplam foton tesir kesitleri

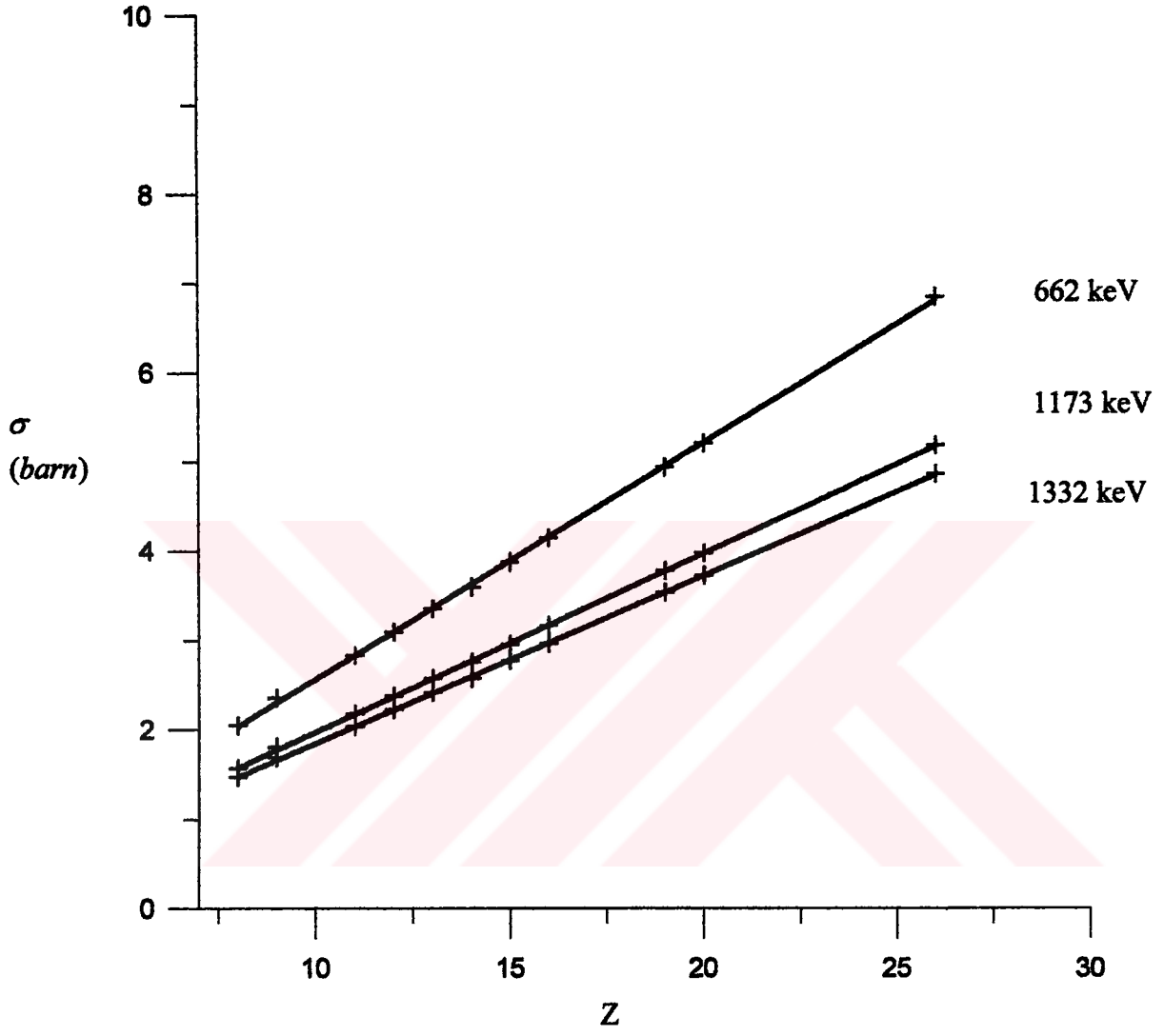
Element	Z	662 keV σ_i (barn)	1173 keV σ_i (barn)	1332 keV σ_i (barn)
Si	14	3.60	2.76	2.58
Al	13	3.36	2.58	2.42
Fe	26	6.85	5.19	4.87
Ca	20	5.21	3.98	3.73
Mg	12	3.10	2.38	2.23
S	16	4.15	3.17	2.97
K	19	4.94	3.78	3.54
Na	11	2.84	2.18	2.04
P	15	3.88	2.96	2.78
F	9	2.36	1.81	1.69
O	8	2.05	1.57	1.47

Tablo 5.4 Topraklara ait toplam foton tesir kesitleri

Toprak	662 keV σ_t (barn)	1173 keV σ_t (barn)	1332 keV σ_t (barn)
Edirne	2.69	2.06	1.93
Kütahya	2.9	2.22	2.08
Çanakkale	2.71	2.08	1.95
Tokat	2.72	2.08	1.95
Ankara	3.03	2.32	2.17
Batman	2.72	2.08	1.95
Trabzon	2.76	2.11	1.98

- **Efektif Atom Numarası**

Topraklara ait efektif atom numarası bilgileri, toprakta bulunan elementlerin foton tesir kesitleri ile atom numaraları arasında çizilen eğrilerden elde edilmiştir. Tablo 5.3 kullanılarak çizilen eğriler Şekil 5.3’ te görülmektedir. Tablo 5.4 ‘te yer alan topraklara ait toplam foton tesir kesitleri kullanılarak, Şekil 5.3 yardımı ile topraklara ait efektif atom numaraları hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 5.5’ te verilmiştir. Ayrıca toprakların içerdikleri elementlere göre efektif atom numaralarının değişimi Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6’da gösterilmiştir.

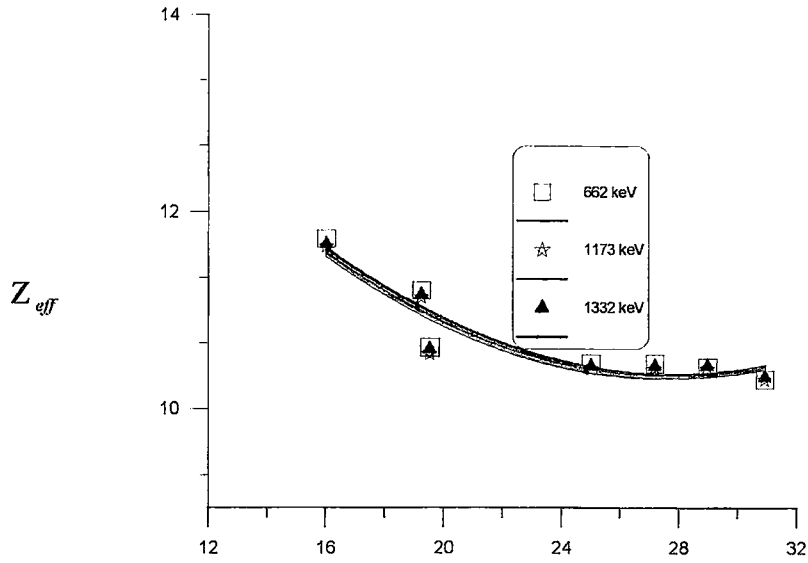


Şekil 5.3 Topraklardaki elementlere ait σ -Z eğrileri.

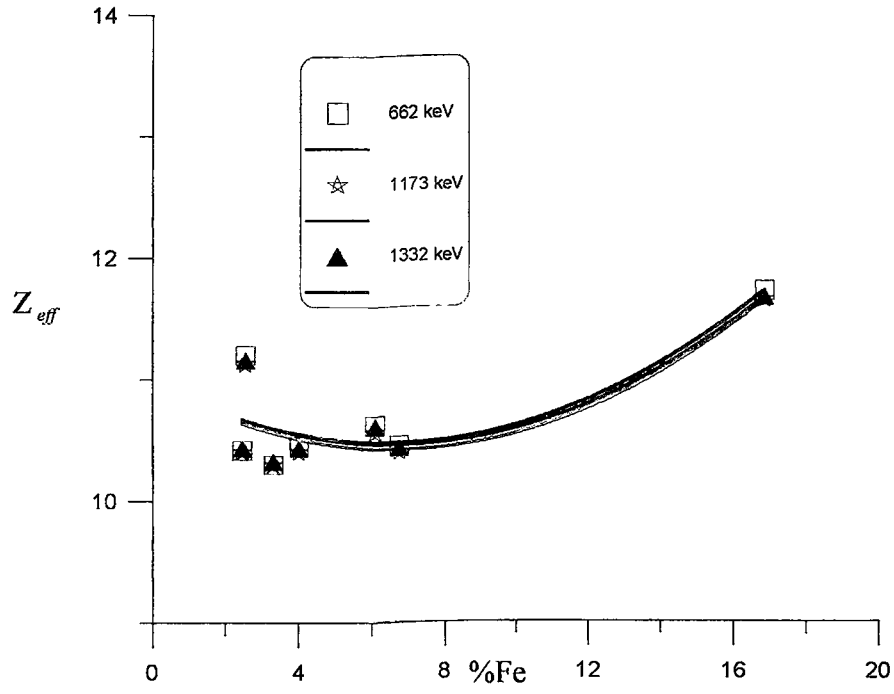
Tablo 5.5 Topraklara ait efektif atom numaraları

Toprak	Z_{eff}		
	662 keV	1173 keV	1332 keV
Edirne	10.30	10.30	10.33
Kütahya	11.20	11.13	11.16
Çanakkale	10.42	10.41	10.44
Tokat	10.46	10.41	10.44
Ankara	11.72	11.65	11.67
Batman	10.46	10.41	10.44
Trabzon	10.62	10.56	10.61

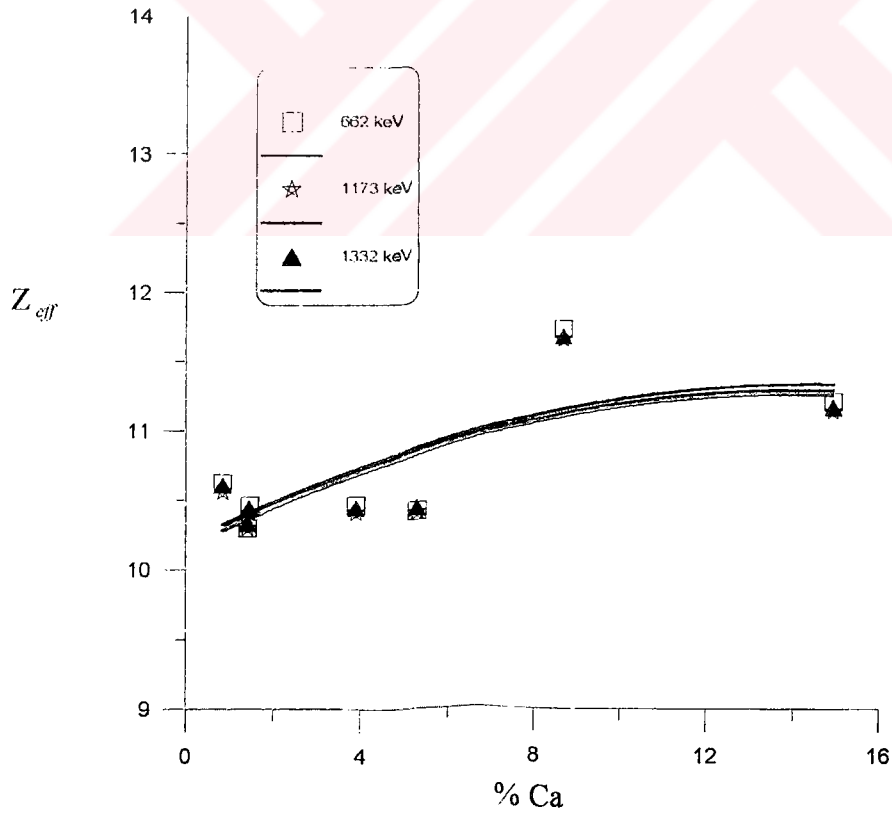
Tablo 5.5'den görüleceği gibi tüm topraklar için söz konusu enerjilerdeki efektif atom numaraları birbirine çok yakındır. Zira Bölüm 3'te de bahsedildiği gibi orta enerji bölgesinde toprak numuneler için efektif atom numarası büyük değişimler göstermemektedir.



Şekil 5.4 Toprakların efektif atom numaralarının Si yüzdesine göre değişimi.



Şekil 5.5 Toprakların efektif atom numaralarının Fe yüzdesine göre değişimi.



Şekil 5.6 Toprakların efektif atom numaralarının Ca yüzdesine göre değişimi.

