

**RADYOTERAPİDE UYGULANAN ALÇILI HASTALARDA
X-IŞINLARININ DOZİMETRİK ETKİSİ**

Onur KARAMAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2012

ANKARA

Onur KARAMAN tarafından hazırlanan RADYOTERAPİDE UYGULANAN ALÇILI HASTALARDA X-IŞINLARININ DOZİMETRİK ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Güneş TANIR

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tarih: / /

Bu tez ile G. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Onur KARAMAN

**RADYOTERAPİDE UYGULANAN ALÇILI HASTALARDA
X-IŞINLARININ DOZİMETRİK ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Onur KARAMAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2012

ÖZET

Bu çalışmada, vücudun alçıya alınmış çeşitli bölgelerine verilmesi muhtemel radyasyon dozunun iyi planlanabilmesi amacıyla, Siemens marka, Oncor Impression model lineer hızlandırıcı tedavi cihazında, 6 MV ve 18 MV enerjili x-ışınları kullanılarak yüzde derin doz ölçümleri yapılmıştır. Doku eşdeğeri olan katı fantom ve alçılı katı fantomun kalınlıkları (5x5) cm², (10x10) cm² ve (15x15) cm² alan açıklıkları için, değiştirilerek alçının kütle azalma katsayısı deneysel olarak elde edilmiş ve alçının doza etkisi araştırılmıştır. Dozun derinliğe karşılık çizilen grafiklerden lineer azalma katsayısının (μ) enerjinin artması ile azaldığı görülmüştür. NIST x-ray programı kullanılarak alçının azalma katsayısı teorik olarak hesaplanmış ve deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır. (5x5) cm²'lik alan açıklığında sonuçların birbiri ile uyumlu ve saçılmaların da bu alan açıklığı için en az olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 202.1.108
Anahtar Kelimeler : Radyoterapi, X- Işınları, Azalma Katsayısı, % Derin Doz
Sayfa Adedi : 98
Tez Yöneticisi : Prof.Dr.Güneş TANIR

**DOSIMETRIC EFFECTS OF X-RAYS FOR PATIENTS WITH PLASTER
THAT TAKE RADIOTHERAPY**

(M.Sc. Thesis)

Onur KARAMAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2012

ABSTRACT

In this work, the percent depth dose measurements were done by using x-rays with 6 MV and 18 MV from linear accelerator therapy device (Siemens, Oncor Impression model) to plan the probable radiation dose to be given to patient with plaster. By changing the thickness of tissue equivalent solid phantom with and without plaster the linear attenuation coefficients were experimentally determined for (5x5) cm², (10x10) cm² and (15x15) cm² areas and investigated the effect of plaster to dose. It was shown that the linear attenuation coefficients are decreasing while energy is increasing. The linear attenuation coefficient of plaster was also calculated by using the NIST x-ray program and compared with the measured values. The results were found that they are good agreement with each other's and the back scattering are the less for (5x5) cm² than for that of other areas.

Science Code : 202.1.108

Key Words : Radiotherapy, X-Rays, Attention Coefficients, %Depth Dose

Page Number : 98

Adviser : Prof.Dr.Güneş TANIR

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında ve yüksek lisans dönemim boyunca eşsiz bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren ve her konuda desteğini her zaman hissettiğim danışmanım Sayın Prof. Dr. Güneş TANIR'a, yüksek lisans dönemim boyunca bilgi ve deneyimleri ile beni destekleyen hocam Sayın Prof.Dr.Eyüp TEL'e, Doç.Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR'e, Prof.Dr. Ziya MERDAN'a,

Bana bu çalışmada her türlü çalışma olanağı sağlayan,değerli bilgilerıyla beni her zaman destekleyen Sayın Fiz. Müh. Mustafa TUNÇ'a, ölçümlerde yardımını esirgemeyen arkadaşım Fizikçi Fatih Çağlar KAHRAMAN'a, Hasan BARUT'a, hekimlere ve stajyer arkadaşlarıma,

Hayatımın her döneminde bana inanıp manevi desteklerini benden hiç eksik etmeyen babam Arif KARAMAN'a, annem Gülşen KARAMAN'a, kardeşim Tuğba KARAMAN'a, yaşamıma ve bu çalışmama katkılarından dolayı kız arkadaşım Ceren DEMİRTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1.GİRİŞ	1
2. TEMEL BİLGİLER	4
2.1. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi	4
2.1.1. Yüklü parçacıkların etkileşmeleri	4
2.1.2. Elektronlar.....	4
2.1.3. X-ışınları	5
2.2. Radyasyon Doz Birimleri	11
2.3. Lineer Enerji Transferi (LET)	14
2.4. Lineer Azalma Katsayısı	15
2.5. Lineer Hızlandırıcı (LINAC).....	18
3. MATERYAL	22
3.1. Kullanılan Materyaller	22
3.1.1. Lineer hızlandırıcı (LINAC)	22
3.1.2. İyon odası	23

Sayfa

3.1.3. Elektrometre	24
3.1.4. Katı su fantomu	24
3.1.5. Alçı	25
4. DENEYSEL BULGULAR	26
4.1. Katı Fantom ve Alçılı Katı Fantom ile Yapılan Ölçümler	26
4.2. Pamuklu Katı Fantom ve Alçılı Pamuklu Katı Fantom için X-ışınlarıyla Yapılan Ölçümler	44
4.3. Alçı-Katı Fantom Sistemi ile Taklit Kol ve Bacak için X-ışınlarıyla Yapılan Ölçümler	61
4.4. NIST X-Ray Programına Göre Alçının Bileşimindeki Elementlerin Kütle Azalma Katsayısının Hesaplanması	68
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	74
KAYNAKLAR	81
EKLER	83
ÖZGEÇMİŞ	98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Radyasyon ölçümü için tanımlanan nicelikler ve bunların SI birimleri.	14
Çizelge 4.1. 6 MV’de katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri	27
Çizelge 4.2. 18 MV’de katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri	29
Çizelge 4.3. 6 MV’de alçılı katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri	35
Çizelge 4.4. 18 MV’de alçılı katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri	37
Çizelge 4.5. 6 MV’de pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri	45
Çizelge 4.6. 18 MV’de pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri ..	47
Çizelge 4.7. 6 MV’ de alçılı pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri	53
Çizelge 4.8. 18 MV’ de alçılı pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri	55
Çizelge 4.9. Taklit kol için toplam derinlik 5 cm’de 6 MV’de kalınlıkla doz değişimi.....	62
Çizelge 4.10. Taklit kol için toplam derinlik 5 cm’de 18 MV’de kalınlıkla doz değişimi.....	63
Çizelge 4.11. Taklit bacak için toplam derinlik 10 cm’ de 6 MV’de kalınlıkla doz değişimi.....	64
Çizelge 4.12. Taklit bacak için toplam derinlik 10 cm’de 18 MV’de kalınlıkla doz değişimi.....	65
Çizelge 4.13. 6 MV’de katı fantom kalınlığına bağlı değişen doz.....	66
Çizelge 4.14. 18 MV’de katı fantom kalınlığına bağlı değişen doz.....	67
Çizelge 4.15. Alçı içindeki bileşenler ve kütlece yüzdesi.....	68
Çizelge 4.16. Elementlerin NIST X-Ray programından alınan kütle azalma katsayıları.....	69

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. 6 MV ve 18 MV’de katı fantom ve alçılı katı fantom için (10x10) cm ² alan açıklığında d _{max} değerleri.....	75
Çizelge 5.2. Alçı bir hastadan herhangi 10 noktadan alınan ölçümlerin HU ve elektron yoğunluğu değerleri	76
Çizelge 5.3. Alçılı katı fantom ve katı fantom için deneysel ve teorik olarak hesaplanan lineer azalma katsayısının karşılaştırılması.....	78
Çizelge 5. 4. Alçılı katı fantom için alan açıklığına bağlı lineer azalma katsayısı değişimi.....	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. X-ışını tüpü	5
Şekil 2. 2. Fotoelektrik olay	7
Şekil 2. 3. Compton olayı.....	8
Şekil 2. 4. Çift oluşum	9
Şekil 2. 5. Koherent saçılma	10
Şekil 2. 6. Foto bozunma	11
Şekil 2. 7. Foton şiddetinin hedef kalınlığına bağlı değişimi.....	15
Şekil 2. 8. Toplam lineer azalma katsayısının gelen foton enerjisi ile değişimi [Das ve Ferbel, 2005]	17
Şekil 2. 9. Enerji transfer katsayısı (μ_{tr}), enerji azalma katsayısı (μ_{en}) ve lineer azalma katsayılarının (μ) ortamda radyasyonlarını kaybetme ilişkisi [Martin, 2003].....	18
Şekil 2. 10. Bir lineer hızlandırıcının genel görünümü.....	19
Şekil 2. 11. Lineer hızlandırıcının blok şeması.....	19
Şekil 2. 12. Modern bir lineer hızlandırıcı şeması	21
Şekil 3. 1. İyon odası yapısı	23
Şekil 4. 1. Katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği	28
Şekil 4. 2. Katı fantom 18 MV’de doz kalınlık grafiği	30
Şekil 4. 3. 6 MV’de katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği.....	31
Şekil 4. 4. 18 MV’de katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği.....	31
Şekil 4. 5. 6 MV’de katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği....	32
Şekil 4. 6. 18 MV’de katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği..	32
Şekil 4. 7. 6 MV’de katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4. 8. 18 MV’de katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği..	33
Şekil 4. 9. Alçılı katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği.....	36
Şekil 4.10. Alçılı katı fantom 18 MV’de doz kalınlık grafiği.....	38
Şekil 4. 11. 6 MV’de alçılı katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	39
Şekil 4. 12. 18 MV’de alçılı katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	39
Şekil 4.13. 6 MV’de alçılı katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	40
Şekil 4.14. 18 MV’de alçılı katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	41
Şekil 4.15. 6 MV’de alçılı katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	41
Şekil 4. 16. 18 MV’de alçılı katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	42
Şekil 4.17. 6 MV için (10x10) cm ² ,de katı fantom ve alçılı doz ölçümlerinin karşılaştırılması	43
Şekil 4.18. 18 MV için (10x10) cm ² ,de katı fantom ve alçılı doz ölçümlerinin karşılaştırılması	43
Şekil 4.19. Pamuklu katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği.....	46
Şekil 4.20. Pamuklu katı fantom 18 MV’de doz kalınlık grafiği.....	48
Şekil 4.21. 6 MV’de pamuklu katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	49
Şekil 4.22. 18 MV’de pamuklu katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	49
Şekil 4.23. 6 MV’de pamuklu katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	50
Şekil 4.24. 18 MV’de pamuklu katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	51

Şekil	Sayfa
Şekil 4.25. 6 MV’de pamuklu katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	51
Şekil 4.26. 18 MV’de pamuklu katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	52
Şekil 4.27. Alçılı pamuklu katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği.....	54
Şekil 4. 28. Alçılı pamuklu katı fantom 18 MV’de doz kalınlık grafiği.....	56
Şekil 4. 29. 6 MV’de alçılı pamuklu katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	57
Şekil 4.30. 18 MV’de alçılı pamuklu katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	57
Şekil 4.31. 6 MV’de alçılı pamuklu katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	58
Şekil 4.32. 18 MV’de alçılı pamuklu katı fantom (10x10) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	59
Şekil 4.33. 6 MV’de alçılı pamuklu katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	59
Şekil 4.34. 18 MV’de alçılı pamuklu katı fantom (15x15) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	60
Şekil 4.35. Taklit kol şematik gösterimi	61
Şekil 4.36. Taklit bacak şematik gösterimi	61
Şekil 4.37. Taklit kol için 6 MV’de doz kalınlık grafiği.....	62
Şekil 4.38. Taklit kol için 18 MV’ de doz kalınlık grafiği.....	63
Şekil 4.39. Taklit bacak için 6 MV’de doz kalınlık grafiği	64
Şekil 4.40. Taklit bacak için 18 MV’de doz kalınlık grafiği	65
Şekil 4.41. 6 MV’de katı fantom kalınlığa bağlı doz değişim grafiği.....	66
Şekil 4.42. 18 MV’de katı fantom kalınlığa bağlı doz değişim grafiği	67

Şekil	Sayfa
Şekil 4.43. 6 MV’de alçılı katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	71
Şekil 4.44. 18 MV’de alçılı katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği	72
Şekil 4.45. 6 MV’de katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği.....	73
Şekil 4.46. 18 MV’de katı fantom (5x5) cm ² için lineer azalma katsayısı grafiği.....	73
Şekil 5. 1. (5x5) cm ² 6 MV’de alçılı katı fantom için lineer azalma katsayısı grafiği	77
Şekil 5. 2. (5x5) cm ² 18 MV’de alçılı katı fantom için lineer azalma katsayısı grafiği	77
Şekil 5. 3. Gönderilen foton şiddetinin hedef kalınlığına bağlı değişimi.....	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3. 1. Siemens Oncor Impression M5395, Lineer hızlandırıcı	22
Resim 3. 2. PTW Unidos Elektrometre	24
Resim 3. 3. RW3 Katı fantom	25
Resim 3. 4. Alçı	25
Resim 4. 1. Katı fantom ölçümü	26
Resim 5. 1. Radyoterapi uygulanan hastanın alçı yardımıyla sabitlenmesi	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
W_R	Radyasyon Ağırlık Faktörü
W_T	Doku Ağırlık Faktörü
μ_τ	Fotoelektrik Absorpsiyon Katsayısı
μ_σ	Compton Absorpsiyon Katsayısı
(1-g)	Bremstrahlung Yüklü Partiküllerin Enerji Kesti
μ_π	Çift oluşum absorpsiyon katsayısı
D_w	Soğurulan Doz
Mu^0	Düzeltilme Faktörsüz Okuma
P_{TP}	Basınç-Sıcaklık Düzeltmesi
SSD	Kaynak Dedektör Mesafesi
MeV	Milyon Elektron Volt
% DD	Yüzde Derin Doz
G_y	Gray
I_C	İyon Odası

Simgeler	Açıklama
MU	Monitor Unit
MV	Mega (Milyon) Volt
Rad	Soğurulan Doz Birimi
Rem	Bir İnsana Eşdeğer Röntgen Dozu
SAD	Kaynak Tümör Mesafesi
Sv	Sievert
d_{max}	Maksimum Doz Derinliği
S_c	Kolimatör Saçılma Faktörü,
$S_{c,p}$	Toplam Saçılma Faktörü
keV	Kilo Elektron Volt

1.GİRİŞ

Radyasyon dozu veya kısaca *doz*, temel olarak iki anahtar kavramın tanımına dayanır. Bunlardan birisi, hedef ortamın gramı başına depolanan enerji olup *soğurulan doz* olarak adlandırılır ve diğeri, *doz eşdeğeri* olarak tanımlanan radyasyon tipinin hasar etkisidir.

Radyasyon dozu hesaplanırken şu üç adım takip edilir:

- 1- Radyasyon pulslarının (parçacıklar veya fotonlar) sayısı belirlenir.
- 2- Enerjinin depolanacağı ortamın kütlesi belirlenir. Bu, parçacıklar için ortamda ilerleyebildikleri derinliktir. Fotonlar için, etkileşmelerin olası modeline dayanan birim uzunluğu (1cm gibi) kullanmak uygundur.
- 3- Etkileşme olasılıklarının modelinden depolanan enerji miktarı belirlenir.

Bir kaynaktan yayınlanan tüm radyasyonlar için bu üç işlem göz önüne alınmalıdır. Ancak farklı radyasyonlar doku içinde farklı derinliklere ulaşacağından radyasyon dozu, farklı yerleşim noktaları için düzenlenirler [Martin, 2011].