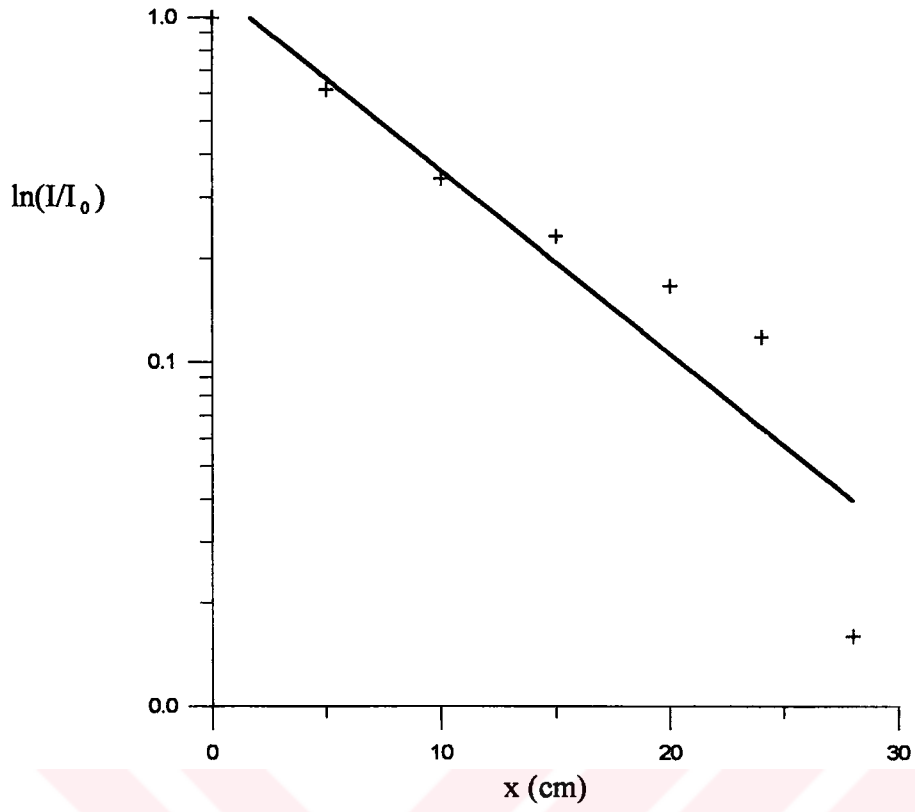
Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6'da efektif atom numarasının en büyük olduğu topraklar Ankara ve Kütahya topraklarıdır. Tablo 5.2'den görüleceği gibi toprakların yapısında yer alan elementler içerisinde Fe ($Z=26$) ve Ca ($Z=20$) en büyük atom numarasına sahiptirler. Toprağın ana elementi sayılan Si atom numarasının küçük olması nedeni ile, en yüksek Si içeriğine sahip toprağın bile efektif atom numarası büyük olmamaktadır. Sonuç olarak, Bölüm 3'te de bahsedildiği gibi, efektif atom numarasını toprağı oluşturan elementlerin ağırlıksal yüzdeleri ve atom numaraları etkilemektedir.

5.2 Deneysel Çalışmalar

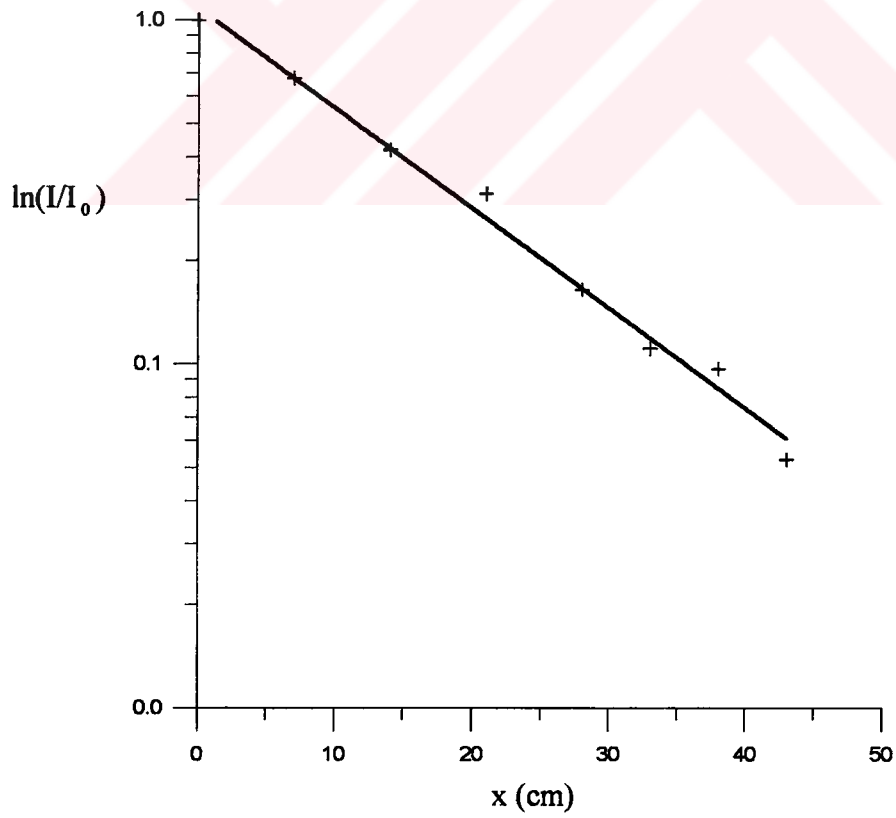
Toprağın zırh malzemesi olarak kullanımını incelemek üzere yapılan deneysel çalışmalarda, toprak numuneler kare kesitli perspex kaplar içerisine konularak kaynak dedektör arasına yerleştirilmiş ve foton zayıflatma ölçümleri yapılmıştır. Çeşitli kalınlıklarda toprak kitleleri elde etmek amacı ile kullanılan perspex kapların kesitleri 3x3, 4x4, 5x5 ve 7x7 cm şeklindedir. Tüm deneylerde her sayım 3 kez alınıp ortalama değer hesaplanmıştır. Sayım süreleri kaynakların aktivitelerine ve kaynak-dedektör mesafesine bağlı olarak 100-300 sn arasında değişmektedir. Kaynak-dedektör mesafesi deneyin amacına göre farklı seçilmiştir. Deneylerde kaynak sayımı olarak boş kap sayımları alınmıştır. Bölüm 5.1'den hatırlanacağı gibi 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde toprakların kütleli zayıflatma katsayıları içerdikleri elementlere bağlı olarak büyük bir değişim göstermiyorlar. Bu nedenle deneysel çalışmalarda bazen rastgele seçilmiş bir veya daha fazla toprak kullanılmıştır.

5.2.1 Zırh Kalınlığının Bulunması

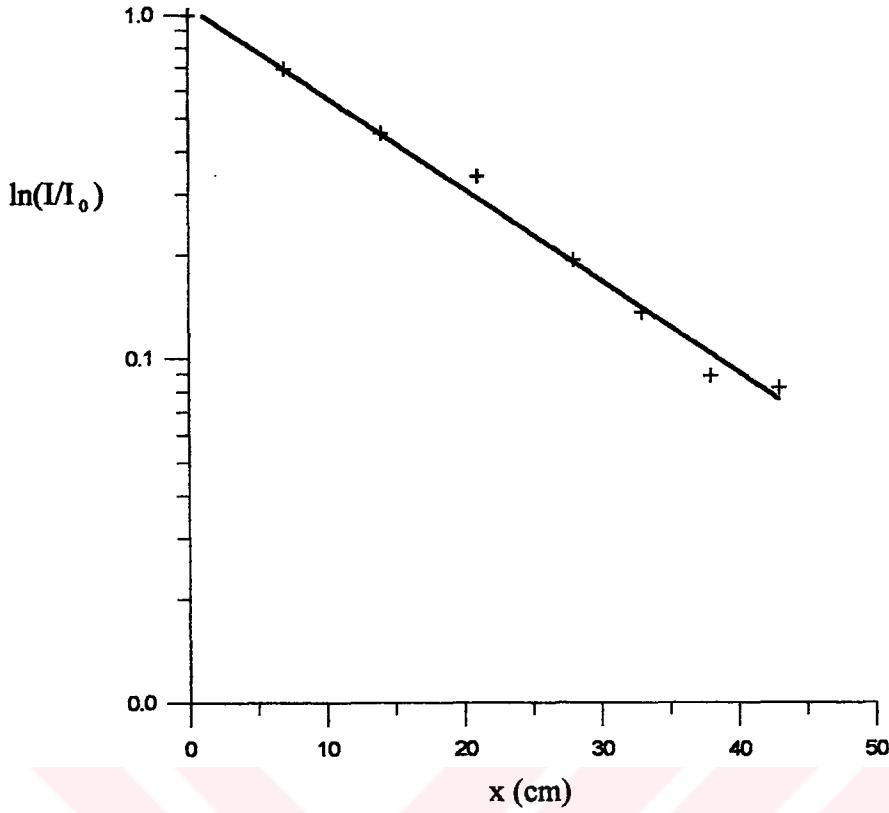
Deneysel çalışmalarda öncelikle, kullanılan foton enerjileri için zırh olabilecek toprak kalınlığının bulunması hedeflenmiştir. Bu nedenle zırh kalınlığı bulunurken bir toprak ile (Çanakkale toprağı) çalışılmıştır. Zırhlama kalınlığı bulunurken toprak perspex kaplara konmuş ve kaynak-dedektör arasına kaplar ard arda yerleştirilmiştir. 662 keV için ölçüm yapılan ilk toprak kalınlığını 5x5 cm kesitli kaptaki toprak kitlesi oluşturmaktadır. 1173 ve 1332 keV foton enerjileri için de ölçüm yapılan ilk toprak kalınlığını 7x7 cm kesitli toprak dolu kap oluşturmaktadır. Bu deneylerde 0.85 mm tane büyüklüğüne sahip toprak



Şekil 5.7 662 keV enerjili fotonlar için toprak kalınlığı



Şekil 5.8 1173 keV enerjili fotonlar için toprak kalınlığı



Şekil 5.9 1332 keV enerjili fotonlar için toprak kalınlığı

kullanılmıştır. Zırh kalınlığı olarak radyasyon şiddetini 1/10'a indiren toprak kitlesini bulmak hedeflenmiştir. Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9 sırasıyla 662, 1173 ve 1332 keV enerjiler için toprak kalınlığı-bağıl radyasyon şiddeti arasındaki grafikleri göstermektedir. Şekillerden görüleceği gibi 662 keV için 22 cm, 1173 keV için 34 cm ve 1332 keV için 38 cm toprak kalınlığı radyasyonun şiddetini onda bir oranında azaltmaktadır. Ayrıca bu kalınlıklardan sonra bağıl şiddette azalma görülmemektedir.

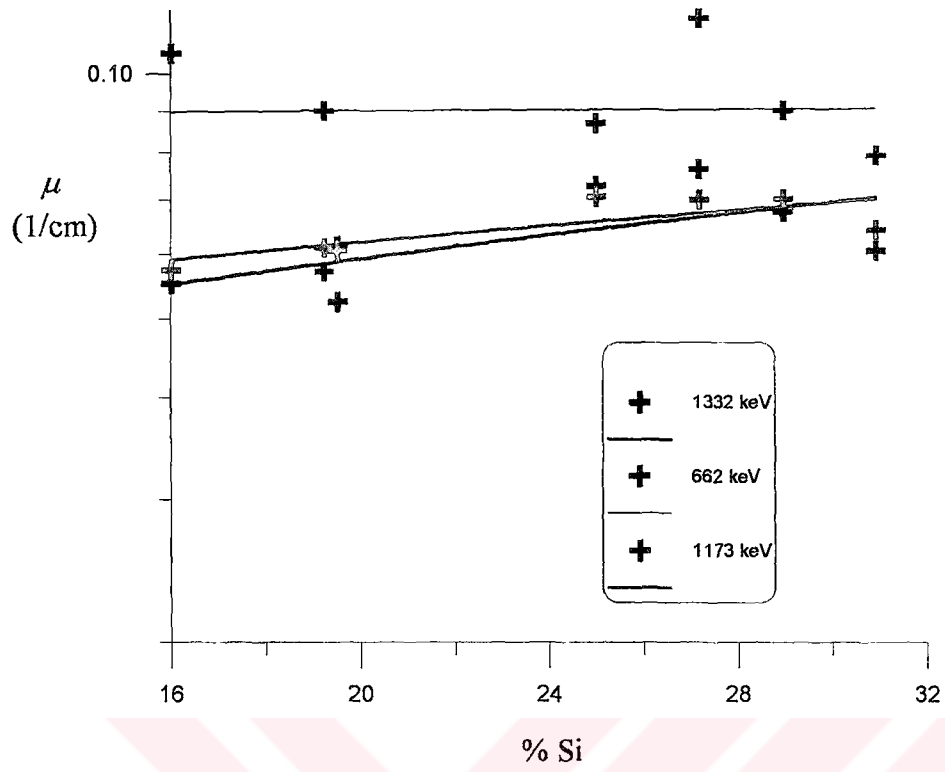
Söz konusu toprak kalınlıkları için ışınlama hızları toprak tabakasının ön yüzünde denklem (2.16) ve toprağın arka yüzünde denklem (2.17) ile hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6 Deneylerde kullanılan enerjilerdeki ışınlama hızları