Soğurulan dozun doğru tespiti için, doku içinde enerji kayıplarından kaynaklanan herhangi bir azalmayı iyi anlamak gereklidir. Enerji depolanması, radyasyonun tipine, enerjisine, radyasyonun gönderileceği ortama bağlıdır. Radyasyon ister parçacıklar şeklinde ister fotonlar şeklinde olsun, ortamda soğurma ve saçılma gibi etkileşmelerle iyonizasyona veya uyarılmalara neden olacaktır. Parçacıkların enerjilerindeki değişiklikler, *Durdurma Gücü* terimiyle anlatılır. Durdurma gücü, ortamın dx uzunluğu başına kaybedilen enerji demektir. Fotonların hedefle etkileşmelerinde temel işlemler, azalmaları ve enerji depolamalarıdır. Düşük enerjili fotonların "*fotoelektrik soğurma*" ile etkileşmeleri baskın işlemdir. "*Compton saçılmasıyla*" etkileşme, genellikle orta enerjili fotonlarla (0,5-1,0 MeV) gerçekleşir. Yüksek enerjili (>1,02MeV) fotonlar "*çift oluşum*" yaparak etkileşirler. Hedefe gönderilen foton demetinin bir kısmı soğurulurken bir kısmı etkileşme yapmadan yoluna devam edebilmektedir.

Hedefe gönderilen fotonlar tarafından ortamda soğurulan doz,

$D = \Phi \times (\mu/\rho) \times E$ eşitliği ile hesaplanır. Burada Φ , cm^2 'ye düşen foton sayısı, E , foton enerjisi ve μ/ρ , ortamın kütle azalma katsayısıdır [Martin, 2011].

İyonize eden radyasyon kaynaklarının, özellikle nükleer tıp, radyoterapi ve radyoloji gibi insan sağlığını ilgilendiren alanlarda yoğun kullanımlarının artması, radyasyonun hedef materyalle etkileşmesinde göz önünde tutulması gereken parametrelerin daha dikkatli ölçülmesi ve hesaplanması gereğini öne çıkarmaktadır. Hedef materyale verilecek tedavi edici radyasyon dozunun hesaplanmasında, materyalin etkin atom numarası, elektron veya atom yoğunluğu, radyasyonun materyal içinde hareketi ve soğurulması gibi işlemlerin iyi bilinmesi gereklidir. Radyasyonun ortam içinde ilerlemesinin tanımlanmasında kütle azalma katsayısı ve durdurma gücü en önemli parametrelerdir. Bu büyüklüklerin belirlenmesi için pek çok çalışma yapılmıştır ve tablolar halinde verilmiştir [Hubbell, 1982; Hubbell ve Seltzer, 1995; Gerward ve ark., 2001; Chantler, 1995].

Literatürde, biyolojik materyaller için kütle azalma katsayılarının deneysel dataları listelenmiştir. 13–44 keV enerji aralığı için doku eşdeğer örneklerin kütle azalma katsayılarının değerleri Parthasaradhi ve ark. (1992) tarafından, kemik, kas, yağ, göz merceği ve uterus gibi biyolojik materyaller için Akar ve ark. (2006) tarafından çalışılmıştır [Parthasaradi ve ark., 1992; Akar ve ark., 2006]. Yapılan pek çok çalışma ile oluşturulan, kütle azalma katsayılarının değerleri ile ilgili olarak, son yıllarda deneysel ve teorik çalışmaların karşılaştırmasıyla, yeniden güncellenme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

İyonize edici radyasyon kullanılarak yapılan tedavilere radyoterapi denir. Radyoterapide amaç, hedef organın en doğru dozu alıp kritik organ ve sağlıklı dokuların en az dozu almasıdır. Hasta yüzeyi içinde ve dışında değişik materyaller kullanılmaktadır. Bu materyallerin de kütle azalma katsayıları planlamaya dahil edilmelidir. Bu materyaller çeşitli metalik protezler olabildiği gibi, dolgu malzemesi olarak kullanılabilen organik materyaller de olabilmektedir.

Bu çalışmada kemiğin desteklenmesi için kullanılan alçıya alınmış kol ve bacaklara verilmesi muhtemel radyasyon dozunun iyi planlanabilmesi için alçının kütle azalma katsayısı deneysel ve teorik olarak hesaplanmış ve alçının doza etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla doku eşdeğeri olan katı fantomun ve alçılı katı fantomun kalınlıkları değiştirilerek 6 MV ve 18 MV’de x-ışınları kullanılarak farklı alan açıklıklarındaki doz değerleri okunmuştur.

Çalışmada, *Giriş*’ in sunumundan sonra, konu ilgili *Temel Bilgiler* verilmiştir. 3. bölümde *Materyal*, 4. bölümde *Deneysel Bulgular* ve 5. bölümde de *Tartışma ve Sonuç* sunulmuştur.

2. TEMEL BİLGİLER

2.1. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Farklı tip radyasyon maddeyle farklı biçimlerde etkileşir. Radyasyon kullanılarak yapılacak işlemlerde bu etkileşmeler göz önüne alınarak planlama yapılır.

2.1.1. Yüklü parçacıkların etkileşmeleri

Protonlar, döteronlar ve alfa parçacıkları gibi, ağır yüklü parçacıklar madde içinden geçerken enerji kaybetmelerinin önemli nedeni atomların yörünge elektronlarıyla yaptıkları etkileşmelerdir. Atomlar, ya elektronları üst enerji seviyelerine geçirerek uyarılırlar ya da tamamen kopararak iyonize edilirler. Kopan elektronların çoğu, kendi yolları üzerindeki atomları iyonlaştırmak için yeterli enerjiye sahip olabilirler. Gelen parçacığın kütlesi elektronunkinden çok büyük olduğundan, etkileşmelerden dolayı yolundan hemen hemen hiç sapmaz ve hızı oldukça kısa mesafede sıfıra yaklaşarak durur (veya yolu üzerindeki bir çekirdekle etkileşmeye girer) [Beiser, 1997].

2.1.2. Elektronlar

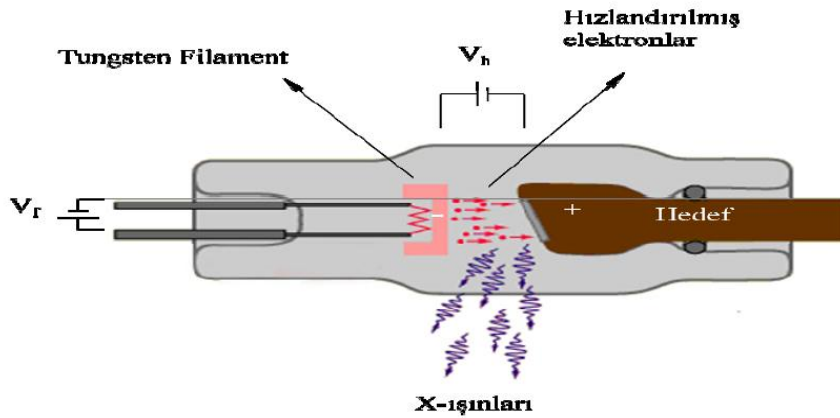
Betalar (pozitif ve negatif) ağır yüklü parçacıklar gibi, atomik elektronlarla Coulomb saçılmasıyla etkileşirler. Ancak bazı önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bunlar:

- Özellikle β bozunumlarından yayınlanan elektronlar göreceli hızlarla hareket ederler,
- Elektronlar, diğer elektronlarla çarpışmalarında büyük sapmalar ve düzensiz yörüngeler çizerler. Böylece menzil (madde içinde gidilebilen doğrusal uzaklık) elektronların takip ettikleri yol uzunluğundan farklıdır,
- Elektronun bir diğer elektronla kafa-kafaya çarpışmasından ilk enerjisinin büyük bir kısmı diğer elektrona aktarılabilir,

- Elektron hızının doğru ve büyüklüğünde hızlı bir değişiklik olabileceğinden, büyük bir ivmeye maruz kalabilir ve ivmeli yüklü parçacık elektromanyetik radyasyon yayınlar. Bu radyasyona frenleme ışınımı (Bremsstrahlung) denir [Krane, 2001].

2.1.3. X ışınları

Şekil 2.1, x-ışınlarının üretildiği temel bir tüpü açıklamaktadır. Cam bir tüpün içine yerleştirilen anot ve katot levhaları arasında çok yüksek elektriksel gerilim uygulanır. Hızlandırılan elektronlar kinetik enerji kazanarak katodu terk eder, anot üzerine yerleştirilen erime sıcaklığı yüksek bir metal hedefe çarparak x-ışınları oluşur. X-ışınlarının enerji ve dalgaboyu hedefin atom numarasına ve hızlandırılan elektronların enerjilerine bağlıdır [UROK, 2002].



Şekil 2. 1. X-ışını tüpü

X-ışınlarının madde ile etkileşmesi soğurulma şeklinde olur. Soğurulmada beş farklı fiziksel olay gerçekleşmektedir. Bu beş fiziksel olayın ayrı ayrı enerji azalım değerleri toplam enerji azalımını verir. Bu fiziksel olaylar;

- Koherent saçılma
- Fotoelektrik olay
- Compton saçılması
- Çift oluşumu
- Fotobozunum

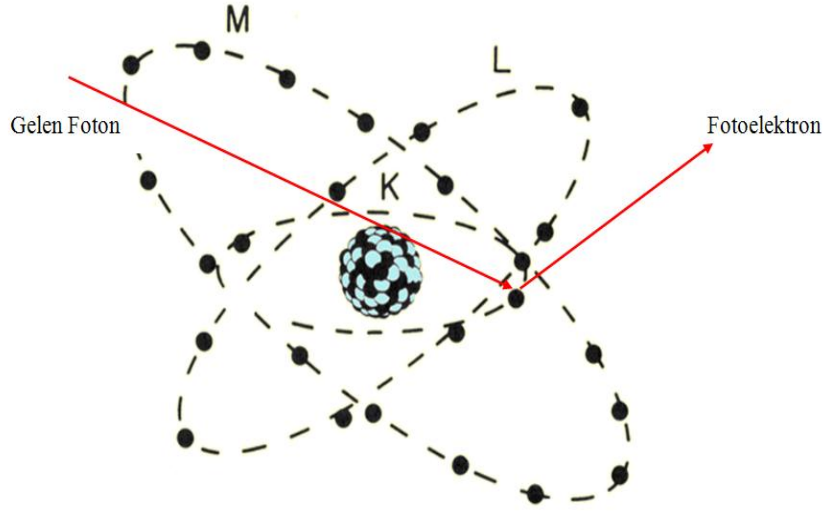
Her bir etkileşme kendi azalma katsayısı ile orantılı olarak enerji azalımı yapmakta ve bu azalma katsayıları, x-ışınları enerjisi ve soğurucu malzemenin atom numarasına bağlıdır. Toplam azalma katsayısı her bir özgün katsayının toplamıdır.

$$\mu/\rho = \sigma_{coh}/\rho + \tau/\rho + \sigma_c/\rho + \pi/\rho \quad (2.1)$$

σ_{coh} , τ , σ_c , π simgeleri sırasıyla; koherant saçılma, fotoelektrik olay, compton etkisi ve çift oluşumun azalma katsayılarını tanımlamaktadır [Khan, 2003].

Fotoelektrik olay

Düşük enerjili fotonların içinden geçtikleri ortamın atomları tarafından soğurulmasında en sık görülen etkileşim fotoelektrik olaydır. Düşük enerjili foton $h\nu$ enerjisinin tümünü içinden geçtiği ortamın atomlarına sıkı bağlı elektronlarından birine vererek kaybolur. Bu olay sonunda, atomun yörünge elektronlarından biri fırlar. Fırlayan bu elektrona fotoelektron denir. Gelen fotonun enerjisi iki şekilde harcanır. İlki, elektronu bağlı olduğu yörüngeden koparabilmek için bağlanma enerjisi, ikincisi fırlatılan elektronun kinetik enerjisidir. Bu tip etkileşimler atomun K, L, M, N yörüngelerindeki elektronlarla olur. Elektron atomdan fırladıktan sonra yörüngede bir boşluk oluşur. Bu durumda atom uyarılmış hale gelir. Uzun süre uyarılmış halde kalamayacağından boşluk dış yörüngedeki elektronlardan biri ile doldurulur, bu arada x-ışını yayınlanır [Krane, 2001]. Radyoterapide, kullanılan x-ışınlarının enerjileri çok düşük olmadığından fotoelektrik soğurulma baskın etkileşme değildir. Fotoelektrik soğurulmanın olma olasılığı fotonun enerjisine ve materyalin atom numarasına bağlıdır [Khan,2003].



Şekil 2. 2. Fotoelektrik olay

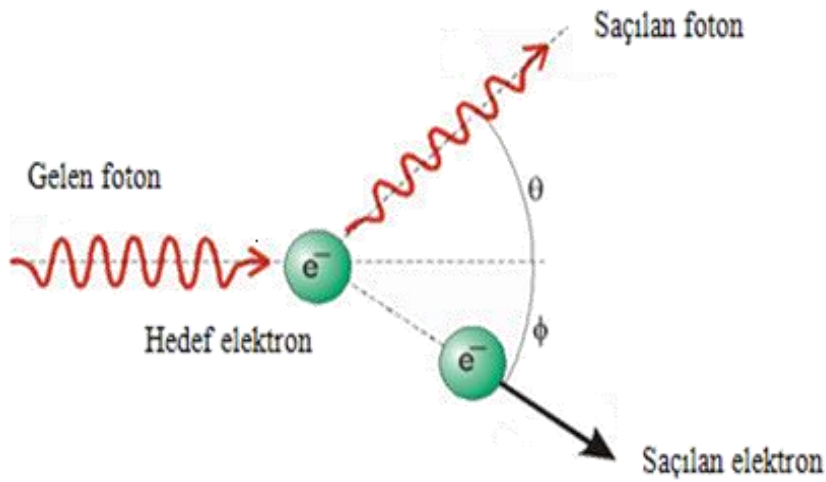
μ_{τ} ; Fotoelektrik soğurulma katsayısı olmak üzere,

$$\mu_{\tau} \cong sbt \frac{Z^5}{E^3} \quad (2.2)$$

ile verilir [Martin,2011].

Compton olayı

Compton olayı, hemen hemen serbest bir elektron ile foton arasındaki etkileşimdir. Gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden çok büyük olmalıdır. Gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden daha büyük veya eşit ise fotoelektrik olayın oluşma olasılığı daha çoktur. Bu nedenle fotonun enerjisi K yörüngesi bağlanma enerjisinden ne kadar büyükse fotoelektrik olay olasılığı o kadar azalırken compton olayı o kadar önem kazanır. Etkileşimde gelen fotonun enerjisinin bir bölümü elektrona kinetik enerji olarak verilir. Elektron \emptyset açısı ile yayınlanırken, foton azalan enerjisiyle yön değiştirerek θ açısıyla saçılır.



Şekil 2. 3. Compton olayı

Compton olayı soğurucu materyalin özellikle serbest elektronlarıyla olduğundan Z atom numarasından bağımsız ve kütle soğurma katsayısı gram başına elektron sayısına bağlıdır. Radyoterapide x-ışınları kullanılan işlemlerde compton olayı baskındır. Bu nedenle ρ_e (elektron yoğunluğu) önemlidir [$\rho_e = \rho \cdot N_A \cdot \sum W_i \cdot \frac{Z_i}{A_i}$]. Çoğunlukla kütle yoğunluğu ile elektron yoğunluğu yaklaşık aynı kabul edilir.

[Krane, 2001]

Compton olayının enerji ve atom numarası bağımlılığı,

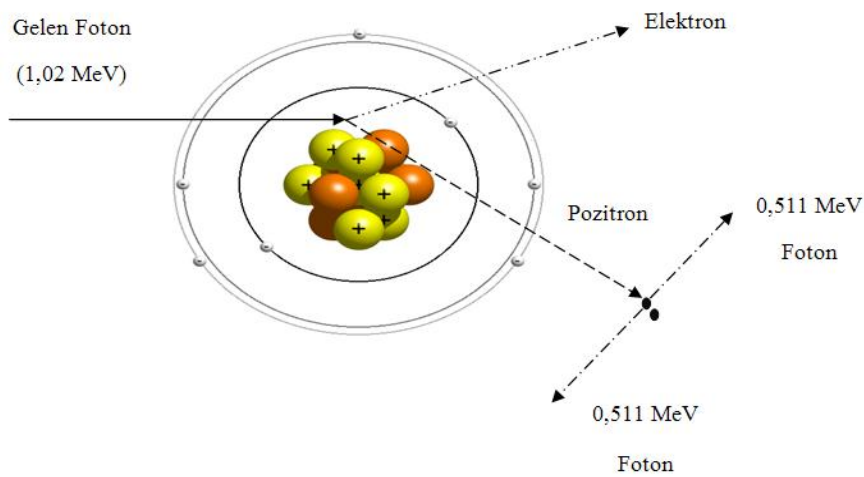
$$\mu_{\sigma} \cong sbt \frac{Z}{E} \quad (2.3)$$

ile verilebilir [Martin,2011].

μ_{σ} : Compton soğurulma katsayısı

Çift oluşum

Fotonun enerjisi 1,02 MeV'den büyük ise foton, hedef ile çift oluşum olayını meydana getirecek şekilde etkileşir. Bu olayda foton, atomun çekirdeğinin elektromanyetik alanı ile kuvvetlice etkileşir ve tüm enerjisini vererek negatif ve pozitif elektronlardan oluşan bir çift meydana getirir (Şekil 2.4). Elektronun serbest kütle enerjisi 0,511 MeV'dir. Elektron-pozitron çifti oluşumu için en az 1,02 MeV enerji gerekir. Bu nedenle çift oluşum olayının eşik enerjisi 1,02 MeV'dir. Bu eşik enerjinin üstündeki foton enerjileri, parçacıklar arasında kinetik enerji olarak paylaşılır.



Şekil 2. 4. Çift oluşum

Çift oluşum ile ortaya çıkan elektron bundan önceki olaylardaki gibi diğer atomlarda iyonlaşma olayına yol açar. Azalan enerjisiyle yavaşça hareket eden pozitron çevresindeki serbest elektronların biri ile karşılaşırsa zıt yüklü olduklarından birbirlerini yok ederler. Bu yok olma olayı sonunda her biri en az 0,511 MeV olan iki foton oluşur. Bunlara yok olma radyasyonları adı verilir. Bu olay çift oluşum olayının tersidir. Çift oluşum olayı, fotonun, çekirdeğin elektromanyetik alanı ile etkileşimi sonucudur. Bu olayın olma olasılığı Z atom numarası ile hızla artar [Krane, 2001].

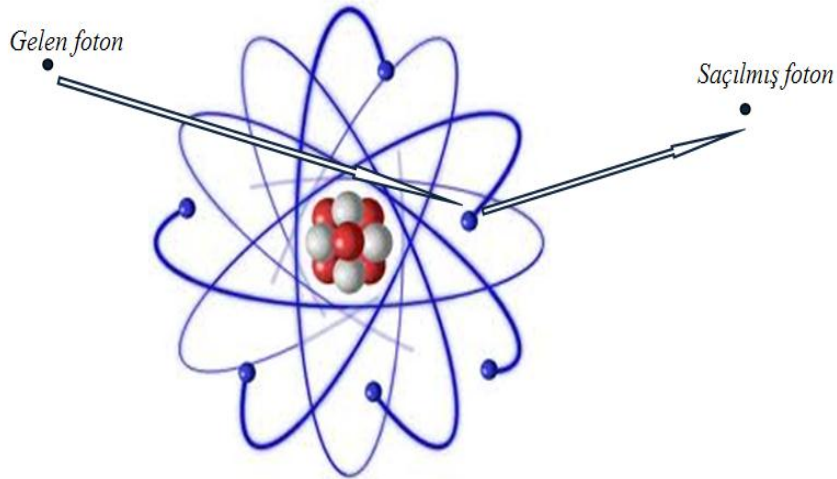
μ_{π} ; Çift oluşum azalma katsayısı olmak üzere,

$$\mu_{\pi} \cong s b t Z^2 (E-1,022) \quad (2.4)$$

ile verilir [Martin,2011].

Koherent saçılma

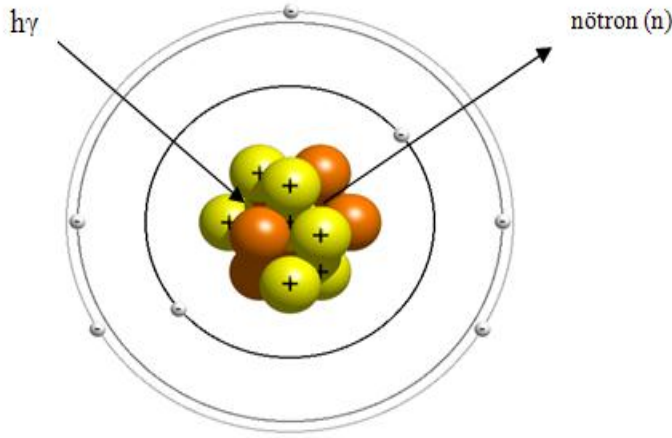
Klasik saçılma veya Rayleigh saçılması olarak da bilinir. Bu etkileşim, elektronun yakınından geçen ve onu titreştiren elektromanyetik dalgadan ibarettir. Titreşen elektron, gelen elektromanyetik dalga ile aynı frekansta enerji yayar. Böylece enerji değişmez ve ortamda enerji soğurulmaz. Sadece foton küçük açı ile saçılır (Şekil 2.5). Koherent saçılma düşük enerjili fotonlar ve yüksek atom numaralı maddeler arasında meydana gelir [Krane, 2001].



Şekil 2. 5. Koherent saçılma

Fotobozunma

Bu etkileşme foton ve atom çekirdeği arasında olur. Bu reaksiyon çok yüksek foton enerjilerinde oluşur. Nükleer reaksiyona bir veya birçok nükleonun yayınlanmasına yol açabilir. Çoğu durumda çekirdekten nötronların yayınlanmasına neden olur. Radyoterapide, çok yüksek enerjili gamma kullanımı bu yüzden sakıncalı olabilir.



Şekil 2. 6. Fotobozunma

2.2.Radyasyon Doz Birimleri

Atom çekirdeği hakkındaki ilk bilgiler 1896'da Henri Becquerel' in radyoaktiviteyi keşfiyle başlamıştır. 1896 yılını izleyen 3 yılda, saf bir radyoaktif numunenin zamanla bozunma hızının üstel kanuna uyduğu gösterilmiştir. Radyoaktifliğin tüm numunede değil de tek tek atomlarda değişikliği temsil ettiğinin anlaşılması için daha birçok yılın geçmesi gerekmiştir. Bozunmanın istatistiksel yapıda olduğunun yani herhangi bir atomun ne zaman bozunacağını bilinememesi ve bu hipotezin doğrudan üstel kanuna uyduğunun anlaşılması ise 2 yıl almıştır. Bir t anında N radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye yeni çekirdekler ilave edilmiyorsa dt süresi içinde bozunan dN çekirdek sayısı N ile orantılıdır:

$$\lambda = -\frac{dN/dt}{N} \quad (2.5)$$

Burada λ , bozunma veya parçalanma sabiti olarak adlandırılır. Eş.(2.5)'in sağ tarafı bir atomun birim zamanda bozunma olasılığıdır. Yani bu olasılık atomun ömrü ne olursa olsun sabit olup radyoaktif bozunmanın istatistiksel teorisinin temel varsayımıdır. Eş. (2.5)'in integrali alınır,

$$N(t)=N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

üstel radyoaktif bozunma kanunu elde edilir. Burada N_0 integrasyon sabiti, $t=0$ 'da henüz bozunmamış çekirdeklerin sayısıdır.

Aktiflik (A), numunede birim zamandaki bozunma sayısı (bozunma/s), yani bozunma hızı olarak tanımlanır.

$$A(t) \equiv \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

$t = 0$ 'da ki başlangıç aktifliği $A_0 = \lambda N_0$ 'dır [Krane, 2001].

Bir radyoaktif örneğin bozunma hızı, aktiflik olarak adlandırılır ve geleneksel aktivite birimi *Curie (Ci)*, 1 g Radyum'un saniyede yaptığı bozunum sayısıdır ve yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$1 \text{ Ci} \equiv 3,7 \times 10^{10} \text{ bozunma/s}$$

Bu birim, orijinal aktiflik birimi olarak seçilmiştir. SI birim sisteminde ise aktivite birimi *Becquerel (Bq)* olarak adlandırılmıştır.

$$1 \text{ Bq} \equiv 1 \text{ parçalanma/s dır.}$$

Maruz kalınan doz (POZ)

Geleneksel Poz birimi, *Röntgen* olup, normal şartlarda havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ C'luk iyonizasyon oluşturan x-ışını ve γ ışını miktarıdır. SI sisteminde birimi *Coulomb/kg (C/kg)* dır ve, $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ değerindedir.

Soğurulan doz

Soğurulan doz hedef tarafından soğurulan radyasyon enerjisinin ölçüsüdür. SI birim sisteminde birimi Gray (Gy)'dir. Geleneksel birim olan *rad* (radiation absorbed dose) hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$$

şeklinde tanımlanmıştır. 3 Gy (300 rad) canlı bir organizmanın yaklaşık %50'sinin ölümüne neden olur. Bir insan yılda ortalama olarak 2 mGy (0,2 rad) doğal normal şartlardan kaynaklanan radyasyon dozuna maruz kalır.

Doz eşdeğeri

Farklı tip radyasyonlar canlı organizmaya aynı miktar enerji verdikleri halde aynı biyolojik etkiye sahip değildir. Doz eşdeğeri, soğurulan dozun (Gy veya *rad*) bağlı biyolojik etki (RBE) faktörü ile çarpılması sonucu elde edilir. Doz eşdeğerinin SI birim sistemindeki değeri *Sievert* (Sv)'dir. Geleneksel birim olan *rem* hala yaygın olarak kullanılmaktadır ve 1 Sv =100 rem'dir.

$$\text{Doz eşdeğeri (Sv)} = \text{soğurulan doz (Gy)} \times \text{RBE}$$

veya,

$$\text{Doz eşdeğeri (rem)} = \text{soğurulan doz (rad)} \times \text{RBE}$$

Çizelge 2.1. Radyasyon ölçümü için tanımlanan nicelikler ve bunların SI birimleri

Nicelik	Ölçüm	Geleneksel Birim	SI Birimi	Birim Dönüşümü
Aktiflik (A)	Bozunma hızı	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1 Ci = 3,7x10 ¹⁰ Bq
Işınlama Dozu (X)	Havadaki iyonlaşma	Röntgen (R)	Coulomb/kilogram, (C/kg)	1 C/kg=3876 R 1 R=2,58x10 ⁻⁴
Soğrulma dozu (D)	Enerji soğurulması	Rad (Rad)	Gray (Gy)	1Gy=100 Rad
Eşdeğer Doz (ED)	Biyolojik etkinlik	Rem(Rem)	Sievert (Sv)	1Rem =0,01 Sv

2.3. Lineer Enerji Transferi (LET)

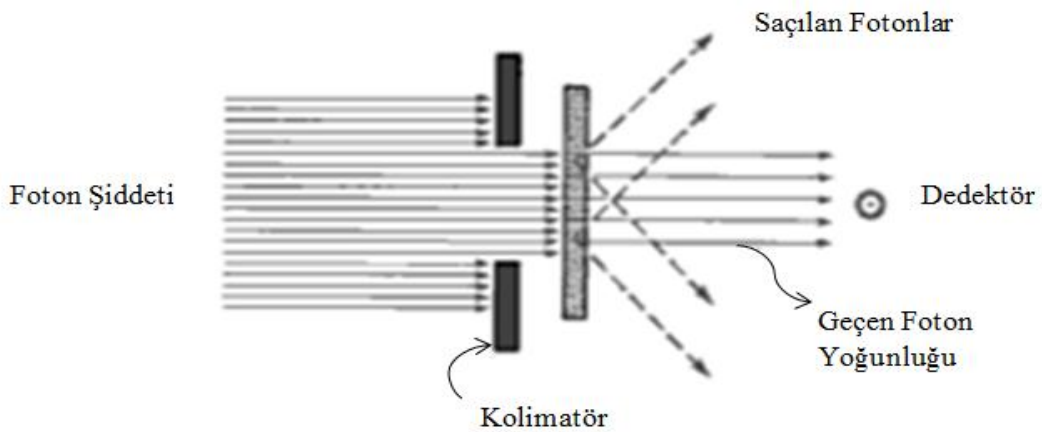
İyonize radyasyonlar ister elektromanyetik, ister parçacık özelliği gösteriyor olsunlar, içinden geçtikleri maddeye enerjilerini aktarırlar. Bu enerji, hücre ve doku içerisinde soğurulduğunda, uyarılmaya veya iyonizasyona neden olur. Elektronlar ve protonlar gibi yüklü parçacıklar doğrudan iyonizasyona yol açarlar. Bunlar yeterli kinetik enerjileri sayesinde kimyasal bağları koparabilirler.

İyonize radyasyonun içinden geçtiği maddede takip ettiği yolun her birim uzunluğunda aktardığı enerji miktarına Lineer enerji transferi (LET) adı verilir. [Bomford ve ark., 1994].

2. 4. Lineer Azalma Katsayısı

Lineer azalma katsayısı, fotonların hedef materyalin birim uzunluğu başına etkileşme olasılığını tanımlar. Radyasyon dokudan geçerken hem saçılır ve hem de doku tarafından soğurulur. Monoenerjik x-ışınları veya gamma ışınlarının şiddeti, dokuda üstel azalma gösterir. Bu azalma enerjiye, dokunun cinsine ve kalınlığına bağlıdır [Dietze ve ark.,2003, Stabin, 2008].

Fotonların azalmasının ölçülmesi Şekil 2.7’de tarif edilmiştir. Dedektör, foton kaynağı ile arasında sabit bir uzaklık olacak şekilde ve soğurucu ortamdan yeteri kadar uzağa yerleştirilir. Bu şekilde sadece soğurucu ile etkileşimde bulunmadan geçen fotonlar detektör tarafından ölçülür. Bu düzenekte saçılan fotonlar ölçülemez. Yani, foton atomla etkileşirse, ya tamamen soğurulur ya da bir kısmı saçılır. Radyoterapideki ölçümler, saçılmaları da ölçtüğü için Khan tarafından saçılmaları azaltmak için dar demet kullanılması önerilmiştir [Khan, 2003].



Şekil 2. 7. Foton şiddetinin hedef kalınlığına bağlı değişimi

Fotonların sayısındaki azalma (dN); gönderilen fotonların sayısı (N) ve soğurucu hedefin kalınlığı (dx) ile orantılı olup matematiksel olarak;

$$dN = -\mu N dx \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir.

μ , Lineer azalma katsayısıdır. μ , Fotonun içinden geçtiği maddenin özelliklerine ve fotonun enerjisine bağlıdır; hedef-foton etkileşmesinin toplam tesir kesitini tanımlar. Eşitlikteki eksi işareti, fotonların sayısının, soğurucunun kalınlığının artmasıyla azaldığını belirtir. Bu eşitlik foton şiddeti (I) cinsinden de ifade edilebilir;

$$dI = -\mu I dx \quad (2.9)$$

Hedef kalınlığı, uzunluk birimi ile verilirse; μ lineer azalma katsayısı olarak adlandırılır. Örneğin; kalınlık *cm* olarak ölçülürse; μ birimi cm^{-1} olur [Khan, 2003].

(2.9) diferansiyel denklemi çözülürse;

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

elde edilir. $I(x)$; x kalınlığını geçen fotonların şiddetini ve I_0 soğurucuya gönderilen fotonların şiddetini temsil eder. $I(x)$, dar bir monoenerjik ışın demeti için x ' in fonksiyonu olarak grafiğe geçirilirse, bir doğru elde edilir.

Bir hedefi geçen x-ışınlarının birçoğu soğurulur. Işın demetindeki foton sayısını yarı değerine indiren hedef kalınlığına “yarı değer kalınlığı” (*HVL*) denir.

Yani;

$x=HVL$ ve $I/I_0=1/2$ iken Eş. (2.10) ;

$$HVL = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.11)$$

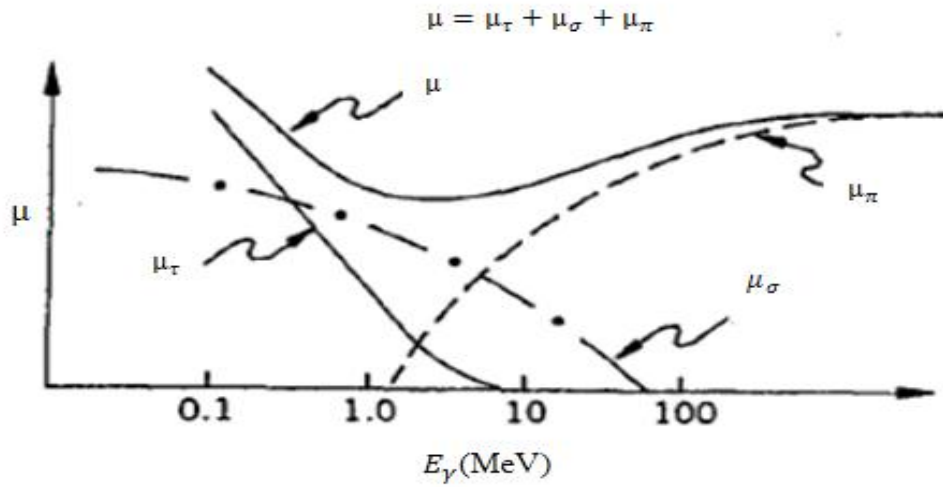
şeklinde ifade edilebilir.