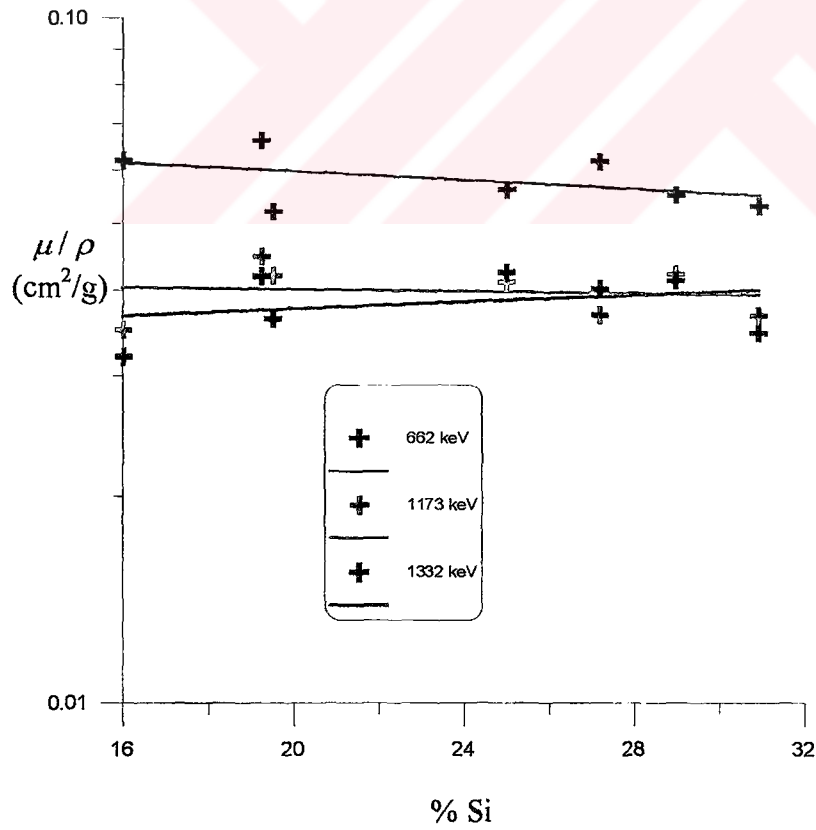
E (MeV)	$\dot{x}$ (mR/h)	$\dot{x}_z$ (mR/h)
0.662	1.023	0.203
1.173	7.718	0.818
1.332	8.765	0.89

5.2.2 Toprakların Foton Zayıflatma Parametreleri

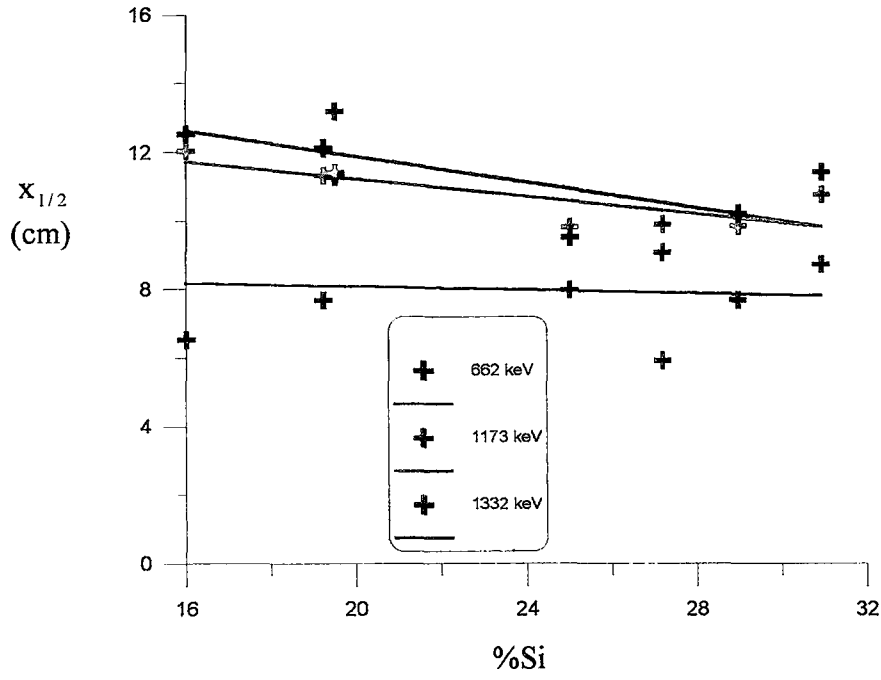
Çalışılan toprak numunelerin foton zayıflatma katsayıları, yarı kalınlık ve ortalama serbest yol gibi parametreleri deneysel olarak saptanmıştır. Bu amaçla yapılan deneylerde toprak kalınlığı her foton enerjisi için 7 cm olarak seçilmiştir. Şekil 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 sırasıyla toprakların lineer zayıflatma katsayılarını, kütleli zayıflatma katsayılarını, yarıkalınlık değerlerini ve ortalama serbest yol değerlerini vermektedir. Söz konusu şekillerde topraklar ana element olan Si yüzdesine göre temsil edilmişlerdir. Şekil 5.10 ve 5.13'den görüleceği gibi teorik beklentilerin doğrultusunda, kütleli zayıflatma katsayısının kimyasal yapıya bağlı olarak değişimi lineer zayıflatma katsayısına göre daha azdır. Şekil 5.11 ve 5.12'de verilen yarıkalınlık ve ortalama serbest yol değerleri doğal olarak 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde 662 keV'deki değerlerine göre daha yüksektir. 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjileri için yarıkalınlık ortalama olarak sırasıyla 7.95 cm, 10.73 cm ve 11.2 cm'dir. Ortalama serbest yol değerleri ise 662 keV için 11.5 cm, 1173 keV için 15.48 cm ve 1332 keV için 16 cm bulunmuştur.



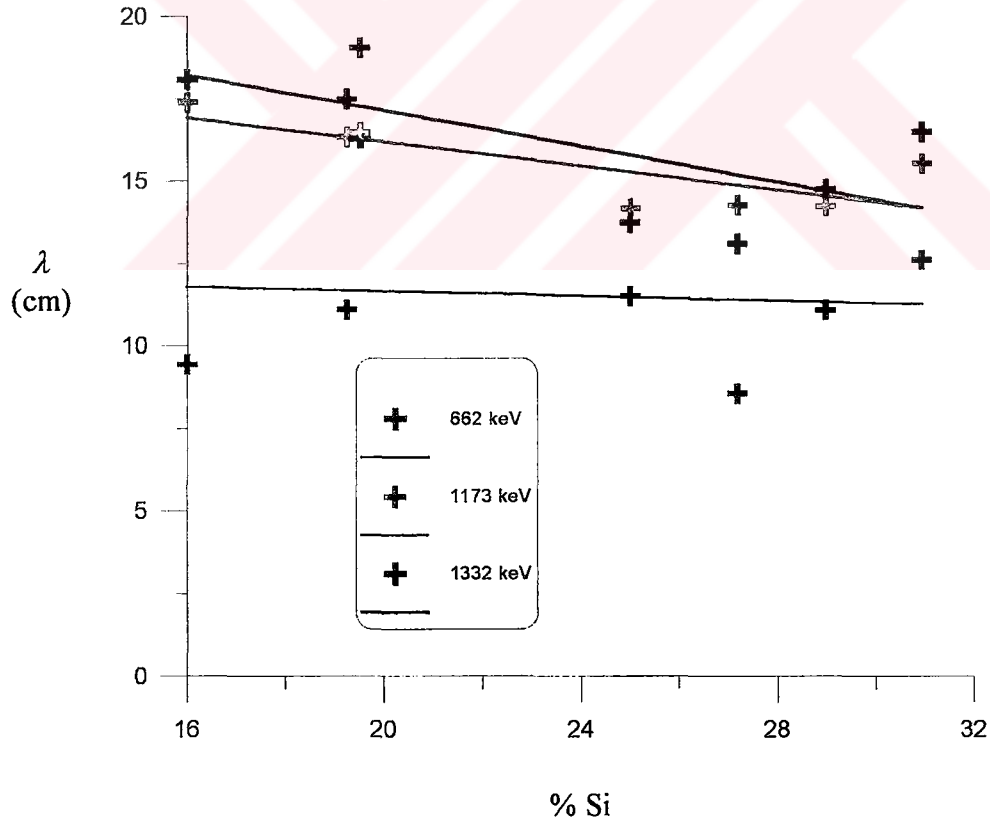
Şekil 5.10 Çalışılan toprakların lineer zayıflatma katsayıları



Şekil 5.11 Çalışılan toprakların kütleli zayıflatma katsayıları.



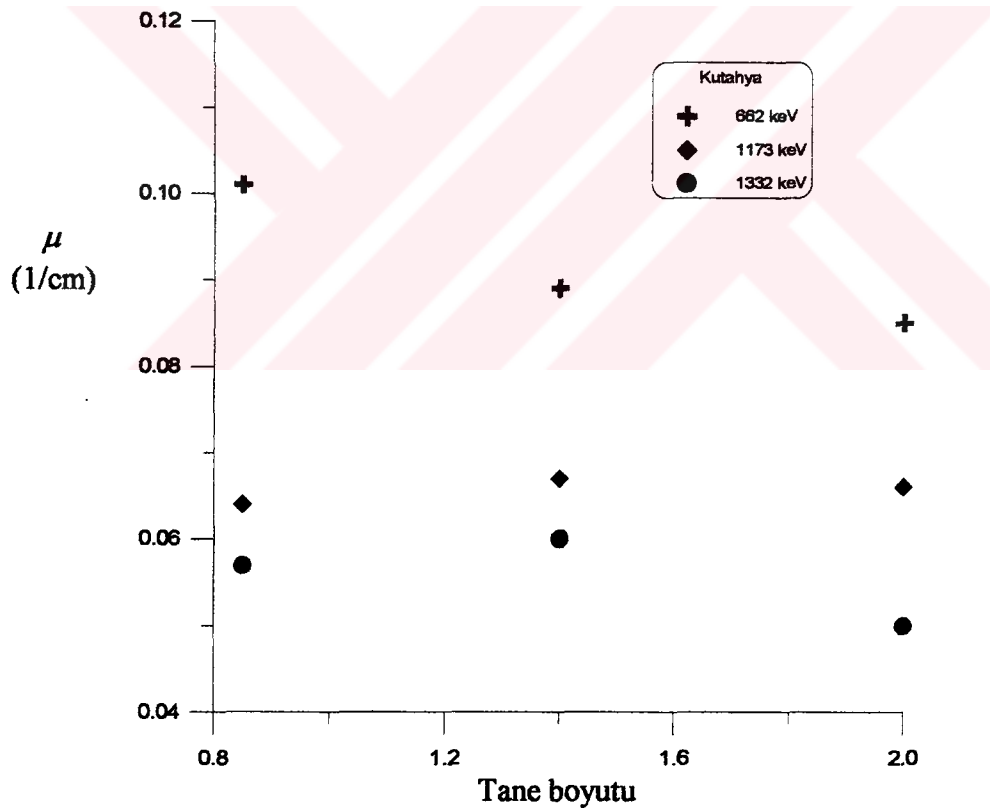
Şekil 5.12 Çalışılan toprakların yarıkalınlık değerleri.



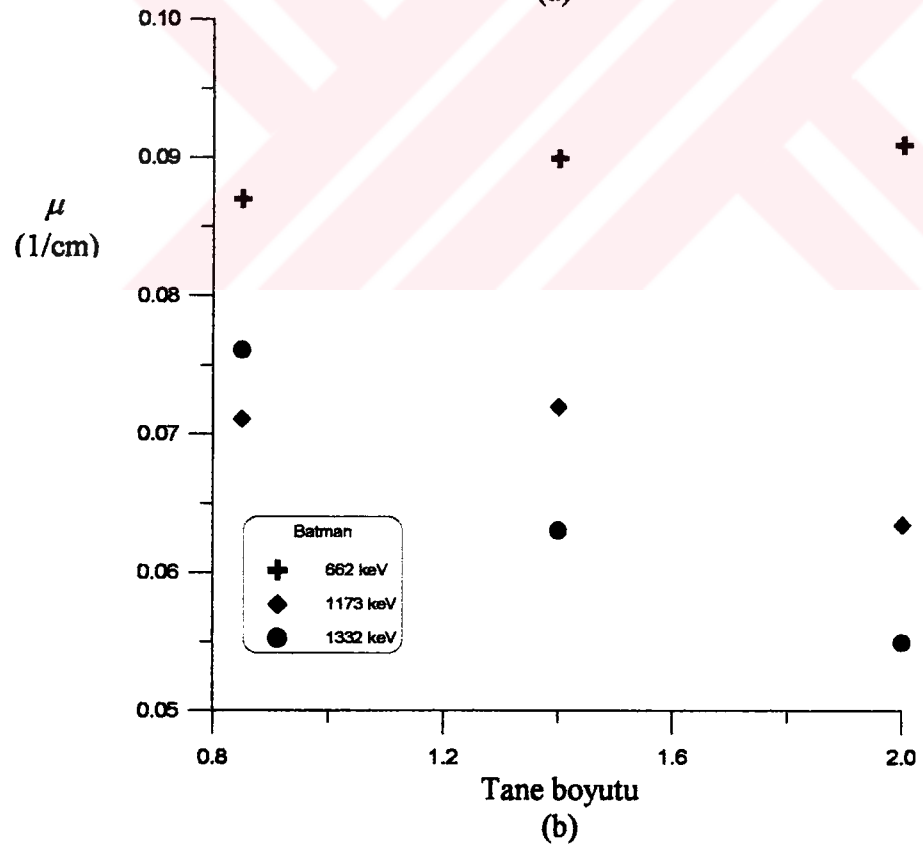
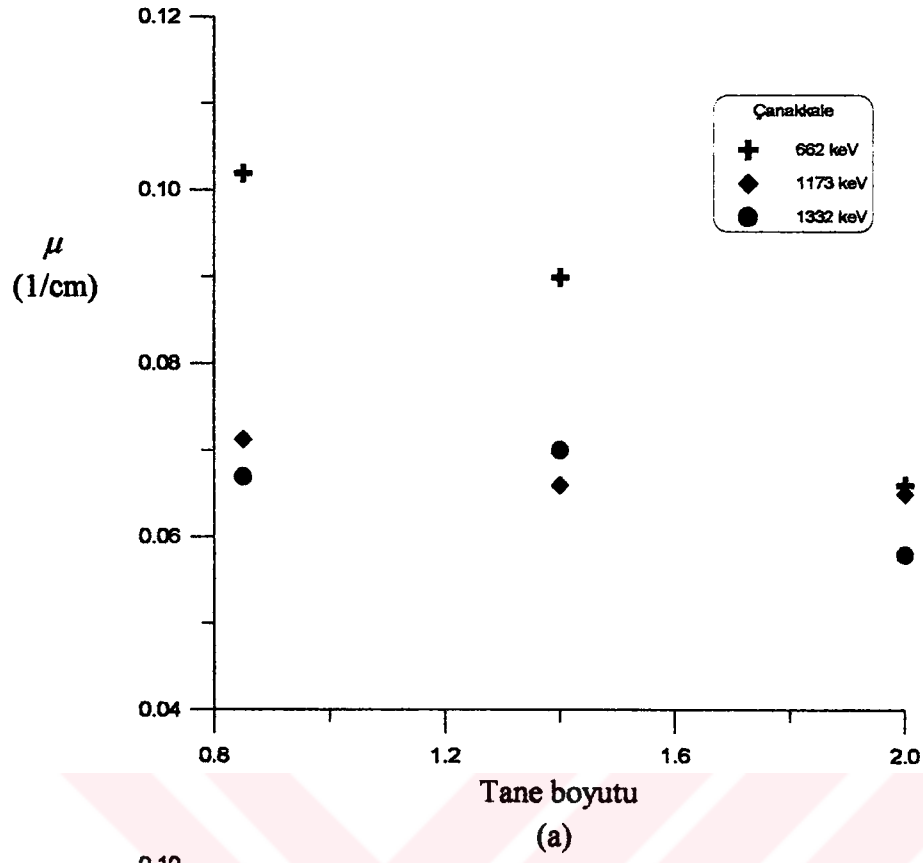
Şekil 5.13 Çalışılan toprakların ortalama serbest yol değerleri.

5.2.3 Tane Boyutu Etkisinin İncelenmesi

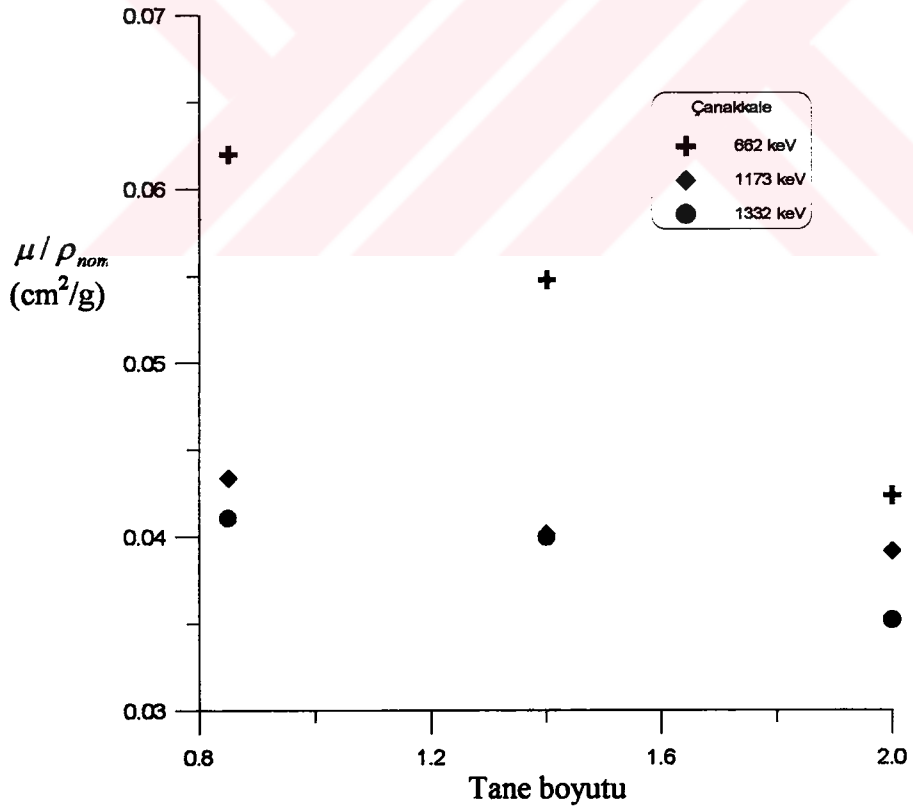
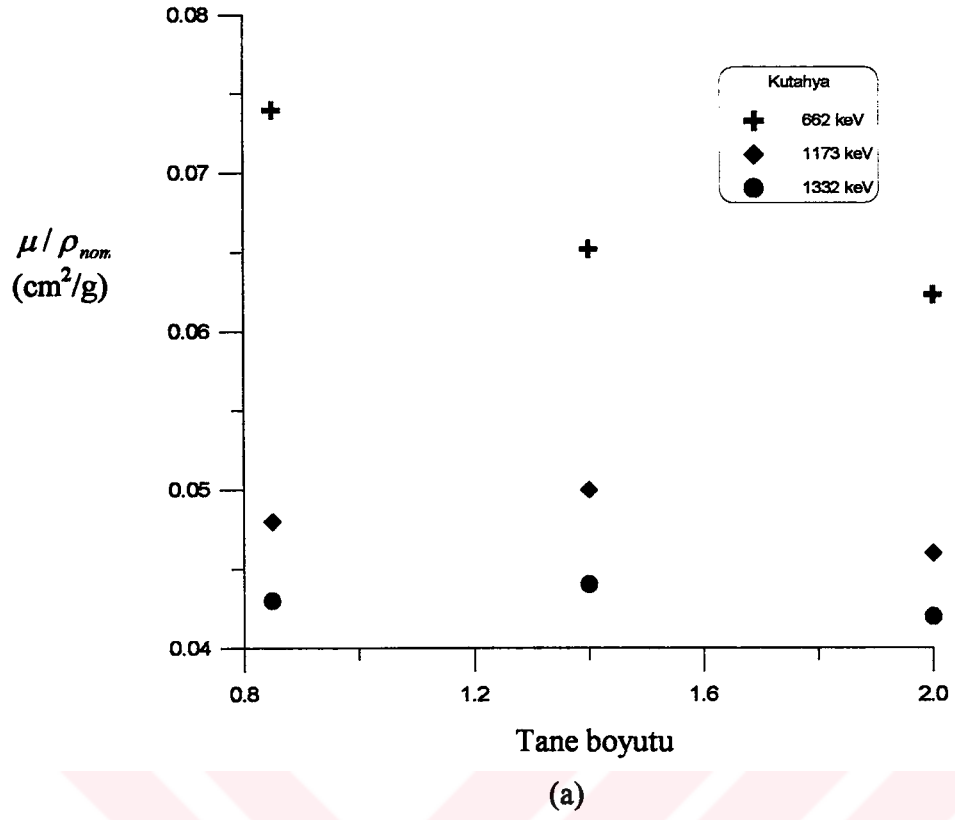
Bu bölümde toprak numunelerin tane boyutunun, çeşitli toprak parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bölüm 4'te bahsedildiği gibi topraklar 3 tane boyutuna sahiptir. Tane boyutu etkisini incelemek üzere, rastgele seçilen üç toprak (Kütahya, Çanakkale, Batman) için 7 cm kalınlığında ve 0.85, 1.4, ve 2mm tane büyüklüğündeki toprak kütlelerinde foton zayıflatma ölçümleri yapılmıştır. Çalışılan üç foton enerjisi için tane boyutunun lineer zayıflatma katsayısı, yarı kalınlık, ortalama serbest yol ve kütleli zayıflatma katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 5.14-5.19 'da verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi lineer zayıflatma katsayısı tane boyutu arttıkça azalma eğilimindedir. Bunun doğal sonucu olarak da yarı kalınlık ve ortalama serbest yol tane boyutu büyüdükçe artmaktadır. Kütleli zayıflatma katsayısının değişimi de tane boyutu arttıkça azalma eğilimindedir.



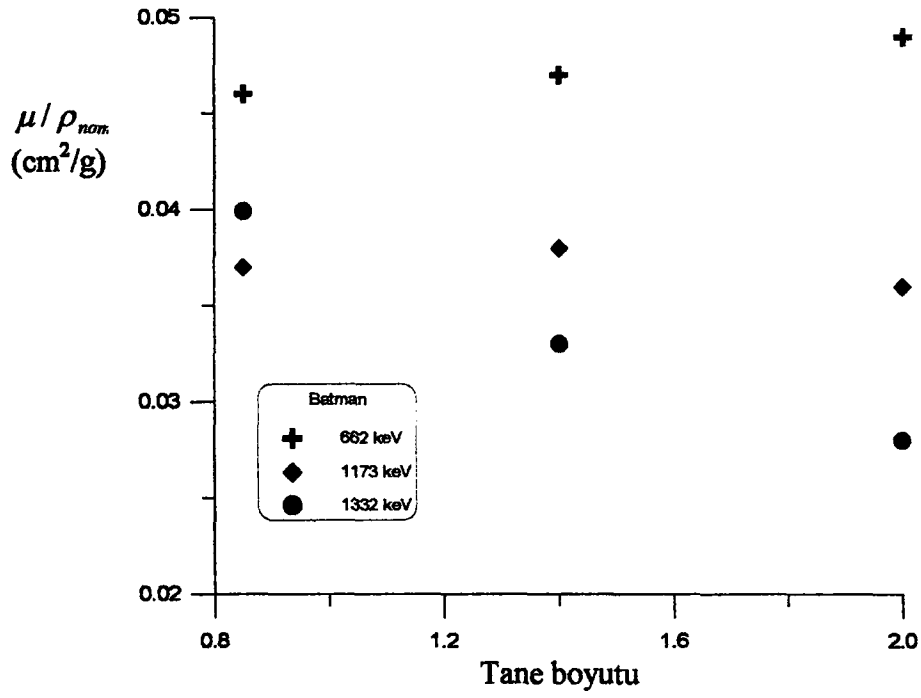
Şekil 5.14 Kütahya toprağı için lineer zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağlı değişimi



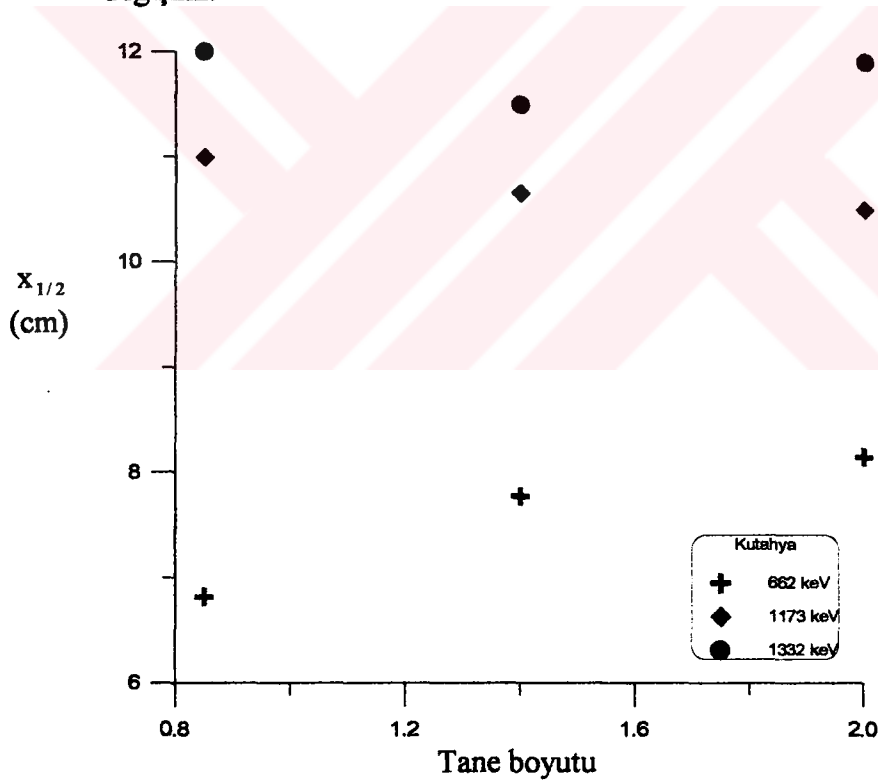
Şekil 5.15 (a) Çanakkale ve (b) Batman toprakları için lineer zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağlı değişimi.