Bir x-ışını cihazında üretilen bir ışın demetinin azalması üstel değildir. Azalma eğrisinin eğimi soğurucu kalınlığının artmasıyla azalmaktadır.

Lineer azalma katsayısı maddenin yoğunluğuna bağlı bir katsayı olduğu için, μ maddenin yoğunluğuna bölünürse, kütle azalma katsayısı (μ/ρ) elde edilir. Bu

maddenin sadece atomik bileşimine bağlı olup lineer azalma katsayısından daha temel bir katsayıdır. Birimi cm^2/g 'dır [Khan, 2003].

X ve gamma ışınlarının hedef ile etkileşmesinde fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumun katkısı büyüktür. Bu nedenle, lineer azalma katsayısı bu olayların azalma katsayılarının ayrı ayrı toplamıdır (Şekil 2.8) [Das ve Ferbel, 2005].



Şekil 2. 8. Toplam lineer azalma katsayısının gelen foton enerjisi ile değişimi [Das ve Ferbel, 2005]

Gamma ışını bir bileşikten geçiyor ise, soğurma katsayısı;

$$\mu_c = \sum w_i \mu_i \quad (2.12)$$

ile verilir [Martin,2003]. Burada w_i bileşikteki i . elementin ağırlık kesri, μ_i i . elementin toplam azalma katsayısıdır.

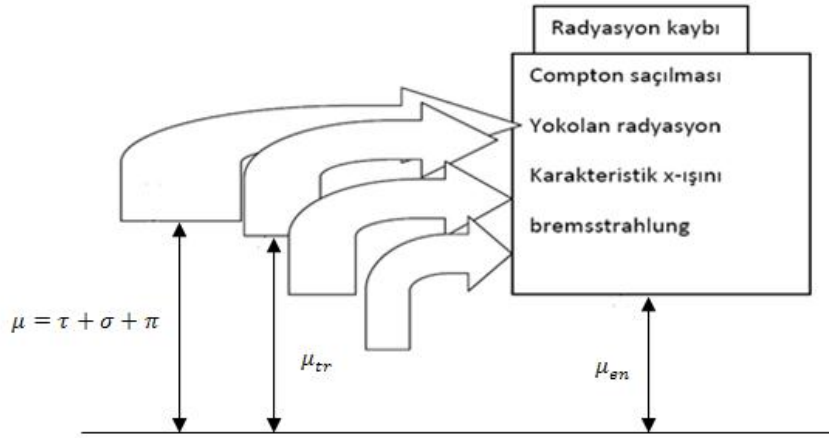
$$\mu = \mu_\tau + \mu_\sigma + \mu_\pi \quad (2.13)$$

Azalma katsayısı μ , ortama aktarılan enerjiyi tespit edebilmek için kullanılamaz. Bunun için lineer enerji soğurma katsayısı μ_{en} tanımlanmıştır.

$$\mu_{en} = \mu - (\sigma_s + \text{diğer düşük olasılıklı etkileşmeler})$$

şeklinde ifade edilir [Martin, 2003].

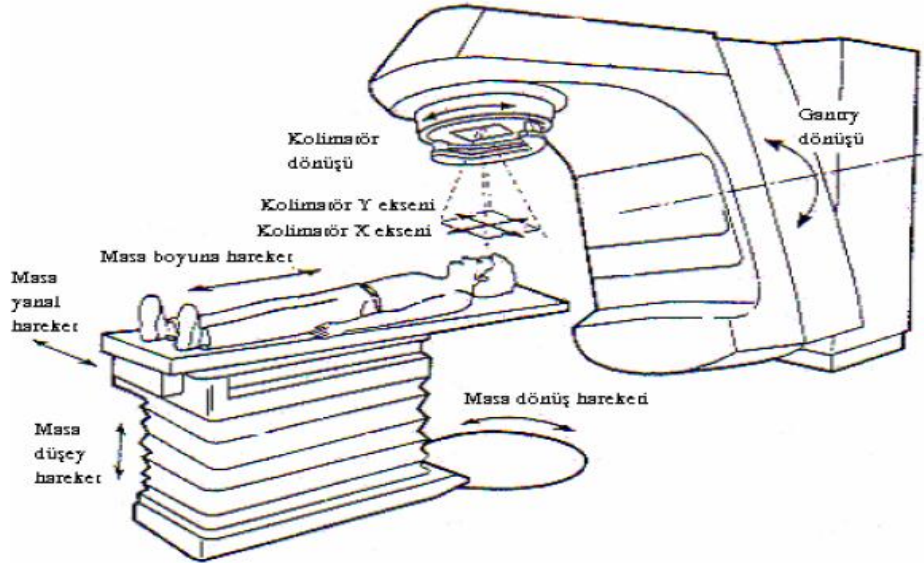
Tüm etkileşmelerin μ üzerindeki etkileri Şekil 2.9'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2. 9. Enerji transfer katsayısı (μ_{tr}), enerji azalma katsayısı (μ_{en}) ve lineer azalma katsayılarının (μ) ortamda radyasyonlarını kaybetme ilişkisi [Martin, 2003]

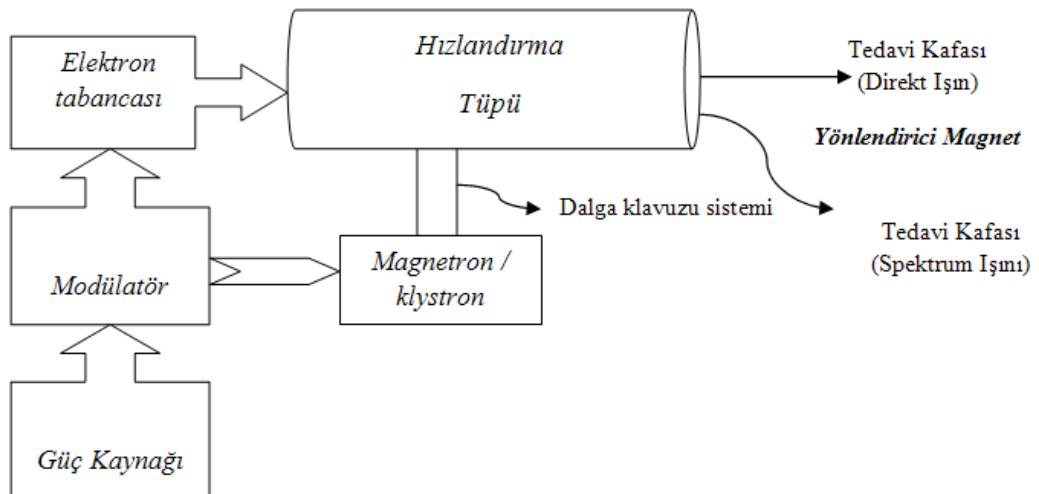
2.5. Lineer Hızlandırıcı (LINAC)

Lineer hızlandırıcı tedavi cihazları, uzun tüp boyunca yüksek frekanslı elektromanyetik alanlar kullanarak elektronların enerjilerini artırarak elektron ve x-ışını üretmek amacı için kullanılırlar [Khan, 2003]. Modern bir lineer hızlandırıcı cihazıyla hasta tedavisi temsili olarak Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 10. Bir lineer hızlandırıcının genel görünümü

Modern lineer hızlandırıcılar, genri ekseninde 360° dönerler ve eş merkezli rotasyon ışınlama tekniklerine uygun yapılmışlardır. Lineer hızlandırıcılarda, radyoaktif kobalt ünitelerinden daha yüksek enerjili ışınlar, daha keskin ve daha geniş alanlar elde etmek mümkündür. Ayrıca cilt koruyucu özellikleri kobaltın gamma ışınlarından daha fazladır. Lineer hızlandırıcıların avantajları olmasına rağmen, maliyetleri yüksek ve bakımları oldukça güçtür. Modern medikal lineer hızlandırıcıya ait blok şema, Şekil 2.11’de verilmiştir [Krane, 2001].



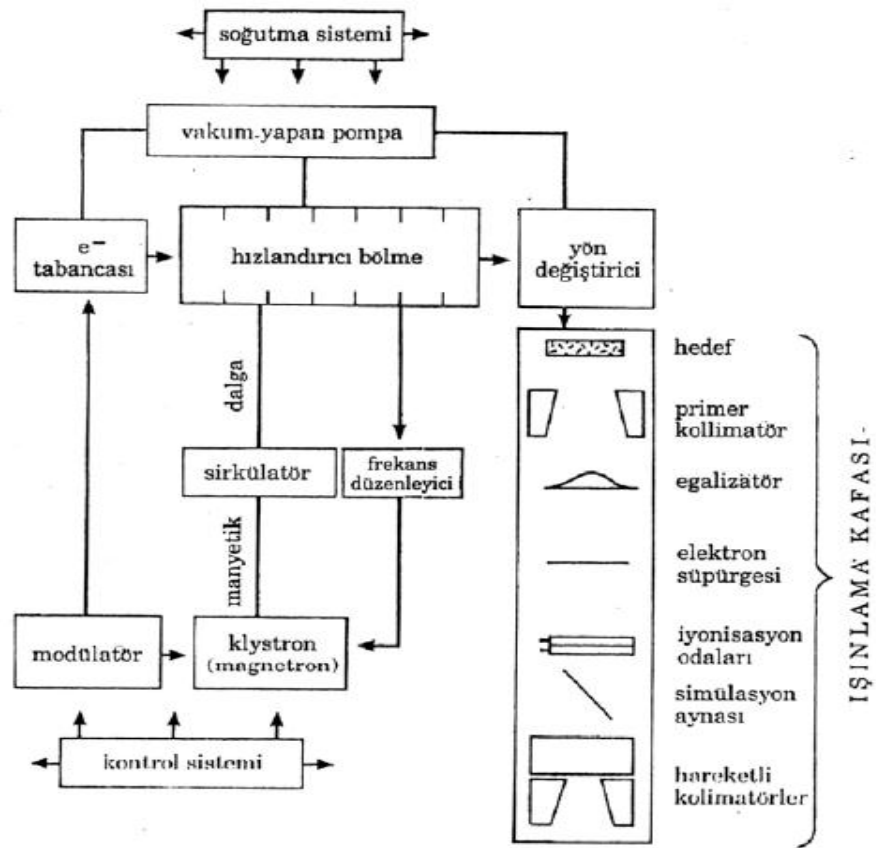
Şekil 2. 11. Lineer hızlandırıcının blok şeması

Genelde bakırdan yapılan hızlandırıcı tüpe yüksek oranda vakum uygulanmaktadır. Tüp içerisinde mikrodalganın elektromanyetik alanı ile etkileşen elektronlar, sinüsel elektrik alandan enerji kazanmaktadırlar.

Hızlandırılan elektronları ince bir demet halinde toplamak ve hedef üzerine göndermek için, tüp boyunca manyetik odaklayıcı alanlar kullanılmaktadır. Hızlandırıcı tüpün sonunda elektronlar maksimum enerjilerini kazanmış olurlar. Yüksek enerjili medikal lineer hızlandırıcılarda yatay olarak yerleştirilmiş uzun hızlandırıcı tüp bulunmaktadır. Daha yüksek enerjili ışınlar elde etmek ve daha küçük boyutlara sahip cihazlar üretmek amacı ile hızlandırılmış elektronlar 90° ve 270° saptırıcı magnetler ile saptırılarak hedef üzerine ya da hızlandırıcı tüpün dışına doğrudan gönderilmektedirler [Khan, 2003].

Hızlandırılmış yüksek enerjili elektronlar doğrudan yüzeysel tümörlerin tedavisinde kullanılabileceği gibi yüksek erime noktasına sahip, yüksek atom numaralı metal disk şeklindeki bir hedefe çarptırılarak yüksek enerjili x-ışınları da elde edilebilmektedir. Hızlandırılmış elektronlar hedefte durdurulduğunda ise, frenleme (Bremsstrahlung) x-ışınları oluşmaktadır. Frenleme ışınması olayında, elektron enerjisi, gelen elektronun enerjisine eşit maksimum enerjili x-ışınının spektrumuna dönüşmektedir. Elektron tedavilerinde elektron demeti bir saçıcı tabakaya çarptırılarak homojen elektron dağılımı sağlanacak şekilde genişletilmektedir.

Lineer hızlandırıcılarda elde edilen x-ışınları demeti monoenerjik olmayıp, enerji spektrumuna sahiptirler. Şekil 2.12’de modern bir lineer hızlandırıcı şeması görülmektedir.



Şekil 2. 12. Modern bir lineer hızlandırıcı şeması

3. MATERYAL

3.1. Kullanılan Materyaller

Bu çalışmada, deneysel işlemler için lineer hızlandırıcı, iyon odası, elektrometre, katı su fantomu ve alçı kullanılmıştır.

3.1.1. Lineer hızlandırıcı (LINAC)

Çalışmamızda LINAC, Siemens Oncor Impression M5395 cihazı kullanılmıştır. 6 MV ve 18 MV enerjili foton demetleri ve 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 15 MeV, 18 MeV ve 21 MeV enerjili elektron demetleri üretebilme özelliğine sahiptir.

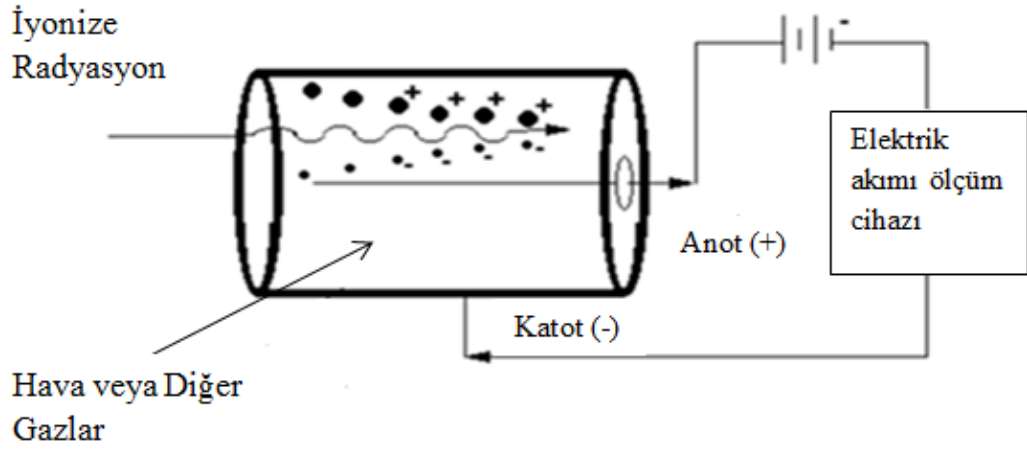


Resim 3. 1. Siemens Oncor Impression M5395, Lineer hızlandırıcı

3.1.2. İyon odası

Ölçümler esnasında PTW marka, TM30010 model, 2403 seri numaralı PMMA tipi $0,6 \text{ cm}^3$ hacimli silindirik iyon odası kullanılmıştır.

Orta enerjili x-ışınları, Cs-137 γ ışınları, Co-60 γ ışınları, Yüksek enerjili x-ışınları ve $E_0 \geq 10 \text{ MeV}$ olan elektronlar silindirik iyon odaları ile ölçülmektedirler. Düşük enerjili x-ışınları ve $E_0 < 5 \text{ MeV}$ olan elektronların ölçümünde paralel düzlem iyon odaları ve $5 \text{ MeV} \leq E_0 < 10 \text{ MeV}$ enerjili elektronların ölçümünde paralel düzlem veya silindirik iyon odaları kullanılmaktadır [IAEA, 1987].