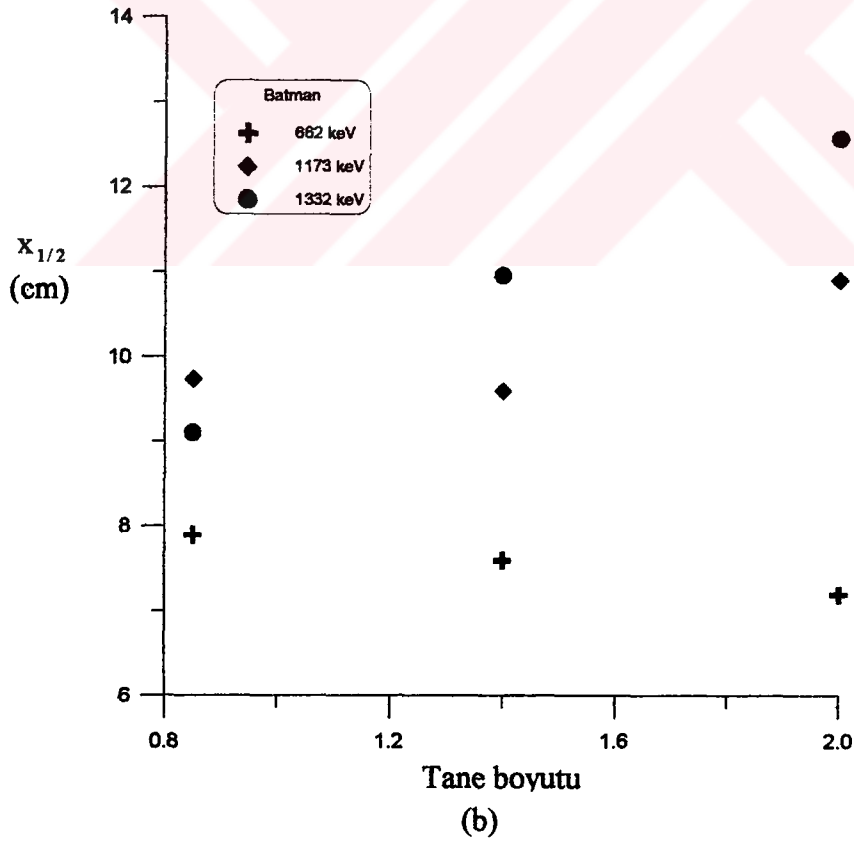
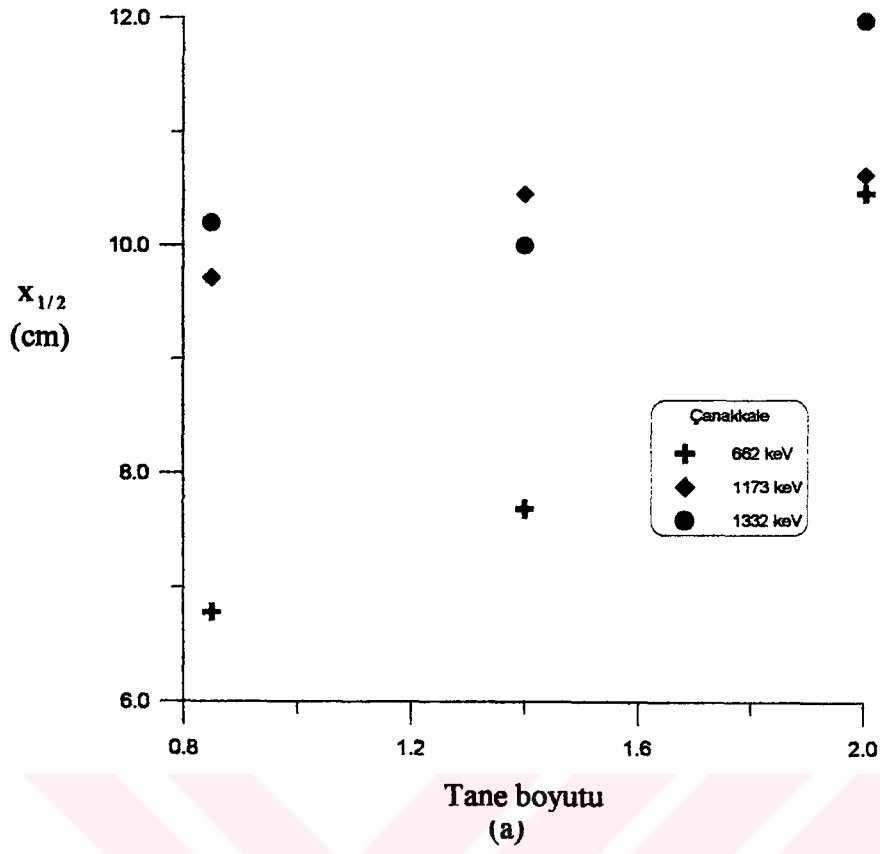
Şekil 5.16 (a) Kütahya ve (b) Çanakkale toprakları için kütleli zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağlı değişimi



Şekil 5.17 Batman toprağı için kütlele zayıflatma katsayısının tane boyutuna bağı değışimi.



Şekil 5.18 Kütahya toprağı için yarıkalınlığın tane boyutuna bağı değışimi



Şekil 5.19 (a) Çanakkale ve (b) Batman toprakları için yarı kalınlığın tane boyutuna bağlı değişimi.

5.2.4 Katmanlı Zırh Çalışmaları

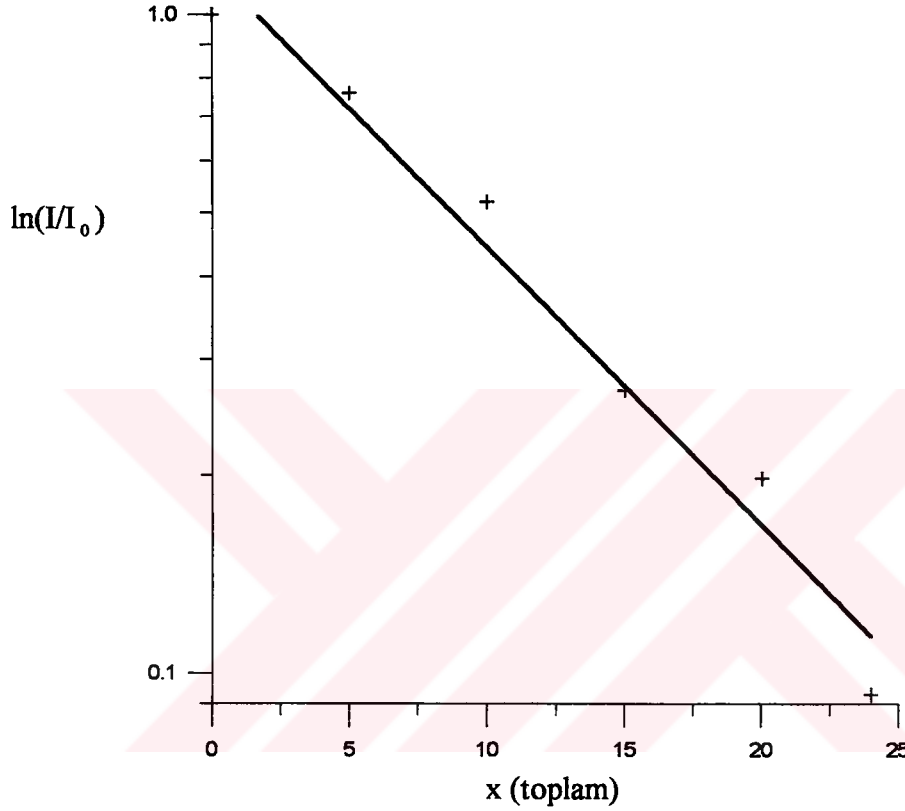
Genellikle, çok enerjili radyasyonun zırhlanmasında, farklı malzemelerden oluşan katmanlı zırhlama modelleri geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da toprakla birlikte farklı bir malzeme kullanılarak katmanlı zırh tabakası oluşturulmuş ve radyasyonun zayıflaması incelenmiştir. Bu amaçla toprakla aynı tane büyüklüğüne sahip (0.85 mm) demir ve alüminyum tozları kullanılarak tabaka oluşturulmuştur. Katmanlı zırh çalışmasında toprak katmanı için Edirne toprağı kullanılmıştır. Katman oluştururken Al tozları 5x5 cm kesitli, Fe tozları ise 4x4 cm kesitli perpex kaplara yerleştirilmiştir. Kaynak dedektör arasına, kaynak tarafından itibaren önce Fe veya Al tabakası daha sonra toprak tabakaları yerleştirilerek sayımlar alınmıştır. Katmanlı zırh deneylerinin sonuçları bağıl radyasyon şiddeti-toplam kalınlık arasında çizilen eğrilerle değerlendirilmiştir. Burada toplam kalınlık, sadece toprak söz konusu ise toplam toprak kalınlığını, Fe veya Al ile katmanlı sistem söz konusu ise Fe + toprak veya Al + toprak kalınlığını temsil etmektedir. Söz konusu eğriler kullanılarak yarıkalınlığın değişimi incelenmiştir.

Şekil 5.20'de 662 keV enerji için sadece toprak kullanılması halinde bağıl radyasyon şiddetinin azalması verilmiştir ve bu hal için yarıkalınlık yaklaşık 10 cm'dir. Şekil 5.21 ve 5.22'de Al ve Fe katmanlı topraklar için bağıl radyasyon şiddetinin değişimi görülmektedir. 662 keV için Al + toprak katmanlı sisteminde yarıkalınlık yaklaşık 11.5 cm ve Fe + toprak katmanlı sisteminde yarıkalınlık yaklaşık 4.5 cm bulunmuştur.

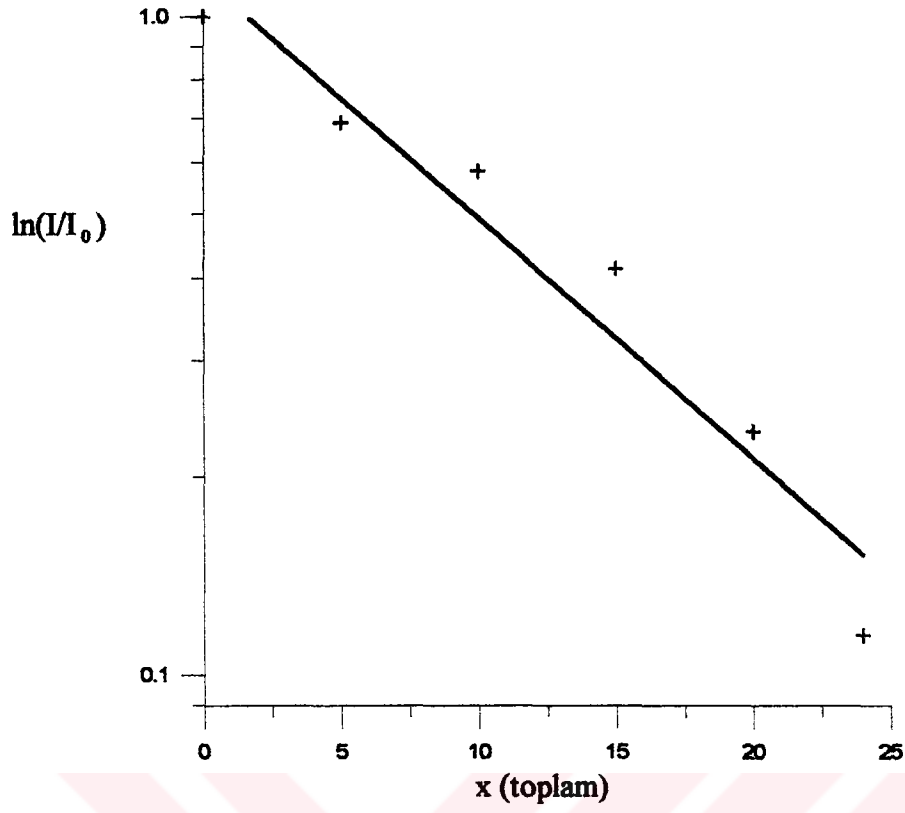
Şekil 5.23'de 1173 keV için sadece topraktan oluşan sistemde bağıl radyasyon şiddetinin azalımı görülmektedir. Bu sistem için yarıkalınlık 11 cm kadardır. Şekil 5.24 ve 5.25'de sırasıyla Al + toprak sistemi için yarıkalınlık yaklaşık 13 cm ve Fe + toprak sistemi için yarıkalınlık 10 cm olarak bulunmuştur.

Şekil 5.26'da 1332 keV için sadece topraktan oluşan sistemde yarıkalınlık 11 cm olarak bulunmuştur. Şekil 5.27 ve 5.28 sırasıyla Al + toprak ve Fe + toprak sistemlerinde bağıl radyasyon şiddetinin azalımını vermektedir. 1332 keV için Al + toprak sisteminde yarıkalınlık 13 ve Fe + toprak sisteminde yarıkalınlık 10 cm kadar bulunmuştur.

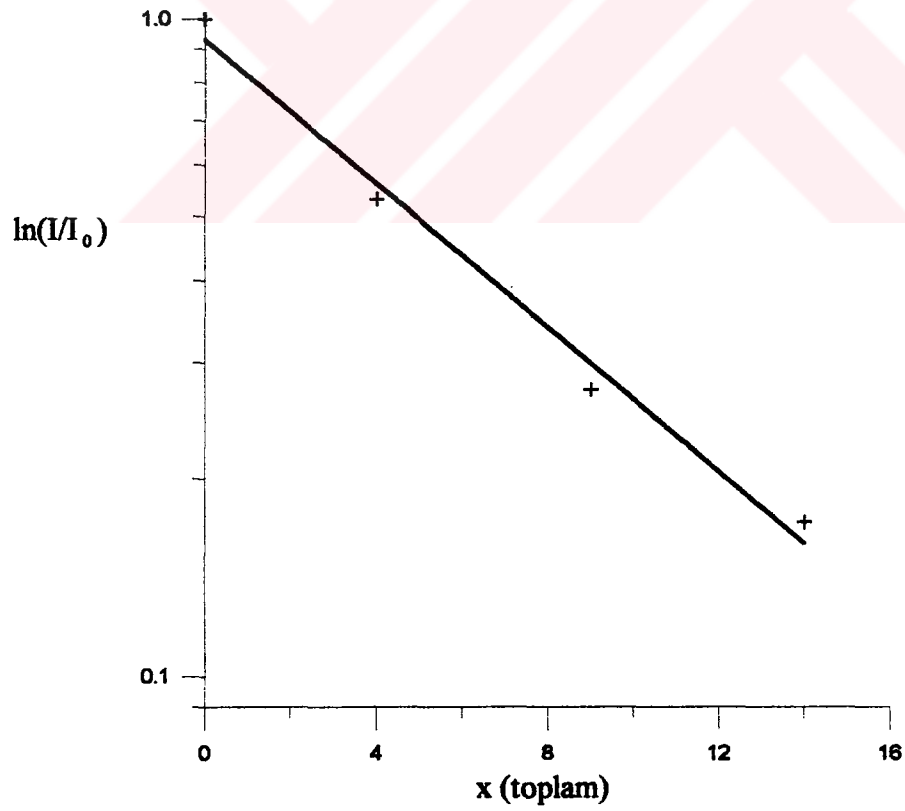
Sonuçlar göstermektedir ki, tüm foton enerjileri için Al + toprak sistemi sadece topraktan oluşan sisteme nazaran daha büyük bir yarıkalınlığa sahiptir. Toprak daha iyi bir zırhlama sağlamaktadır. Fe + toprak sistemi sadece topraktan oluşan sisteme göre 662 keV için yarıkalınlığı % 55 azaltmaktadır. Ancak 1173 ve 1332 keV için yarıkalınlığı azaltma oranı yaklaşık % 10'da kalmıştır.



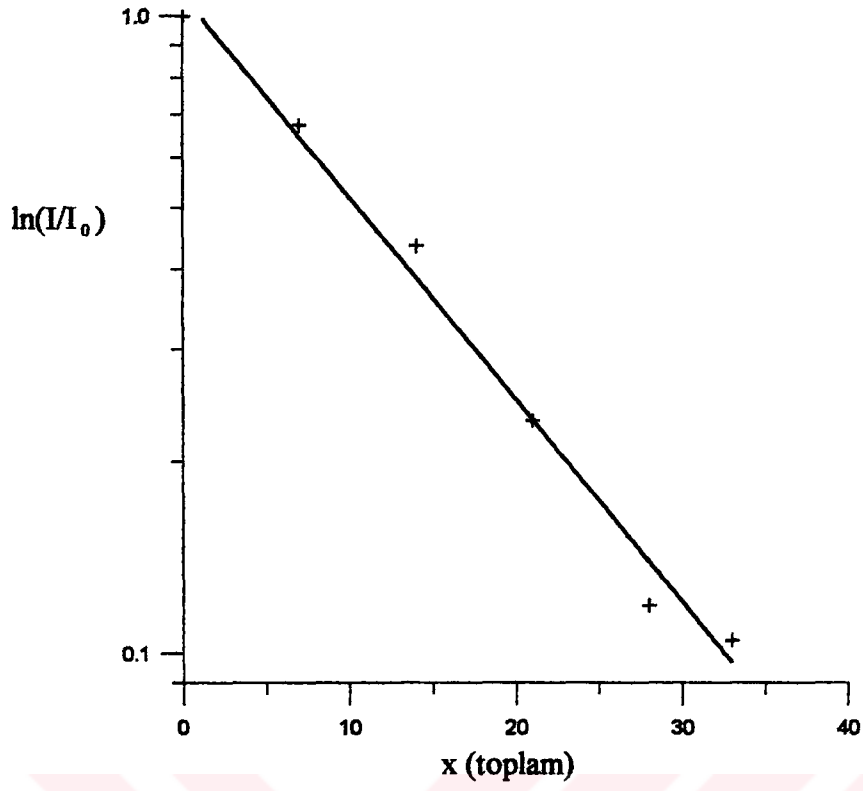
Şekil 5.20 662 keV enerjide toplam toprak kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı



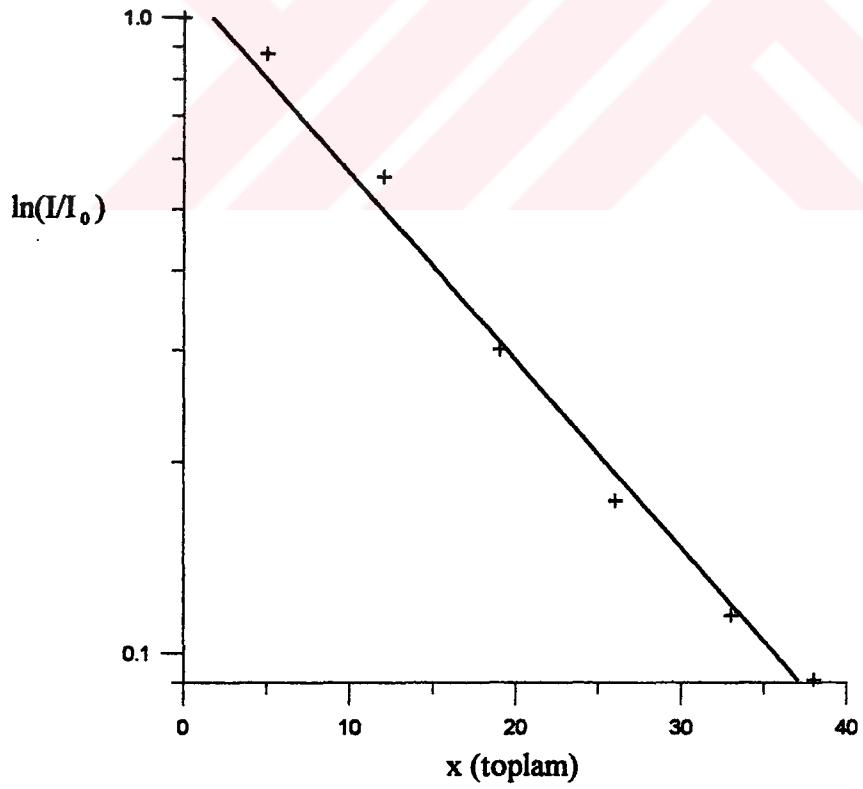
Şekil 5.21 662 keV enerjide toplam toprak + Al kalınlığa göre radyasyon şiddetinin azalımı



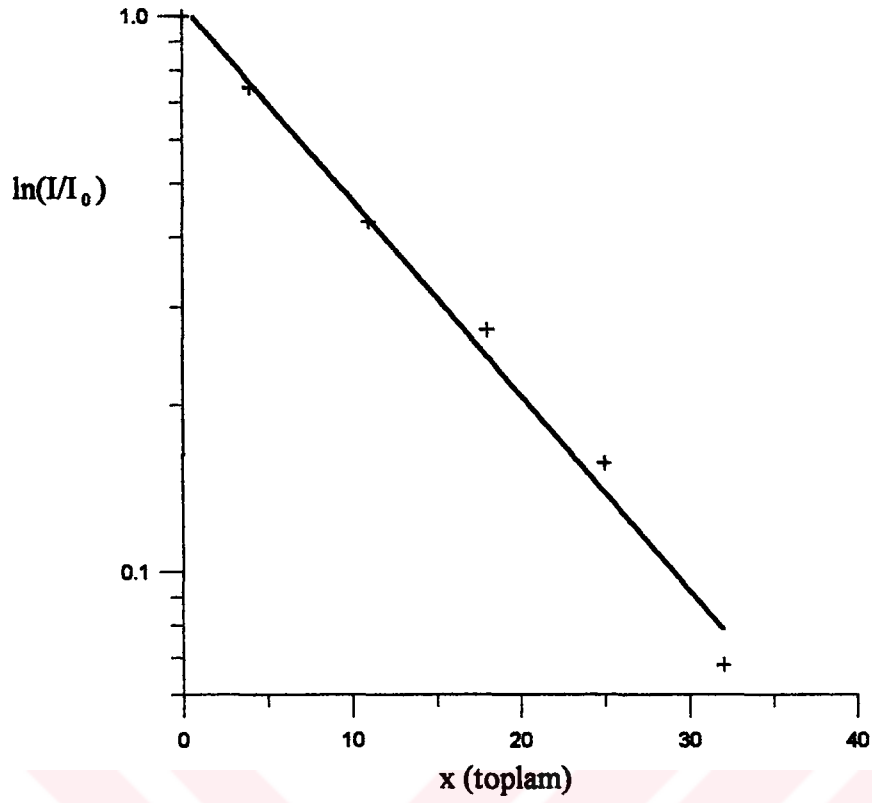
Şekil 5.22 662 keV enerjide toplam toprak + Fe kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı



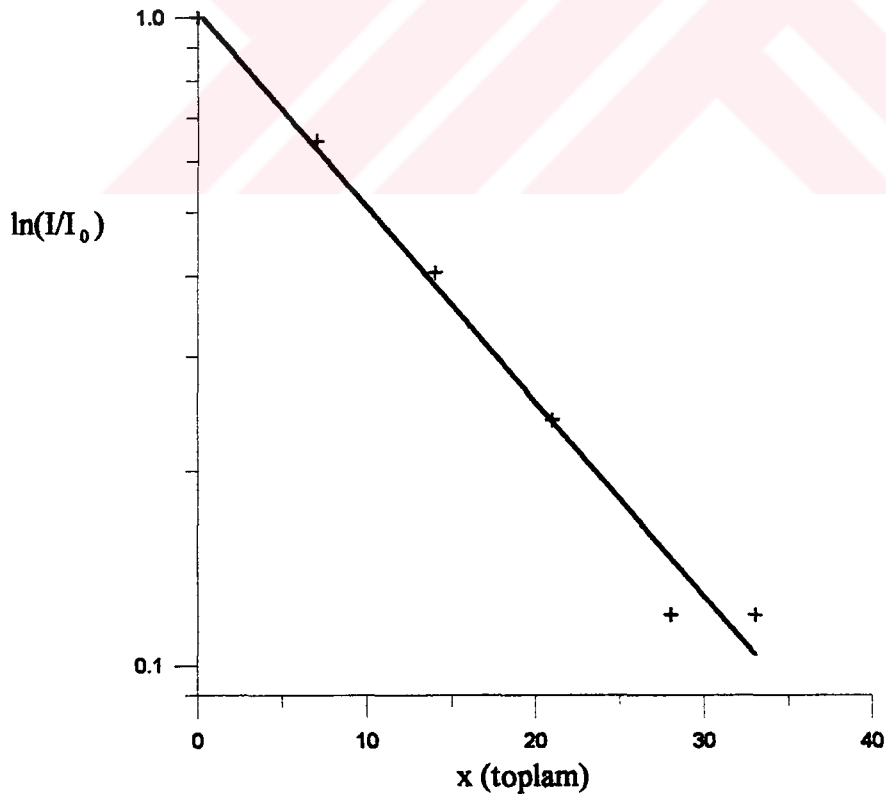
Şekil 5.23 1173 keV enerjide toplam toprak kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı



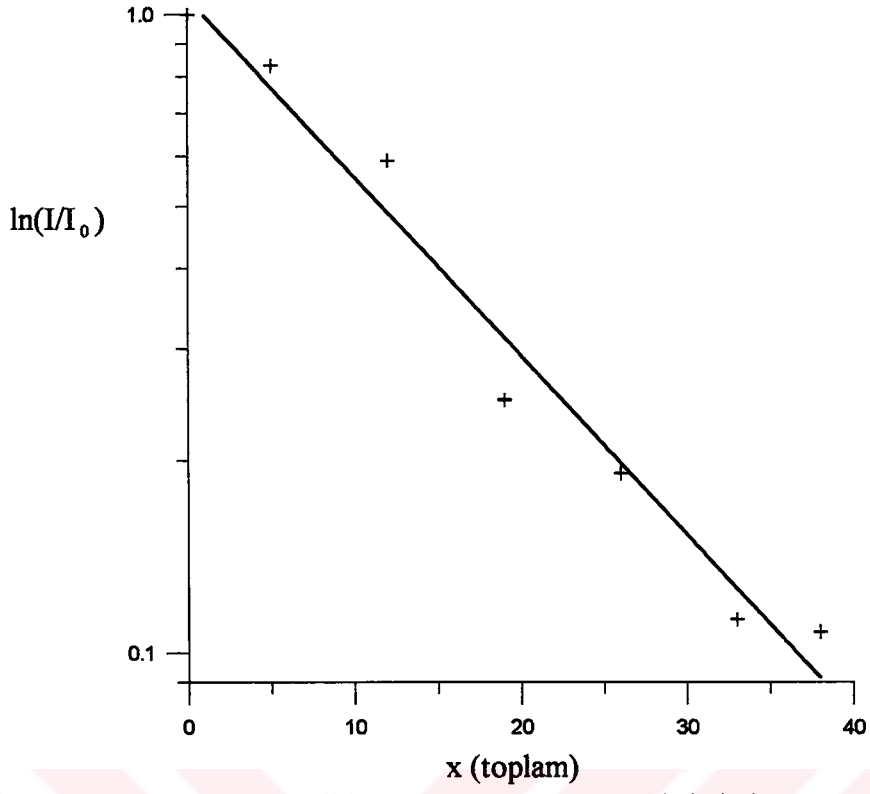
Şekil 5.24 1173 keV enerjide toplam toprak + Al kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı



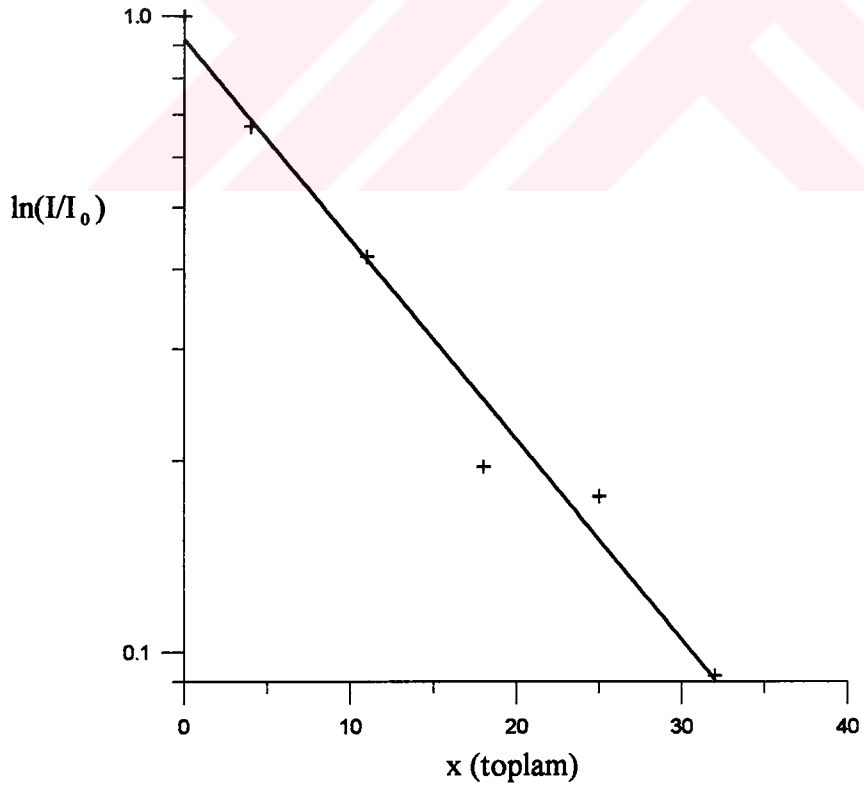
Şekil 5.25 1173 keV enerjide toplam toprak + Fe kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı



Şekil 5.26 1332 keV enerjide toplam toprak kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı



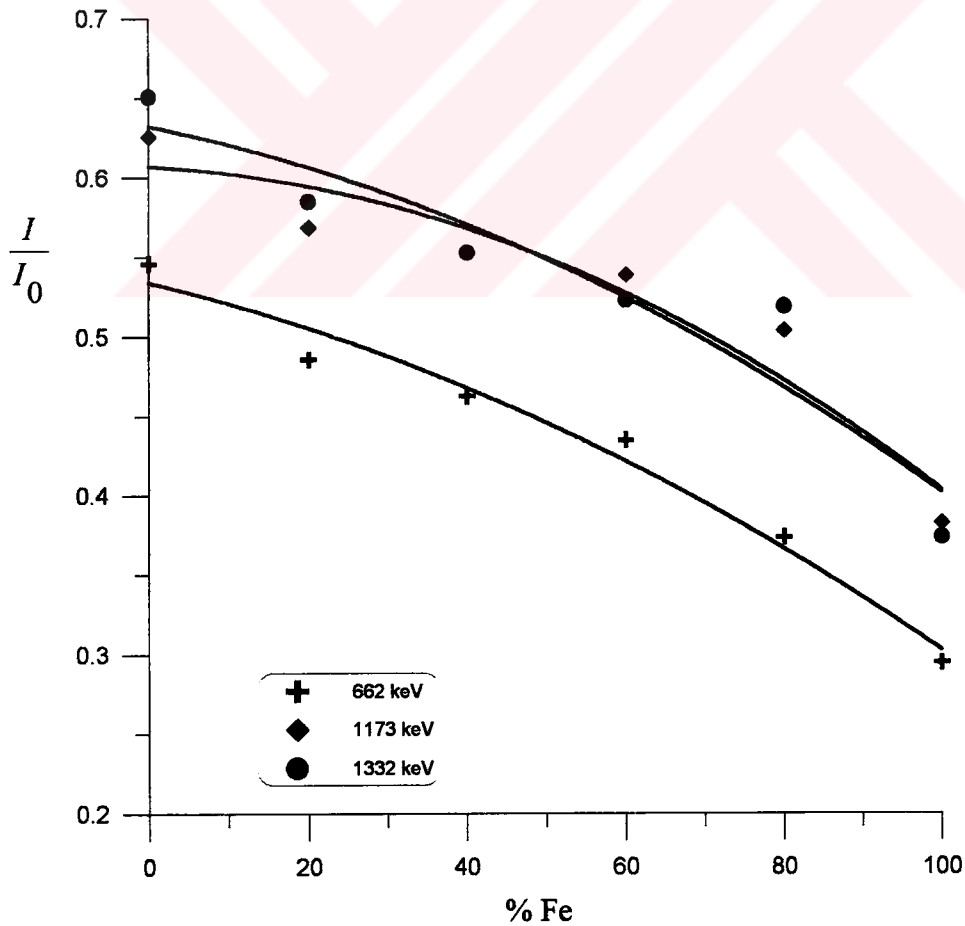
Şekil 5.27 1332 keV enerjide toplam toprak + Al kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı



Şekil 5.28 1332 keV enerjide toplam toprak +Fe kalınlığına göre radyasyon şiddetinin azalımı

5.2.5 Demir Katkılı Toprak ile Yapılan Çalışmalar

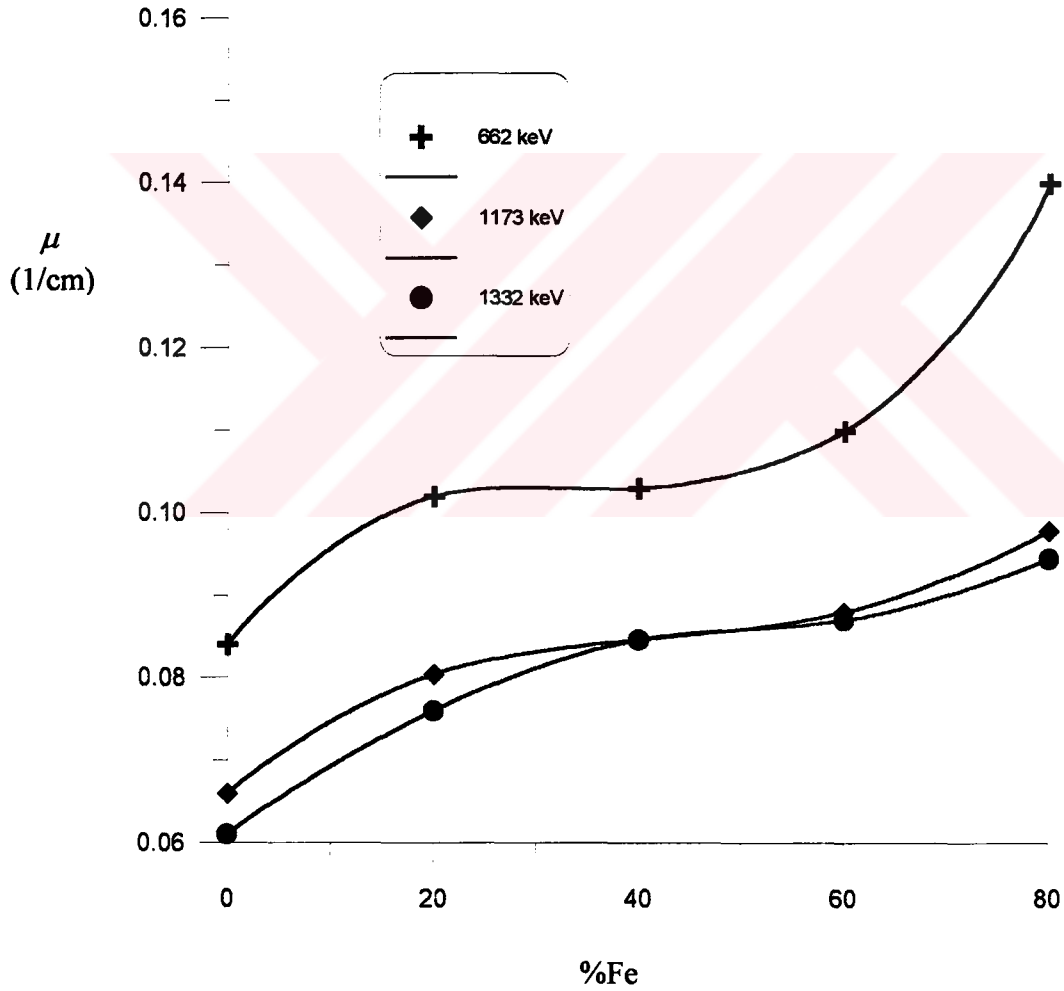
Katmanlı zırh çalışmasında, toprağın Fe ile katmanlı bir yapı halinde kullanılması ile yarıkalınlığın nispeten azaldığı gözlenmiştir. Bu noktadan hareketle, zaten toprağın içerdiği elementlerden biri olan demirin topraktaki yüzdesinin artırılması ile gama radyasyonunun zayıflaması incelenmiştir. Demir-toprak karışımının kullanıldığı deneylerde 250 g toprak kitlesine her adımda %20 oranında (50 g) demir tozu ilave edilerek gama zayıflatma ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.29'da toprağa ilave edilen demir yüzdesine bağlı olarak bağıl radyasyon şiddetinin azalımı verilmiştir. İlave edilen demir yüzdesinin sıfır olduğu nokta sadece toprağın kullanıldığı noktadır, demir yüzdesinin %100 olduğu nokta ise 250 g demir kitlesini göstermektedir. Bu deneylerde üç foton enerjisi için de 7x7 cm kesitli perspex kaplar kullanılmıştır. Demir tozu ile toprak mümkün olduğunca homojen karıştırılıp perspex kaba yerleştirilmiştir. Ayrıca sayımlar düşey yönde 3 noktadan her noktada da 3'er sayım olmak üzere alınmış ve ortalama sayımlar değerlendirilmiştir.



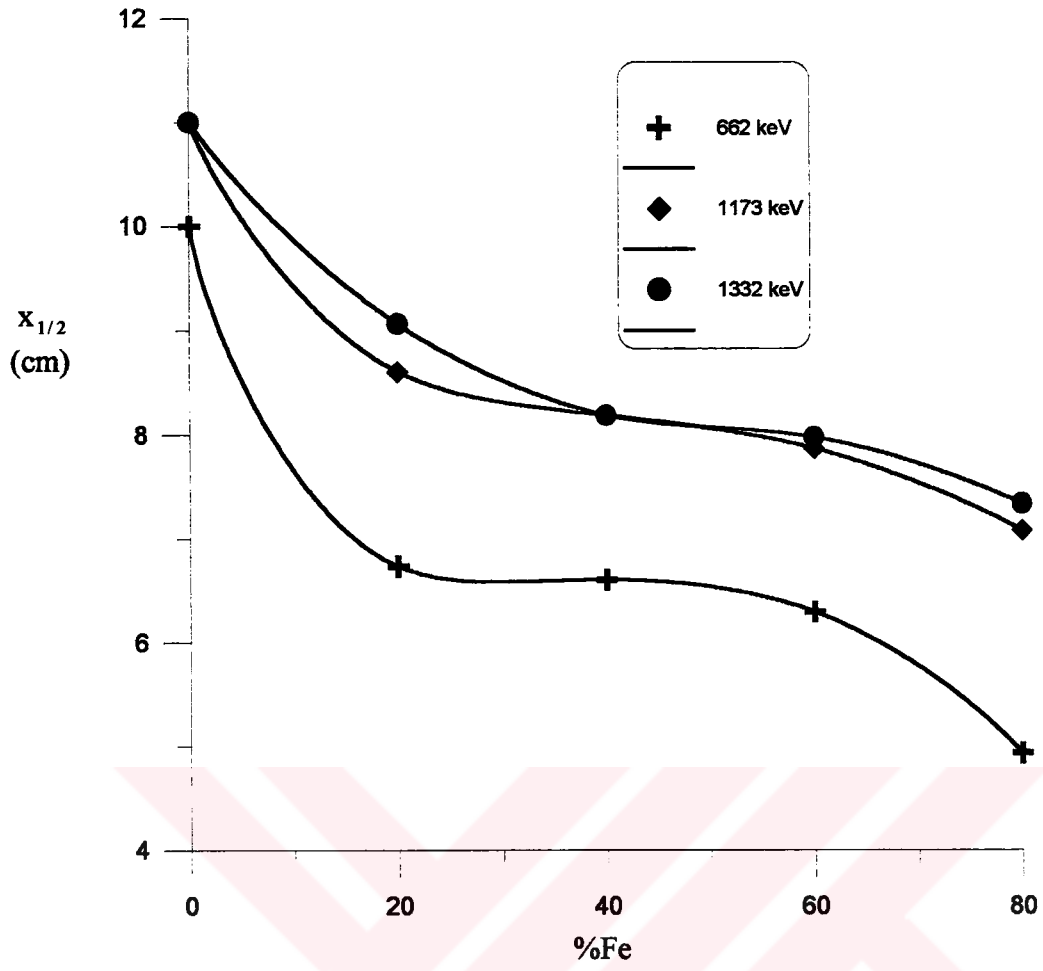
Şekil 5.29 Demir katkılı toprağın gama radyasyonunu zayıflatma etkisi

Şekil 5.30 ve 5.31’de demir toprak karışımı için sırasıyla lineer zayıflatma katsayısının ve denklem (2.19) yardımı ile bulunan yarıkalınlığın katılan demir yüzdesine bağlı değişimleri görülmektedir. Şekil 5.31’den görüleceği gibi toprağa %20 oranında demir katıldığı zaman üç foton enerjisi için de yarıkalınlıktaki değişim büyüktür.