Şekil 3. 1. İyon odası yapısı

Şekil. 3.1 iyon odalarının şematik gösterimidir. Radyasyona maruz kalan gaz iyonize olur. İyonize olan gazın iyon çiftleri elektrik alanın etkisiyle zıt yönlerde hareket ederler ve detektörün katodu ile anodunda toplanırlar. Katoda ve anoda ulaşan yükler sinyal ve akım oluşmasına neden olurlar. Oluşan akımın bir elektrik akım ölçüm cihazı tarafından kaydedilmesi ile radyasyonun oluşturduğu iyonlaşma sayısı tespit edilmiş olur.

3.1.3. Elektrometre

Elektrometre iyon odasında toplanan yükün ölçülmesini sağlamaktadır. Demet kalitesinin tespitinde kullanılan PTW Unidos elektrometre; R, R/dak, Gy, Sv/saat; amper ve coulomb cinsinden doz, doz hızı ve akım değerlerini okuyabilen bir dozimetridir. Polarite voltajı 0-400V olan dozimetreye sıcaklık ve basınç düzeltmeleri için değerler girilebilmektedir. Foton için ölçüm aralığı 70 kV-40 MV'tur. Elektron demetlerinde 50 MeV enerjiye kadar ölçüm yapılabilmektedir. Bu çalışmada PTW Unidos markalı, modeli T10008, seri numarası 80616 olan elektrometre kullanılmıştır.

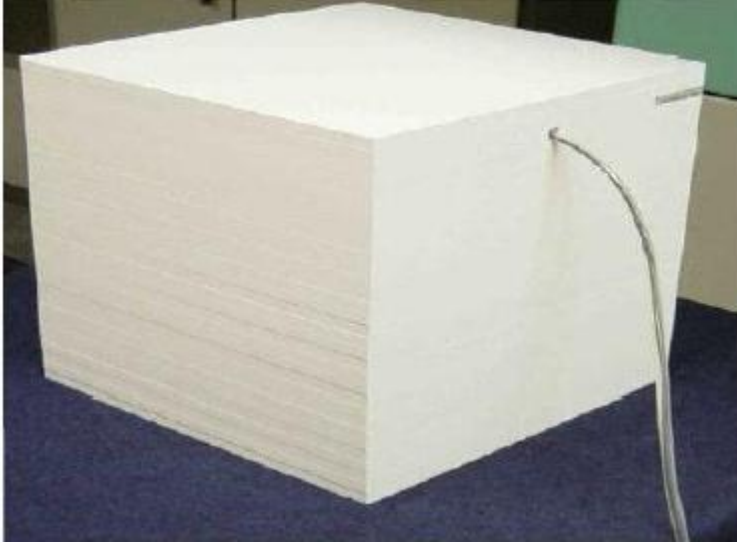


Resim 3. 2. PTW Unidos Elektrometre

3.1.4. Katı su fantomu

Bu çalışmada katı su fantomu, ölçüm alınırken iyon odasının yerleştirildiği yerde kullanılmıştır. Fiziksel yoğunluğu $1,045 \text{ g/cm}^3$, elektron yoğunluğu $3,43 \times 10^{23} \text{ e/cm}^3$ olan RW3 katı su fantomu, %2 TiO_2 içeren beyaz polystrenden $(40 \times 40) \text{ cm}^2$ boyutlarında ve 1 mm kalınlığında 1 adet, 2 mm kalınlığında 2 adet, 5 mm kalınlığında 1 adet ve 10 mm kalınlığında 25 adet olmak üzere toplam plakadan

oluşur. Suyun yoğunluğu, kas ve yumuşak doku yoğunluğuna çok yakın yoğunluktadır [Pychlau, 2007].



Resim 3.3. RW3 Katı fantom

3.1.5. Alçı

Hazır olarak satılan ALBAN marka alçı bezi iki aşamadan geçirilerek Resim 3.4'teki hale getirilmiştir. İlk olarak 0,5 cm; 1,0 cm; 1,5 cm kalınlıklarında hazırlanarak suya batırılıp belli bir süre bekletildikten sonra çıkarılmıştır. Resim 3.4'te görülen kalıbı vererek düzeltilmiştir. Alçının analizi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, AR-GE Eğitimi ve Ölçme Merkezinde, XRF cihazında yapılmış ve içeriği belirlenmiştir.



Resim 3.4. Alçı

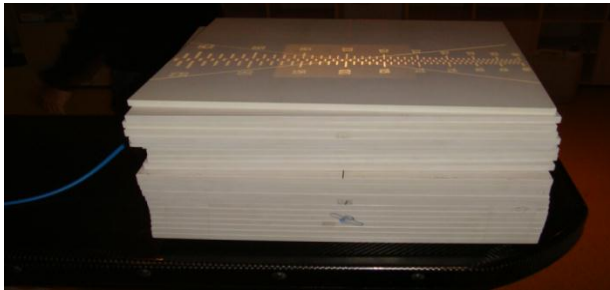
4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Katı Fantom ve Alçılı Katı Fantom ile Yapılan Ölçümler

Çalışmada vücudun alçıya alınmış bölgelerine verilmesi gereken radyasyon dozunun iyi planlanabilmesi için alçının lineer azalma katsayısı deneysel ve teorik olarak hesaplanmış ve alçının doza etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda 6 MV ve 18 MV’de üretilen x-ışını ile lineer hızlandırıcıda farklı parametreler için ölçümler alınmış ve lineer azalma katsayıları deneysel olarak elde edilmiştir. Alçının ve katı fantomun kalınlıkları değiştirilerek (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümlerde maximum dozdan (d_{max}) itibaren azalmaya başlayan değerlerin ln’i alınarak grafikleri çizilmiş ve eğimden yararlanılarak lineer azalma katsayıları hesaplanmıştır. Alınan yüzey ölçümlerinde ölçümlerde Gerbi ve Khan düzeltmesi yapılmamıştır.

A. Katı Fantom Ölçümleri

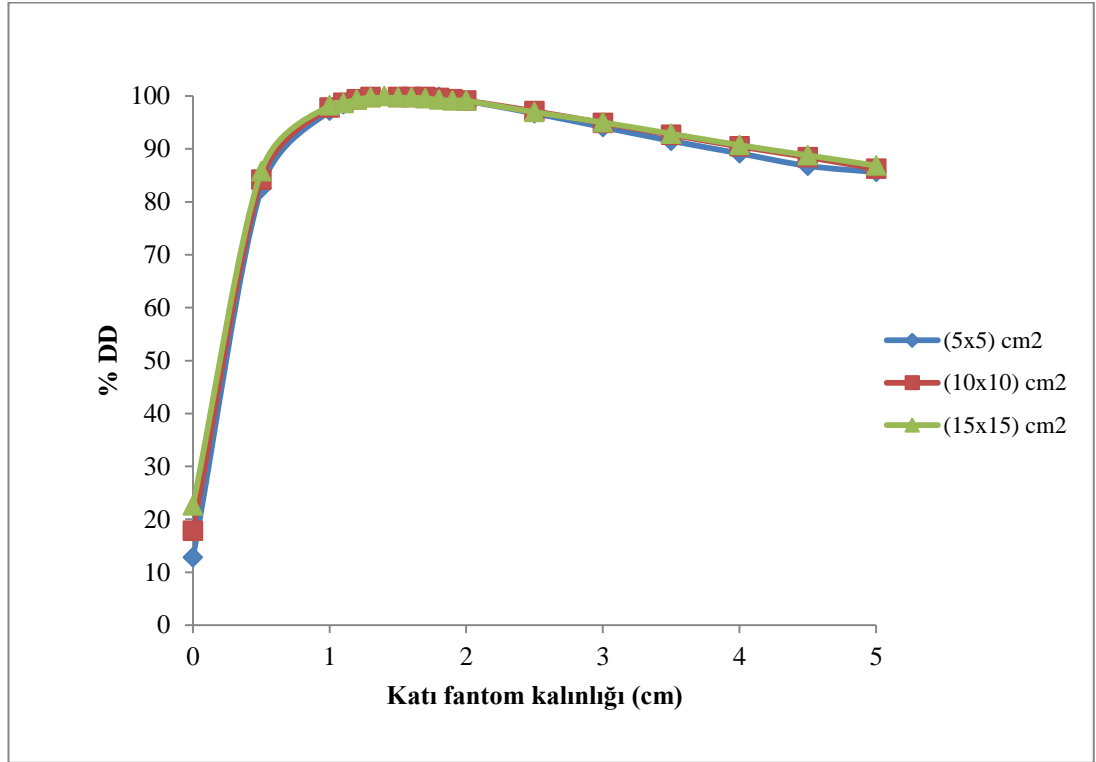
Katı fantomun üzerinde (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında 10 cm derinlikte, kaynak cilt mesafesi (SSD) 100 cm, basınç 903,7 mbar ve sıcaklık 23,3 °C’de, 100 MU süre verilerek TM30010-SN2403 silindirik iyon odasında ölçümler alınmıştır. Katı fantom kalınlığı 0,5 cm’den 5,0 cm’ye kadar artırılarak ölçümler tekrarlanmış ve değerler grafiğe geçirilmiştir (Resim 4.1). Çizelge 4.1’de 6 MV ve Çizelge 4.2’de 18 MV’de üretilen x-ışını ile katı fantom kalınlığı artırılarak alınan ölçüm sonuçları ve bu veriler kullanılarak kalınlıkla değişen doz miktarı grafikleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Resim 4. 1.Katı fantom ölçümü

Çizelge 4. 1. 6 MV'de katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	12,771	17,823	22,573	2,547	2,881	3,117
0,5	82,537	84,215	85,776	4,413	4,433	4,452
1,0	97,200	97,805	98,244	4,577	4,583	4,587
1,1	98,382	98,696	98,674	4,589	4,592	4,592
1,2	99,328	99,364	99,319	4,598	4,599	4,598
1,3	99,801	99,810	99,749	4,603	4,603	4,603
1,4	100,038	100,033	99,964	4,606	4,605	4,605
1,5	100,038	99,810	99,749	4,606	4,603	4,603
1,6	100,038	99,810	99,749	4,606	4,603	4,603
1,7	99,801	99,810	99,534	4,603	4,603	4,600
1,8	99,801	99,587	99,319	4,603	4,601	4,598
1,9	99,328	99,364	99,104	4,598	4,599	4,596
2,0	99,092	99,141	99,104	4,596	4,597	4,596
2,5	96,727	97,136	96,954	4,572	4,576	4,574
3,0	94,126	94,908	95,020	4,545	4,553	4,554
3,5	91,524	92,681	92,870	4,517	4,529	4,531
4,0	89,159	90,453	90,720	4,490	4,505	4,508
4,5	86,794	88,448	88,785	4,464	4,482	4,486
5,0	85,612	86,220	86,850	4,450	4,457	4,464

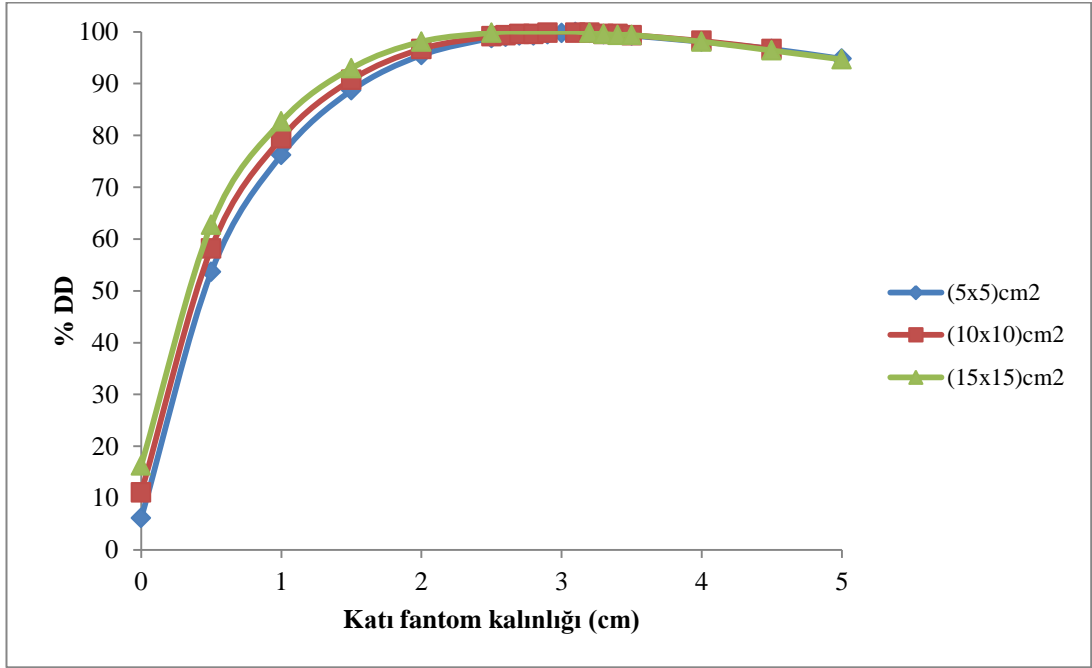


Şekil 4. 1. Katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’den görüldüğü gibi 6 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 1,5 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değerleri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı katı fantom kalınlığı için doz değerleri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Çizelge 4. 2. 18 MV’de katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

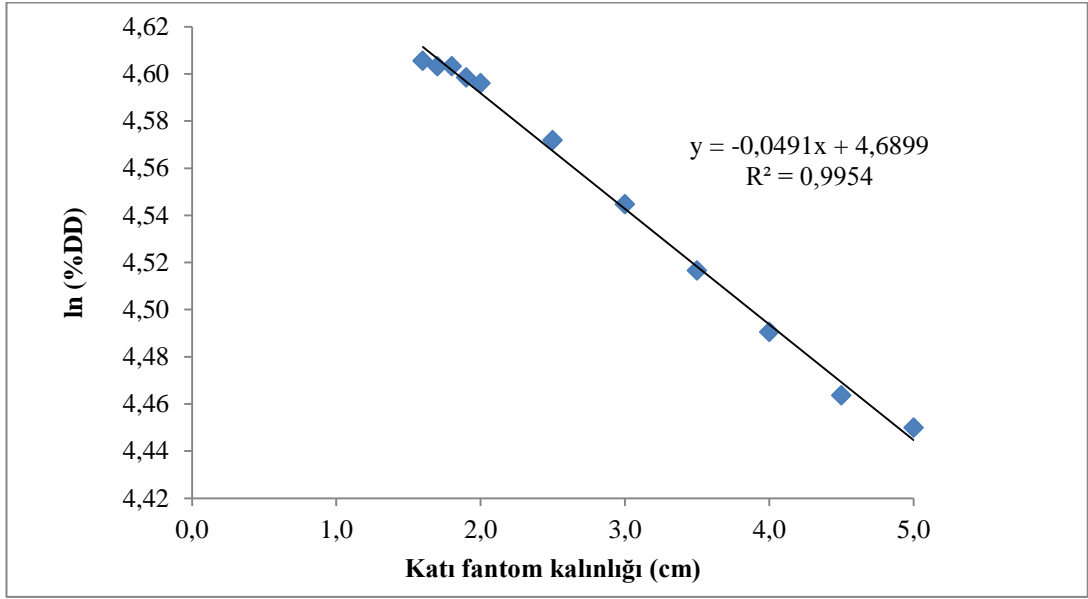
Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	6,116	11,064	16,280	1,811	2,404	2,790
0,5	53,634	58,199	62,764	3,982	4,064	4,139
1,0	76,216	79,443	82,686	4,334	4,375	4,415
1,5	88,683	90,729	92,968	4,485	4,508	4,532
2,0	95,505	96,704	98,109	4,559	4,572	4,586
2,5	98,799	99,138	99,823	4,593	4,597	4,603
2,6	99,034	99,359	100,037	4,595	4,599	4,606
2,7	99,269	99,580	100,037	4,598	4,601	4,606
2,8	99,269	99,580	100,037	4,598	4,601	4,606
2,9	99,504	99,802	100,037	4,600	4,603	4,606
3,0	99,740	100,023	100,037	4,603	4,605	4,606
3,1	99,975	99,802	100,037	4,605	4,603	4,606
3,2	99,740	99,802	99,823	4,603	4,603	4,603
3,3	99,504	99,580	99,609	4,600	4,601	4,601
3,4	99,504	99,580	99,394	4,600	4,601	4,599
3,5	99,269	99,359	99,394	4,598	4,599	4,599
4,0	98,093	98,253	98,109	4,586	4,588	4,586
4,5	96,681	96,704	96,395	4,571	4,572	4,568
5,0	94,800	94,933	94,682	4,552	4,553	4,551