Yarıkalınlık %20 oranında Fe katkısı ile 662 Kev için yaklaşık %32, 1173 keV için %22 ve 1332 keV için %18 oranında azalmaktadır. Demir katkısı %20-60 arasında iken yarıkalınlık tüm enerjilerde büyük değişim göstermemektedir. Demir katkısı %80 oranında iken 662 keV enerjide yarıkalınlıkta bir düşme görülmektedir, diğer iki foton enerjisi için yarıkalınlıkta büyük bir değişim olmamaktadır.



Şekil 5.30 Demir toprak karışımı için lineer zayıflatma katsayısının değişimi



Şekil 5.31 Demir toprak karışımı için yarıkalınlığın değişimi

BÖLÜM 6

SONUÇ VE TARTIŞMA

Radyasyon ile çalışılan alanların sayısı arttıkça, radyasyondan korunma daha büyük önem kazanmaktadır. Günümüzde zırhlama ile ilgili yayınların büyük çoğunluğu tıp, endüstri ve çeşitli araştırmalarda kullanılan radyasyonu zırhlayabilecek malzemelerin veya malzeme bileşimlerinin incelenmesi ve zırhlama özelliklerinin belirlenmesine yöneliktir. Bu çalışmalarda, bilinen zırhlama malzemeleri yerine daha kolay ve ucuz bulunabilen, daha hafif malzemelerin kullanım olanakları incelenmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, en yaygın kullanımı olan gama radyasyonu için toprak bir zırh malzemesi olarak incelenmiştir. Çalışmada kimyasal yapısı bilinen 7 toprak kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, iki kaynağa (^{137}Cs ve ^{60}Co) ait üç foton (662, 1173, 1332) enerjisi kullanılmıştır. Dar demet geometrisi kullanılarak toprak numunelerde gama ışınının zayıflaması incelenmiştir.

Gama radyasyonunun malzeme ile etkileşmesi foton enerjisine ve malzemenin atom numarasına bağlıdır. Toprak gibi çeşitli elementlerden meydana gelen malzemeler efektif atom numarası ile temsil edilmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar bileşik veya karışımlar için efektif atom numarasının enerjiye bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu tez çalışmasında da toprak numuneler için kullanılan üç foton enerjisi için de kütleli zayıflatma katsayıları hesaplanmış ve toplam foton tesir kesitleri bulunmuştur. Toprakların kütleli zayıflatma katsayıları Hubbell (1982) tabloları kullanılarak ve kimyasal yapılarındaki elementlerin ağırlıksal yüzdeleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan foton enerjileri açık literatürde orta enerji bölgesi kabul edilen 300 keV-3 MeV aralığına düşmektedir. Bu enerji aralığında kütleli zayıflatma katsayısının değişimi azdır. Nitekim kullanılan 7 toprak numunesi ve 3 foton enerjisi için kütleli zayıflatma katsayısının değişimi

büyük olmamıştır. Efektif atom numarası bilgisi toprakları oluşturan elementlerin toplam foton tesir kesitleri-atom numaraları arasında çizilen eğriler yardımı ile bulunmuştur. Kullanılan foton enerjilerinde efektif atom numarasının enerjiye bağlı büyük değişimler göstermemesi beklenmektedir, sonuçlar efektif atom numarasının 10.3 ile 11.72 arasında değerler aldığını göstermektedir. Kimyasal yapının efektif atom numarası üzerindeki etkisi incelendiğinde de, atom numarası en büyük olan Fe ($Z=26$) ve Ca ($Z=20$) elementlerini en yüksek ağırlıksal yüzde ile içeren topraklarda efektif atom numarasının en büyük değeri aldığı sonucuna varılmıştır.

Deneysel çalışmalarda öncelikle üç foton enerjisi için radyasyonun şiddetini 1/10 oranında azaltan toprak kalınlığının bulunması hedeflenmiştir. Ve söz konusu kalınlık 662 keV için 22 cm, 1173 keV için 34 cm ve 1332 keV için 38 cm olarak bulunmuştur. Bu kalınlık değerlerinden sonra her üç enerji için de bağıl radyasyon şiddetinde değişim görülmemektedir. Toprak üç foton enerjisi için bu kalınlıklarda kullanıldığında toprak kitlesinin önünde ve arka yüzeyindeki ışınlama hızları hesaplanmıştır. Sonuçta bu zırh kalınlıklarının ışınlama hızını %80-90 oranında azalttığı anlaşılmıştır.

Kullanılan tüm topraklar için lineer zayıflatma katsayısı, yarıkalınlık, ortalama serbest yol ve kütleli zayıflatma katsayısı gibi foton zayıflatma parametreleri, gama ışını zayıflatma bilgileri kullanılarak bulunmuştur. Sonuçlar kütleli zayıflatma katsayısının kimyasal yapıya bağlı olarak değişiminin, lineer zayıflatma katsayısının değişimine göre daha az olduğunu göstermiştir. Üç foton enerjisi için tüm topraklara ait ortalama serbest yol değerleri 11.5 cm ile 16 cm arasında, yarıkalınlık değerleri 7.9 cm ile 11.2 cm arasında değişmektedir.

Bu çalışmada foton zayıflatma parametrelerinin toprağın tane boyutuna bağlı değişimi 0.85, 1.4 ve 2 mm tane boyutundaki topraklar için incelenmiştir. Rastgele seçilmiş üç toprak için yapılan deneylerin sonuçları, lineer ve kütleli zayıflatma katsayılarının tane boyutu arttıkça genellikle azalma eğiliminde olduklarını göstermiştir. Doğal olarak yarıkalınlık ve ortalama serbest yol değerleri de tane boyutu büyüdükçe artmaktadır, zira radyasyonun etkileşmeden geçme olasılığı artmaktadır. Zırhlama açısından düşünülürse tane boyutu büyüdükçe daha kalın toprak tabakalarının kullanılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında toprak ile birlikte aynı tane boyutuna sahip Al ve Fe tozları kullanılarak katmanlı zırh çalışması yapılmıştır. Bunun için kaynak dedektör arasına kaynak tarafından itibaren 5x5 cm perspex kaba Al konarak veya 4x4 cm kesitli kaba Fe konarak yerleştirilmiş ve toprak dolu kaplar bunların arkasına ard arda konarak sayımlar alınmıştır. Katmanlı yapının yarıkalınlık üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar demir ile katmanlı sistemde 662 keV için yarıkalınlığın %55 oranında, 1173 ve 1332 keV için %10 oranında azaldığını göstermiştir. Al ile katmanlı sistemin radyasyon zayıflatma özelliği iyi değildir. Ama Fe ile katmanlı sistem özellikle düşük foton enerjilerinde yararlı olabilir.

Katmanlı zırh çalışmasında demirin yarıkalınlığı azaltmasından yararlanılarak topraktaki demir yüzdesinin arttırılması düşünülmüştür. Bu amaçla önce 250 g toprak 7x7 cm kesitli perspex kaba yerleştirilip ölçümler alınmıştır. Sonraki her adımda toprak 50 g azaltılıp yerine demir ilave edilerek sayımlar tekrarlanmıştır. Yani her adımda toplam ağırlığın %20'si kadar demir ilave edilmiştir. Demir katkısının yarıkalınlık üzerindeki etkisi incelendiği zaman, yarıkalınlıktaki dramatik azalmanın %20 demir ilavesi ile gerçekleştiği görülmüştür. Demir katkısı %20-60 arasında iken yarıkalınlıkta kayda değer bir değişim görülmemiştir. Bu durumda toprak ağırlığının %20'si kadar bir miktarda demir tozu ile karıştırıldığında zırhlama kalınlığı azalmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında kolay ve ucuz bulunabilir olması ve sahra çalışmalarında uygunluğu düşünülerek, toprak bir gama radyasyon zırhlama malzemesi olarak incelenmiştir. Zırhlama açısından, toprak gibi çok elementli bir malzemenin foton zayıflatma parametreleri ve bu parametreleri etkileyen faktörler incelenerek zırhlama ile ilgili araştırmalara katkıda bulunacak bilgiler elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Almenas K. and Lee R.**, 1992. Nuclear Engineering, Springer-Verlag.
- Akbal S.**, 1999. Toprak numunelerde foton zayıflatma katsayısının incelenmesi, İ.T.Ü Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Bakos G. C.**, 1995. Improvement of buildup factors for multi-energy gama-rays penetration through Al, Fe and Pb shield combinations, *Annals of Nuclear Energy*, **22**, 125-130.
- Bhandal G. S., Singh K.**, 1993. Study of the mass attenuation coefficients and effective atomic numbers in some multielement materials, *Applied Radiation and Isotopes*, **44 (b)**, 929-939.
- El-Faramawy N. A., El-Hosiny F. I.**, 1998. The effect of the autoclaving process and addition of silica fume on portland cement in shielding gamma radiation, *Radiation Measurements*, **29**, 619-623.
- El-Kateb A. H., Rizk R. A. M., Abdul-Kader A. M.**, 2000. Determination of atomic cross-sections and effective atomic numbers for some alloys, *Annals of Nuclear Energy*, **27**, 1333-1343.
- Hallenbeck William H.**, 1994. Radiation Protection, Lewis Publishers CRC Press LLC.
- Hubbel J. H.**, 1982. Photon mass attenuation and energy-absorbsion coefficients from 1 keV to 20 MeV. *Applied Radiation and Isotops*, **33**, 1269-1290.
- Kobayashi S., Hosoda N., Takashima R.**, 1997. Tungsten alloys as radiation protection materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **390**, 426-430.
- Koç N. , Özyol H.**, 2000. Z-dependence of partial and total photon interactions in some biological samples, *Radiation Physics and Chemistry*, **59**, 339-345.
- Kumar T. K., Venkataratnam S., Reddy K. V.**, 1996. Effective atomic number studies in clay minerals for total photon interaction in the energy region 10 keV-10 MeV, *Radiation Physics and Chemistry*, **48**, 707-710.
- Lamarch John R.**, 1977. Introduction to Nuclear Engineering, Addison-Wesley Publishing Company.

- Makarious A. S., Bashter I. I., El-Sayed Abdo A., Samir Abdel Azim M., Kansouh W. A., 1996. *Annals of Nuclear Energy*, 23, 195-206.**
- Mudahar G. S., Sahota H. S., 1985. Optimal thickness of soil between source and dedector for different gamma-ray energies, *Journal of Hydrology*, 80, 265-269.**
- Mudahar G. S., Sahota H. S., 1988. Effective atomic number studies in different soils for total photon interaction in the energy region 10-5000 keV, *Applied Radiation and Isotopes*, 39, 1251-1254.**
- Murty C. R., 1999. Z-dependence of photon interactions in simulated materials, *Applied Radiation and Isotopes*, 51, 335-339.**
- Murty V. R. K., Winkoun D. P., Devan K. R. S., 2000. Effective atomic numbers for W/Cu alloy using transmission experiments, *Applied Radiation and Isotopes*, 53, 945-948.**
- Prasad S. G., Parthasaradhi K., Bloomer W. D., Al-Najjar W. H., McMahon J. , Thomson O., 1998. Aluminum, copper, tin and lead as shielding materials in the treatment of cancer with high-energy electrons, , *Radiation Physics and Chemistry*, 53, 361-366.**
- Shultis J. Kenneth and Richard E. Faw, 1996. Radiation Shielding, Prentice Hall PTR, New Jersey.**
- Singh K., Kaur R., V. Kumar, 1996. Study of effective atomic numbers and mass attenuation coefficients in some compounds, *Radiation Physics and Chemistry*, 47, 535-541.**
- Turner James E., 1995. Atoms, Radiation, and Radiation Protection, John Wiley & Sons, Inc.**
- Wood J., 1987. Computational Methods in Reactor Shielding, Pergamon Press.**

ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında İstanbul'da doğdu. Orta öğrenimini tamamladıktan sonra, Marmara Üniversitesi Atatürk Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü'ne girdi ve buradan 1998 yılında mezun oldu. 1998-1999 eğitim-öğretim döneminde İ.T.Ü. Nükleer Enerji Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Ekim 1998'den beri Şakire Sadi Obdan İlköğretim Okulu'nda İngilizce öğretmeni olarak görev yapmaktadır.