Şekil 4. 2. Katı fantom 18 MV'de doz kalınlık grafiği

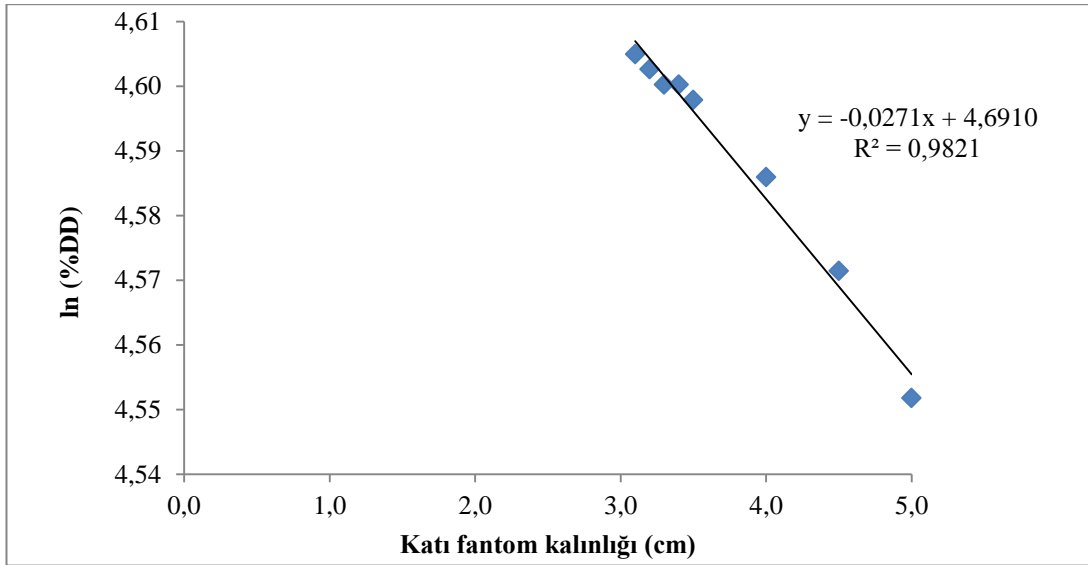
Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2'den görüldüğü gibi 18 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 3,0 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değeri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı katı fantom kalınlığı için doz değeri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Lineer azalma katsayısının hesaplanabilmesi için d_{max} noktasından itibaren ölçülen değerlerin ln'i alınarak grafiğe aktarılmış ve elde edilen doğruların eğiminden lineer azalma katsayısı hesaplanmıştır.



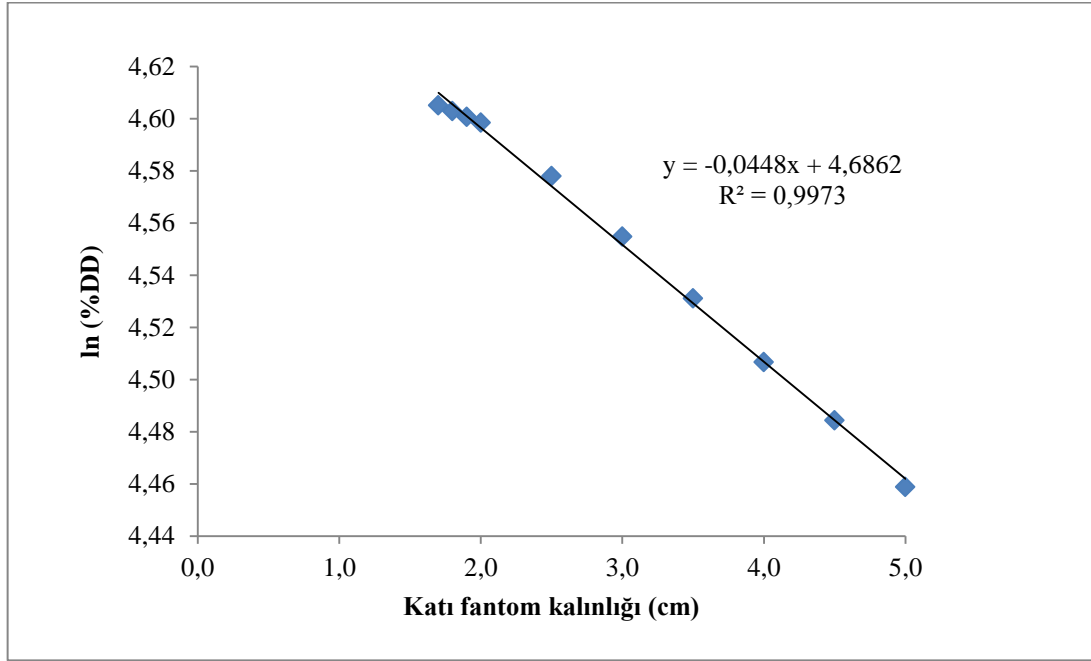
Şekil 4. 3. 6 MV’de kıatı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.3’te görüldüğü gibi, 6 MV’de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğruyun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0491 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



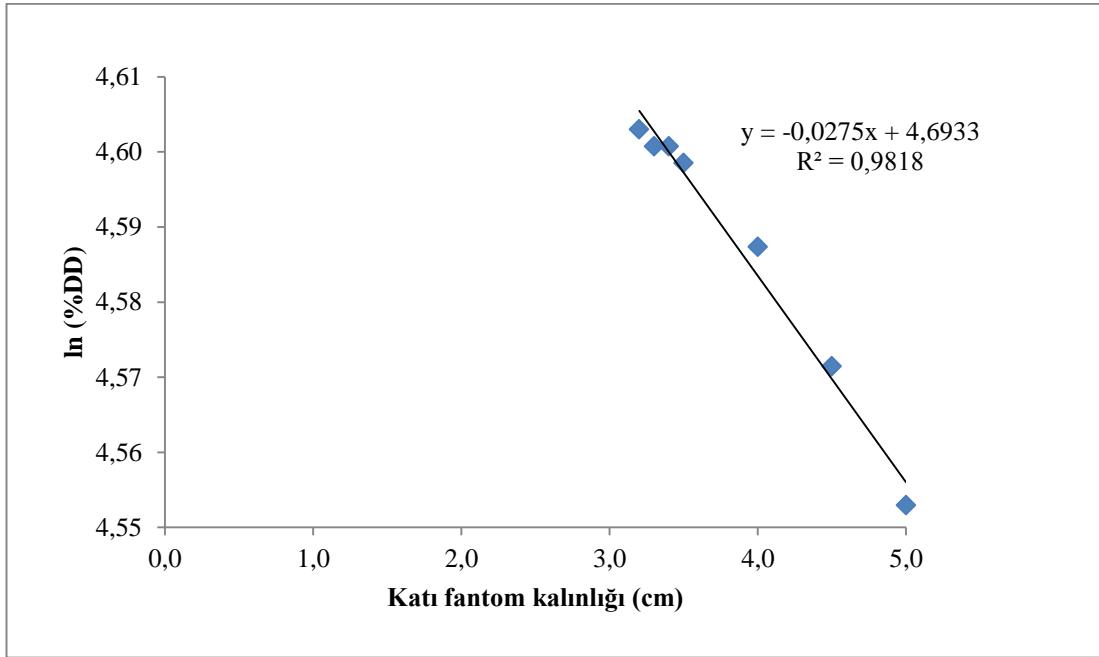
Şekil 4. 4. 18 MV’ de kıatı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.4’te görüldüğü gibi, 18 MV’de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğruyun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0271 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



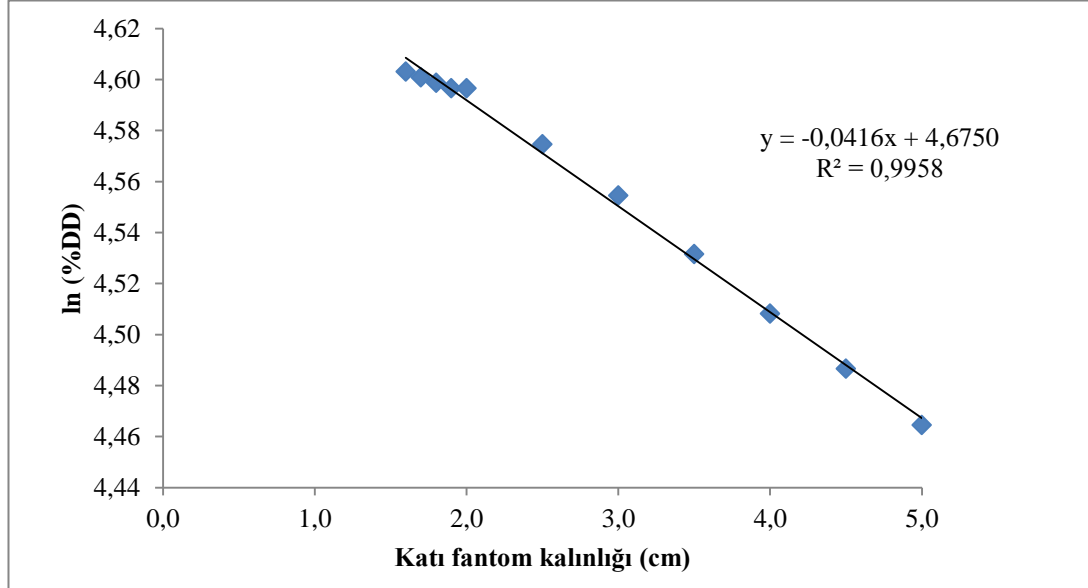
Şekil 4. 5. 6 MV’de katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.5’te görüldüğü gibi, 6 MV’de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0448 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



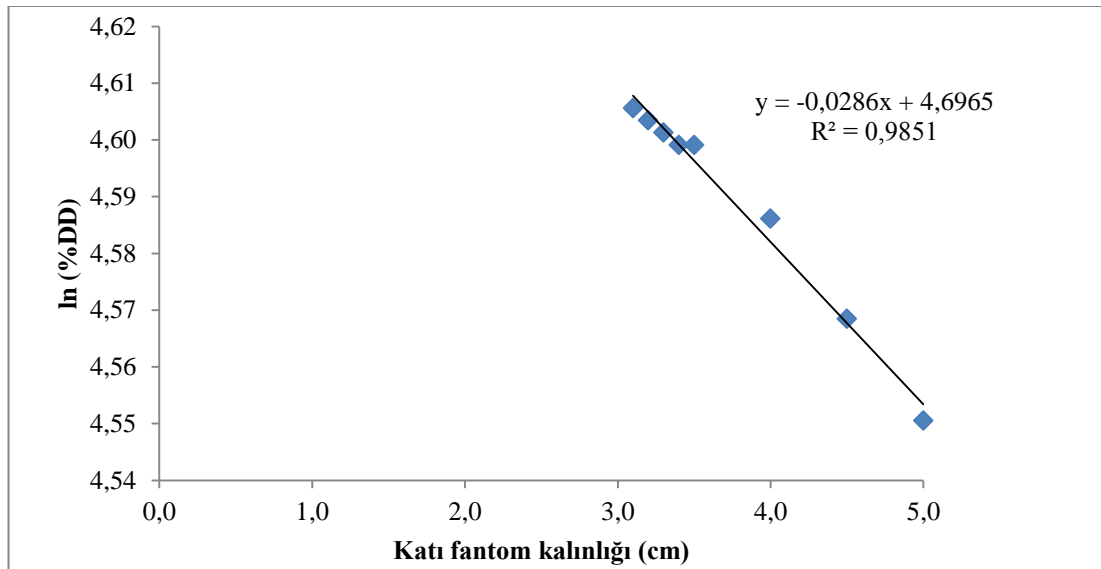
Şekil 4. 6. 18 MV’de katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, 18 MV'de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0275 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 7. 6 MV'de katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, 6 MV'de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0416 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 8. 18 MV'de katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, 18 MV’de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0286 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.

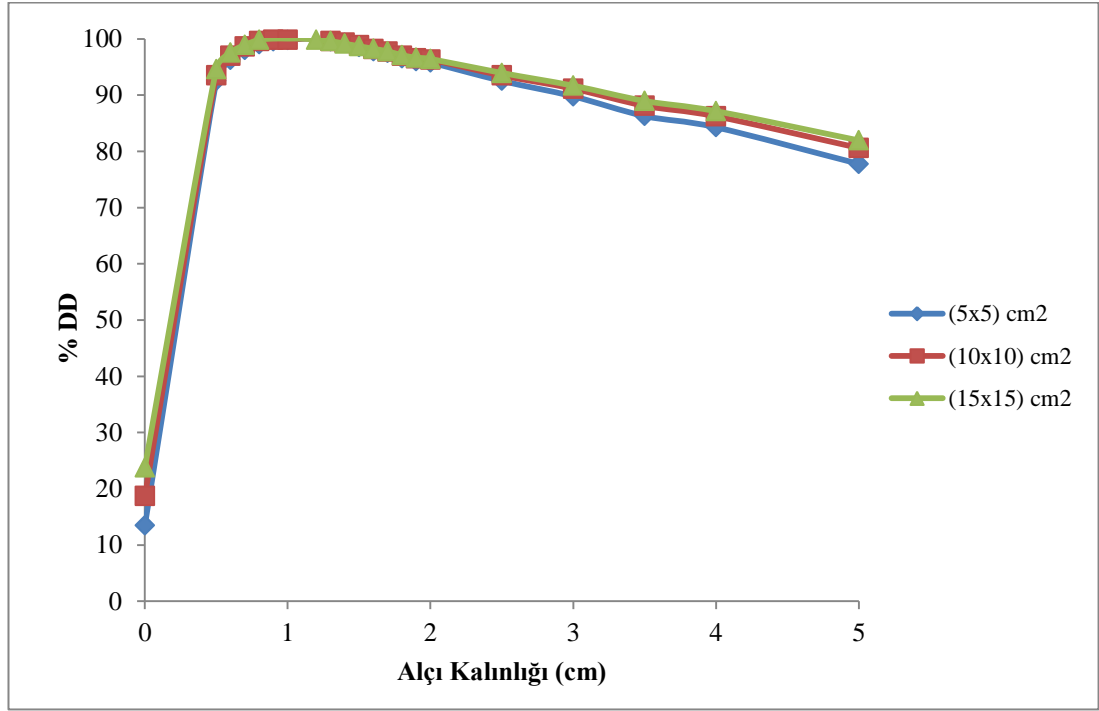
Grafiklerden elde edilen azalma katsayıları karşılaştırıldığında, aynı enerjilerde alan açıklığının artması ile azalma katsayısının azaldığı görülmektedir. Ayrıca aynı alan açıklıklarında enerjinin artması ile azalma katsayısının azaldığı görülmektedir.

B. Alçılı Katı Fantom Ölçümleri

Katı fantom ve alçı sisteminin üzerinde (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm²’lik alanlar açılarak 10 cm derinlikte, kaynak cilt mesafesi (SSD) 100 cm, basınç 903,7 mbar ve sıcaklık 23,3 °C’de, 100 MU süre verilerek TM 30010- SN 2403 silindirik iyon odasında ölçümler alınmıştır. Alçı kalınlığı 0,5 cm’den 5,0 cm’ye kadar artırılarak ölçümler tekrarlanmış ve değerler grafiğe aktarılmıştır. Çizelge 4.3’te 6 MV ve Çizelge 4.4’te 18 MV’de üretilen x-ışını ile alçı kalınlığı artırılarak alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu veriler kullanılarak kalınlıkla değişen doz miktarı grafikleri ise Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4. 3. 6 MV’de alçılı katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	13,503	18,744	23,766	2,603	2,931	3,168
0,5	92,520	93,485	94,613	4,527	4,538	4,550
0,6	96,271	96,999	97,556	4,567	4,575	4,580
0,7	98,022	98,639	98,914	4,585	4,591	4,594
0,8	99,022	99,576	99,819	4,595	4,601	4,603
0,9	99,522	99,811	100,046	4,600	4,603	4,606
1,0	99,772	99,811	100,046	4,603	4,603	4,606
1,1	100,022	100,045	100,046	4,605	4,606	4,606
1,2	100,022	100,045	99,819	4,605	4,606	4,603
1,3	99,522	99,576	99,593	4,600	4,601	4,601
1,4	99,272	99,342	99,140	4,598	4,599	4,597
1,5	98,522	98,874	98,687	4,590	4,594	4,592
1,6	97,772	98,171	98,235	4,583	4,587	4,587
1,7	97,521	97,702	97,782	4,580	4,582	4,583
1,8	96,521	96,999	97,103	4,570	4,575	4,576
1,9	96,021	96,531	96,650	4,565	4,570	4,571
2,0	95,771	96,296	96,424	4,562	4,567	4,569
2,5	92,520	93,485	93,934	4,527	4,538	4,543
3,0	89,770	91,142	91,671	4,497	4,512	4,518
3,5	86,269	88,096	88,954	4,457	4,478	4,488
4,0	84,269	86,221	87,144	4,434	4,457	4,468
5,0	77,767	80,598	81,938	4,354	4,389	4,406

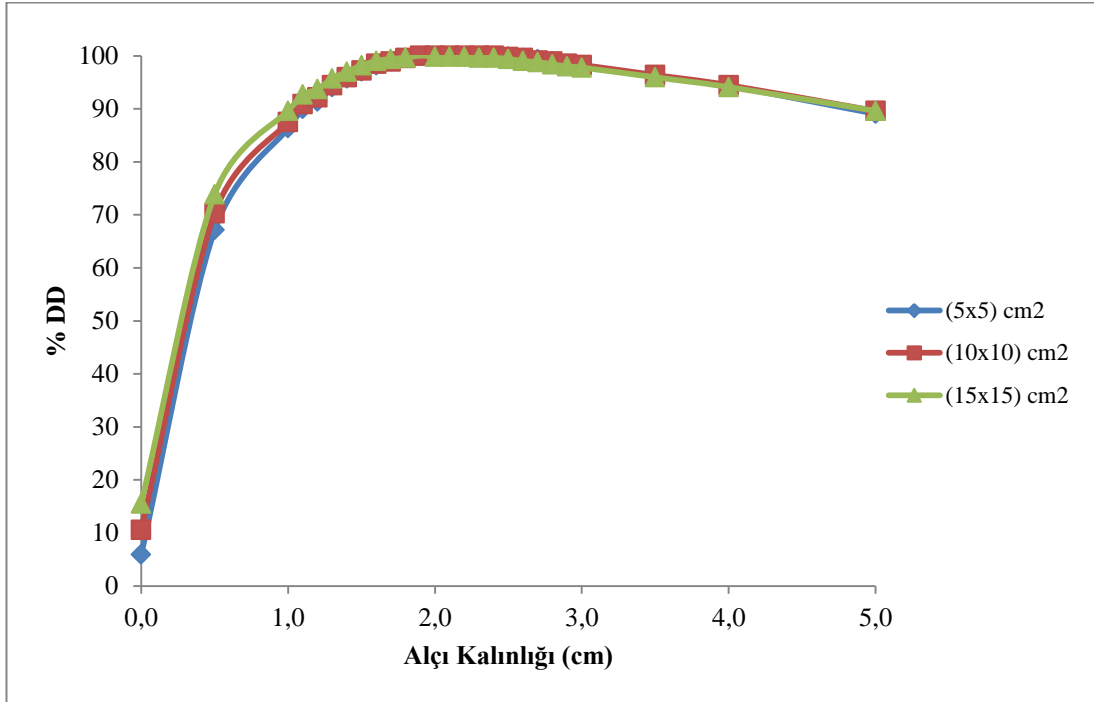


Şekil 4. 9. Alçılı katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.9’den görüldüğü gibi 6 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 1,1 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değerleri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı alçı kalınlığı için doz değerleri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Çizelge 4. 4. 18 MV'de alçılı katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

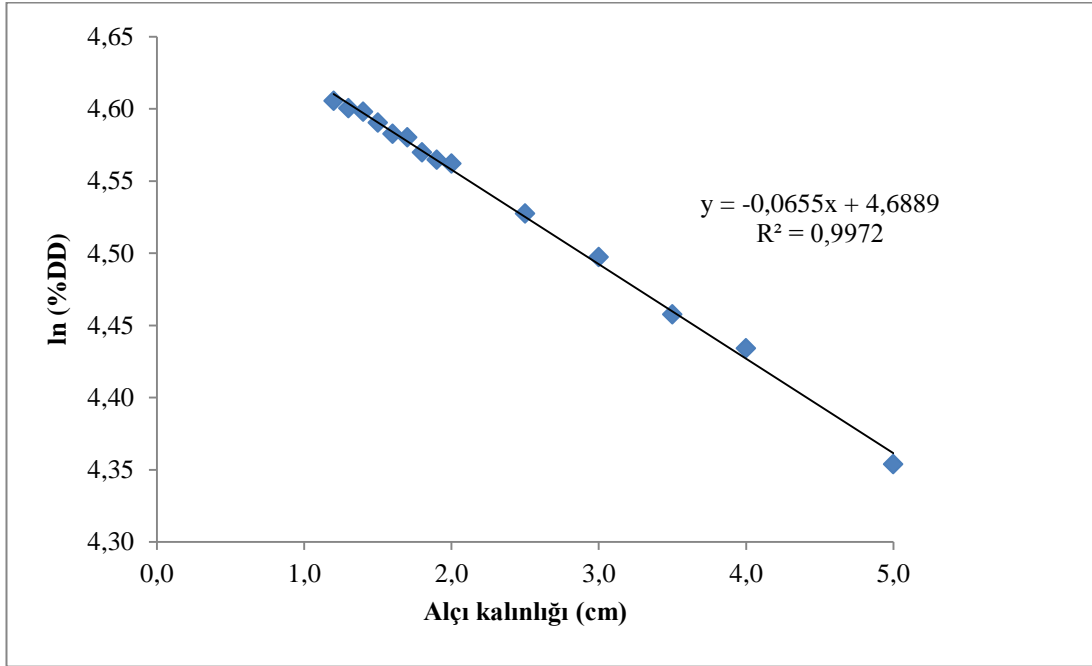
Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	5,938	10,591	15,549	1,781	2,360	2,744
0,5	67,147	70,324	73,857	4,207	4,253	4,302
1,0	86,332	87,482	89,610	4,458	4,471	4,495
1,1	89,987	90,871	92,679	4,500	4,509	4,529
1,2	91,357	92,142	93,702	4,515	4,523	4,540
1,3	94,098	94,472	95,748	4,544	4,548	4,562
1,4	95,696	95,955	96,975	4,561	4,564	4,574
1,5	97,067	97,226	98,203	4,575	4,577	4,587
1,6	98,209	98,497	99,021	4,587	4,590	4,595
1,7	98,894	98,920	99,430	4,594	4,594	4,599
1,8	99,579	99,556	99,635	4,601	4,601	4,602
1,9	100,036	99,979	100,044	4,606	4,605	4,606
2,0	100,036	99,979	99,839	4,606	4,605	4,604
2,1	100,036	99,979	99,839	4,606	4,605	4,604
2,2	99,807	99,979	99,839	4,603	4,605	4,604
2,3	99,807	99,979	99,635	4,603	4,605	4,602
2,4	99,807	99,979	99,635	4,603	4,605	4,602
2,5	99,807	99,768	99,430	4,603	4,603	4,599
2,6	99,579	99,556	99,021	4,601	4,601	4,595
2,7	99,351	99,132	98,816	4,599	4,596	4,593
2,8	98,894	98,920	98,407	4,594	4,594	4,589
2,9	98,437	98,497	97,998	4,589	4,590	4,585
3,0	98,209	98,285	97,793	4,587	4,588	4,583
3,5	96,153	96,378	95,952	4,566	4,568	4,564
4,0	94,326	94,472	94,111	4,547	4,548	4,544
5,0	89,073	89,600	89,610	4,489	4,495	4,495



Şekil 4. 10. Alçılı katı fantom 18 MV'de doz kalınlık grafiği

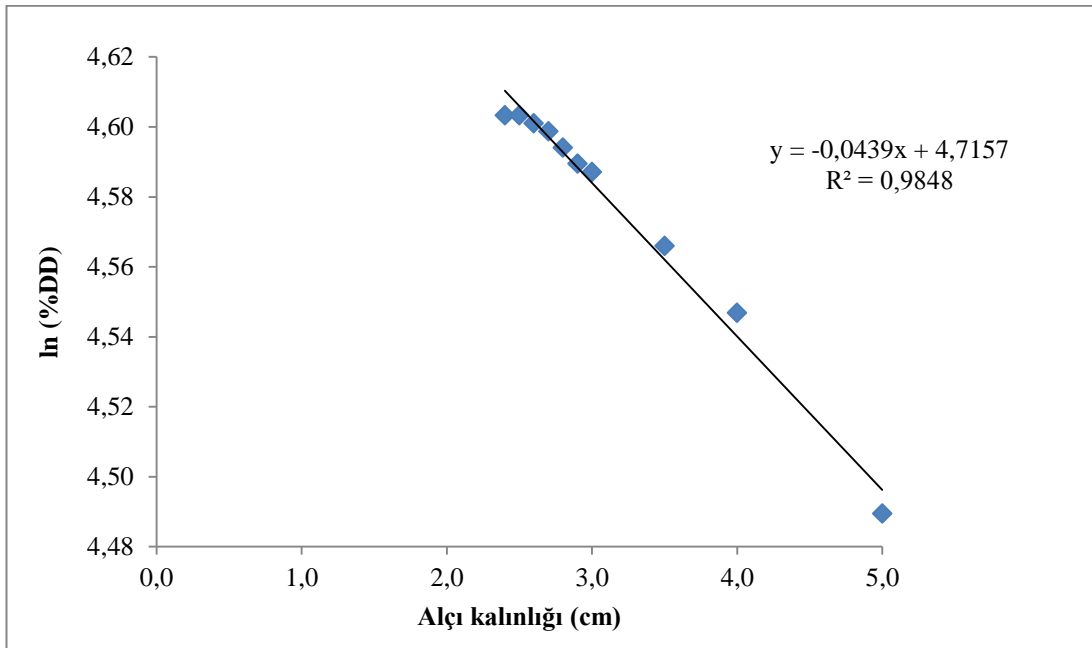
Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi 18 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 2,0 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değerleri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı alçı kalınlığı için doz değerleri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Lineer azalma katsayısının hesaplanabilmesi için d_{max} noktasından itibaren ölçülen değerlerin \ln 'i alınarak grafiğe aktarılmış ve eğimden azalma katsayısı hesaplanmıştır.



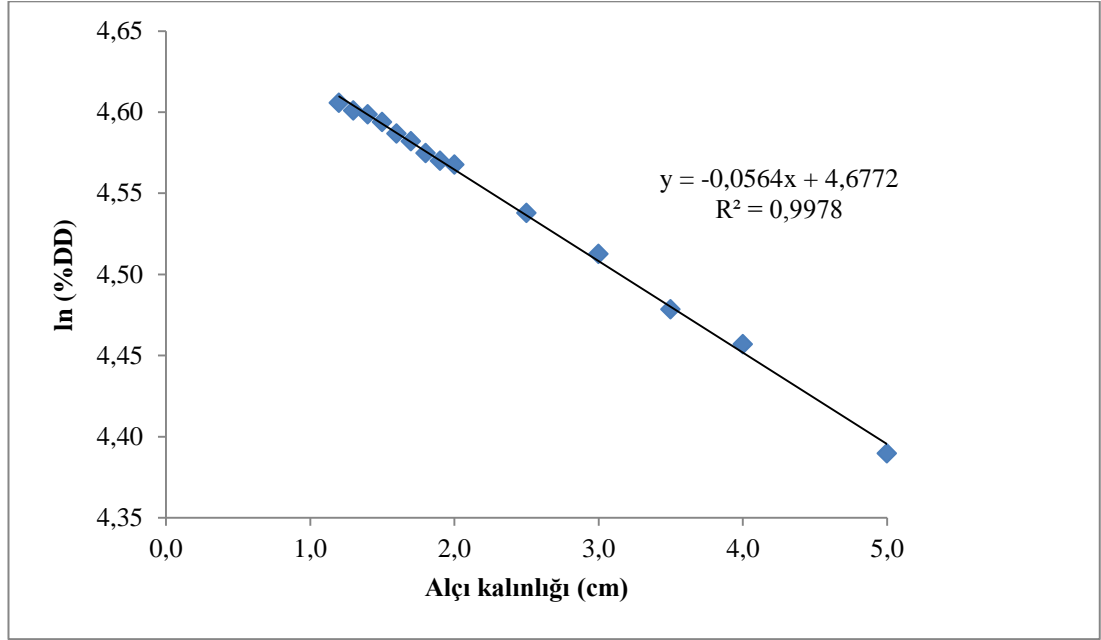
Şekil 4. 11. 6 MV’de alçılı katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.11’de görüldüğü gibi, 6 MV’de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0655 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



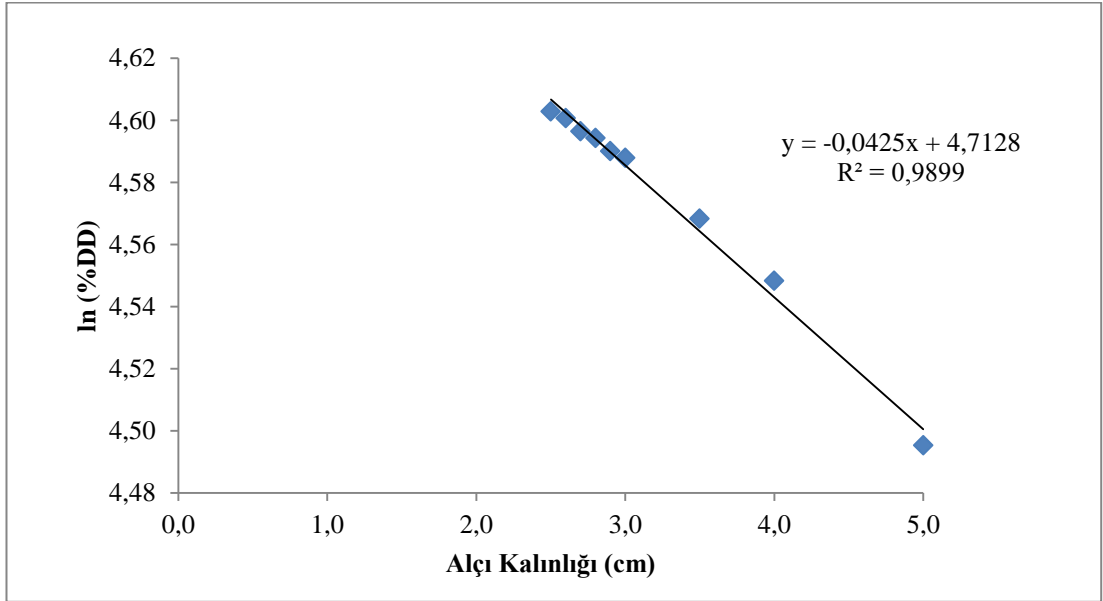
Şekil 4.12. 18 MV’de alçılı katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi, 18 MV’de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0439 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



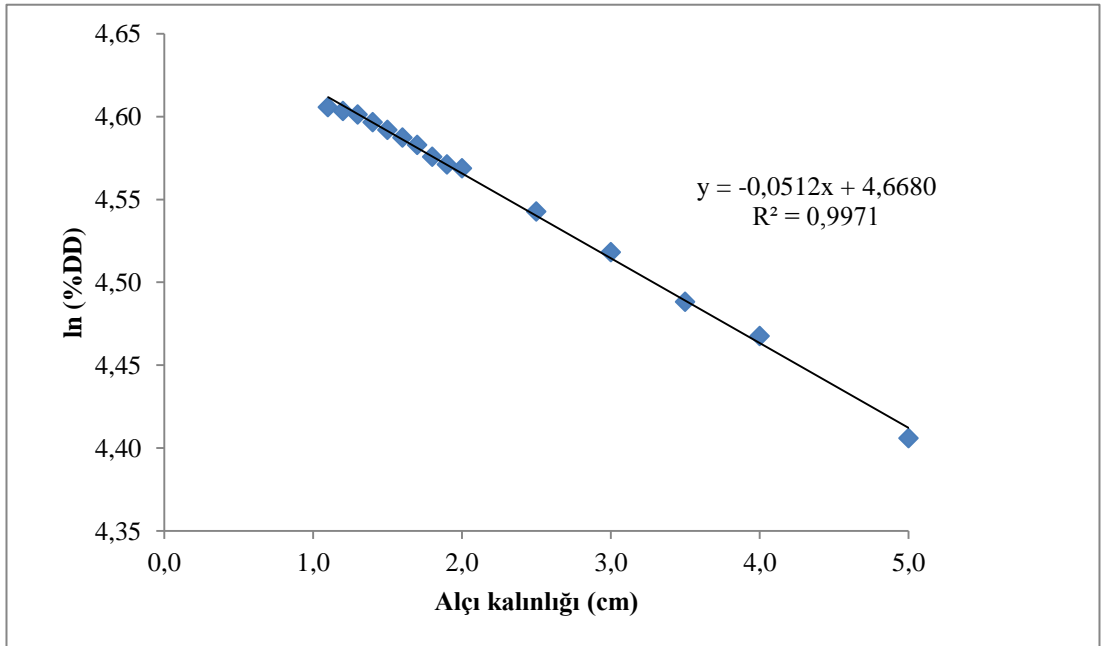
Şekil 4.13. 6 MV’de alçılı katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.13’te görüldüğü gibi, 6 MV’de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0564 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



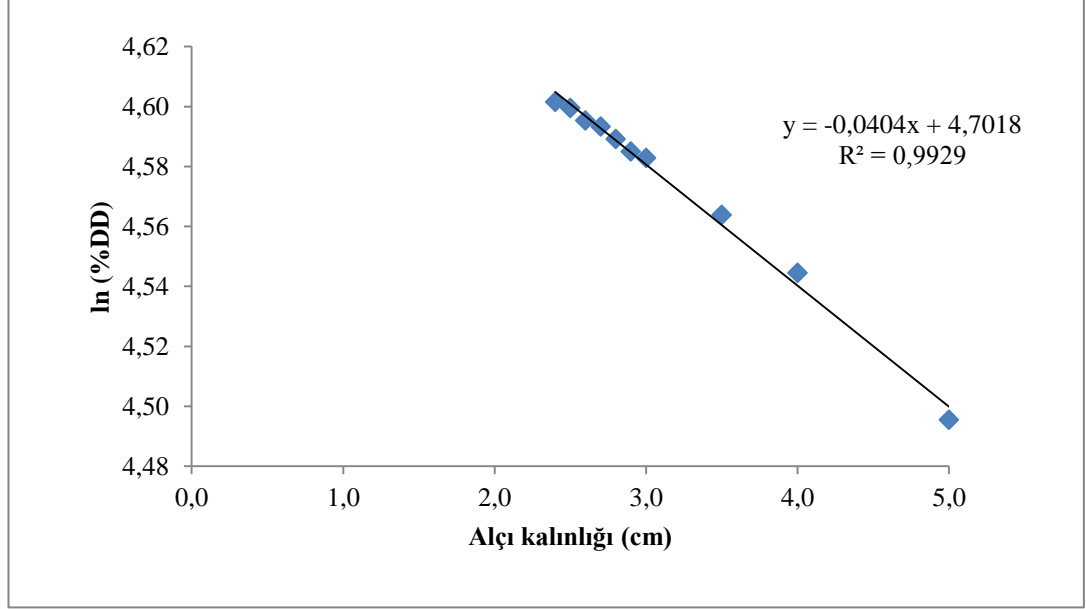
Şekil 4.14. 18 MV'de alçılı katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, 18 MV'de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0425 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.15. 6 MV'de alçılı katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, 6 MV'de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0512 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.

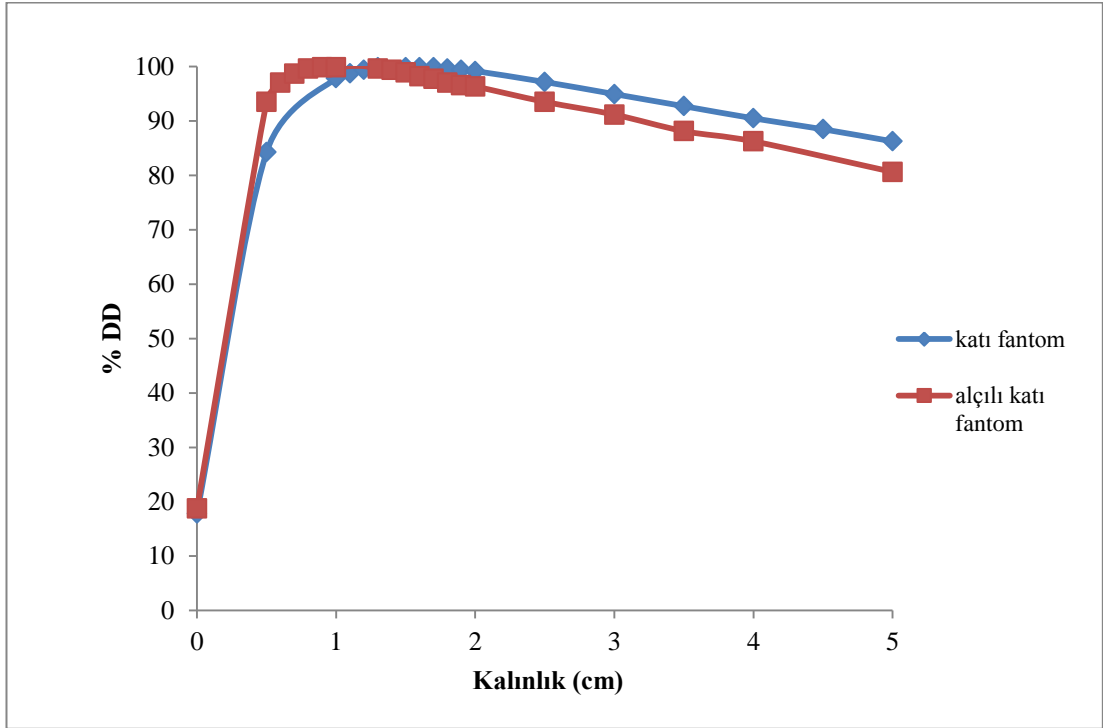


Şekil 4. 16. 18 MV'de alçılı katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

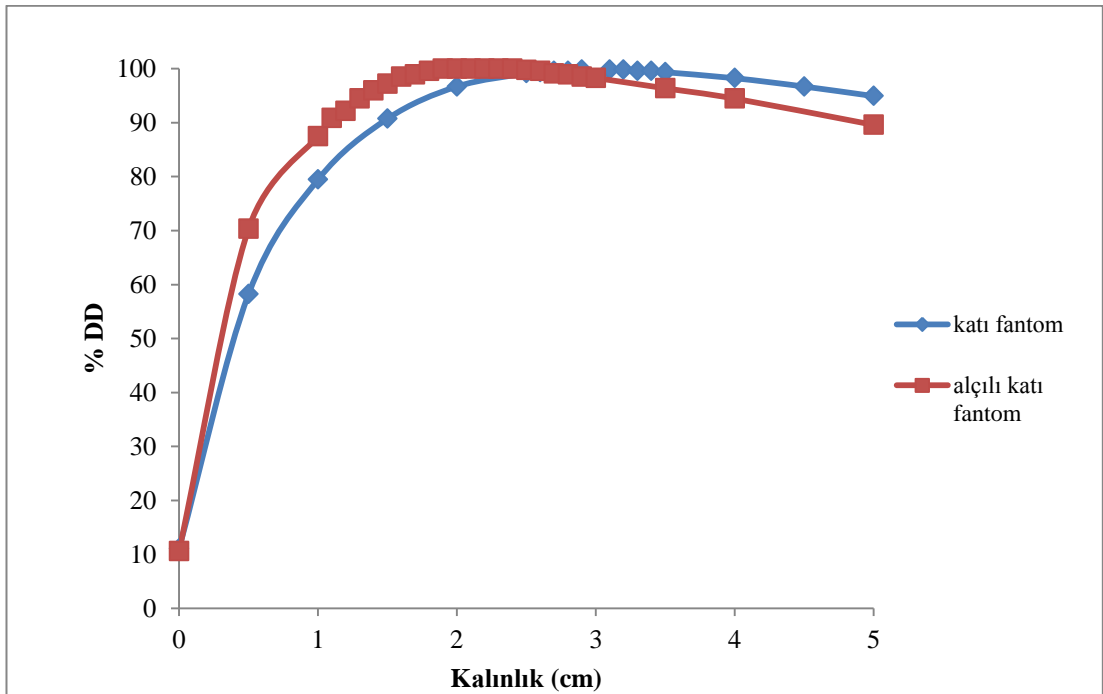
Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, 18 MV'de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0404 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.

Grafiklerden elde edilen azalma katsayıları karşılaştırıldığında, aynı enerjilerde alan açıklığının artması ile azalama katsayısının azaldığı görülmektedir. Ayrıca aynı alan açıklıklarında enerjinin artması ile azalma katsayısının azaldığı görülmektedir.

Elde edilen verilerden (10x10) cm²'de 6 MV ve 18 MV'de katı fantom ve alçılı doz ölçümlerinin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için değerler Şekil 4.17'de 6 MV ve Şekil 4.18'de 18 MV için grafiğe geçirilmiştir.



Şekil 4.17. 6 MV için (10x10) cm²'de katı fantom ve alçılı doz ölçümlerinin karşılaştırılması



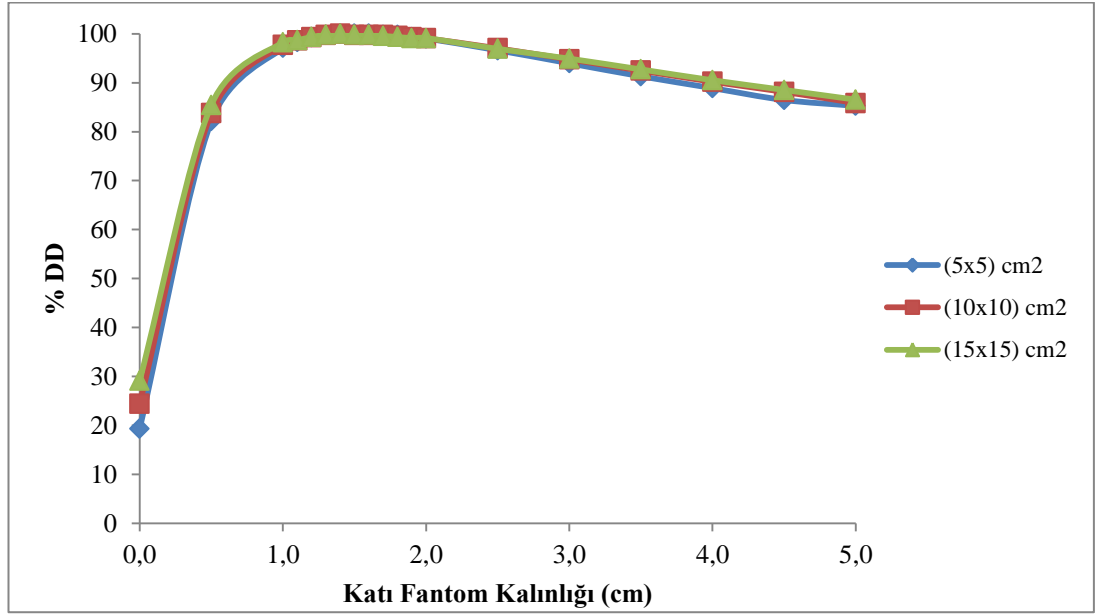
Şekil 4.18. 18 MV için (10x10) cm²'de katı fantom ve alçılı doz ölçümlerinin karşılaştırılması

4.2. Pamuklu Katı Fantom ve Alçılı Pamuklu Katı Fantom İçin X-Işınlarıyla Yapılan Ölçümler

Yapılan çalışmalarda pamuğun soğurulan doz üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla; (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm², de alanlar açılarak 10 cm derinlikte, kaynak cilt mesafesi (SSD) 100 cm, basınç 903,7 mbar ve sıcaklık 23,3 C’de, 100 MU süre verilerek TM 30010- SN 2403 silindirik iyon odasında ölçümler alınmıştır. Sırasıyla katı fantom kalınlığı ve alçı kalınlığı 0,5 cm’den 5 cm’ye kadar artırılarak ölçümler tekrarlanmış ve değerler grafiğe aktarılmıştır. Çizelge 4.5’te 6MV ve izelge 4.6’da 18 MV’de üretilen x-ışını ile pamuklu katı fantomda kalınlık artırılarak alınan ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.5. 6 MV’de pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	19,323	24,439	29,151	2,961	3,196	3,372
0,5	82,121	83,822	85,464	4,408	4,429	4,448
1,0	97,096	97,755	98,273	4,576	4,582	4,588
1,1	98,304	98,668	98,714	4,588	4,592	4,592
1,2	99,270	99,353	99,377	4,598	4,599	4,599
1,3	99,753	99,810	99,819	4,603	4,603	4,603
1,4	99,995	100,039	100,039	4,605	4,606	4,606
1,5	99,995	99,810	99,819	4,605	4,603	4,603
1,6	99,995	99,810	99,819	4,605	4,603	4,603
1,7	99,753	99,810	99,598	4,603	4,603	4,601
1,8	99,753	99,582	99,377	4,603	4,601	4,599
1,9	99,270	99,353	99,156	4,598	4,599	4,597
2,0	99,029	99,125	99,156	4,595	4,596	4,597
2,5	96,613	97,069	96,948	4,571	4,575	4,574
3,0	93,957	94,785	94,960	4,543	4,552	4,553
3,5	91,300	92,502	92,752	4,514	4,527	4,530
4,0	88,884	90,218	90,543	4,487	4,502	4,506
4,5	86,469	88,162	88,556	4,460	4,479	4,484
5,0	85,261	85,878	86,568	4,446	4,453	4,461

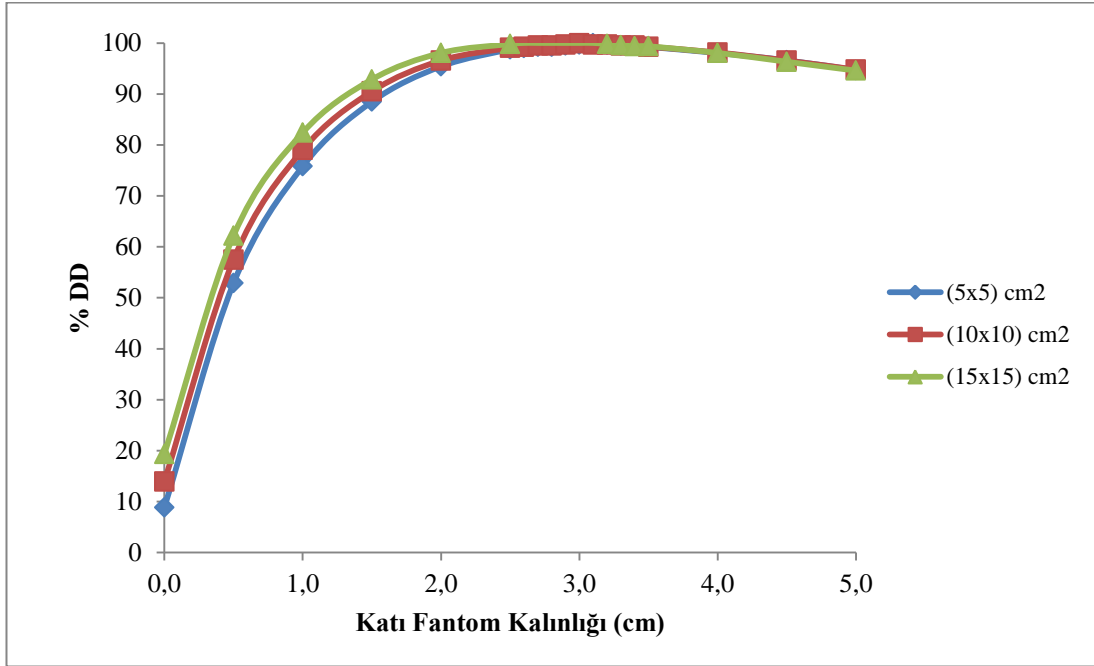


Şekil 4.19. Pamuklu katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.19’den görüldüğü gibi 6 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 1,5 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değerleri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı pamuklu katı fantom kalınlığı için doz değerleri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Çizelge 4.6. 18 MV’de pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

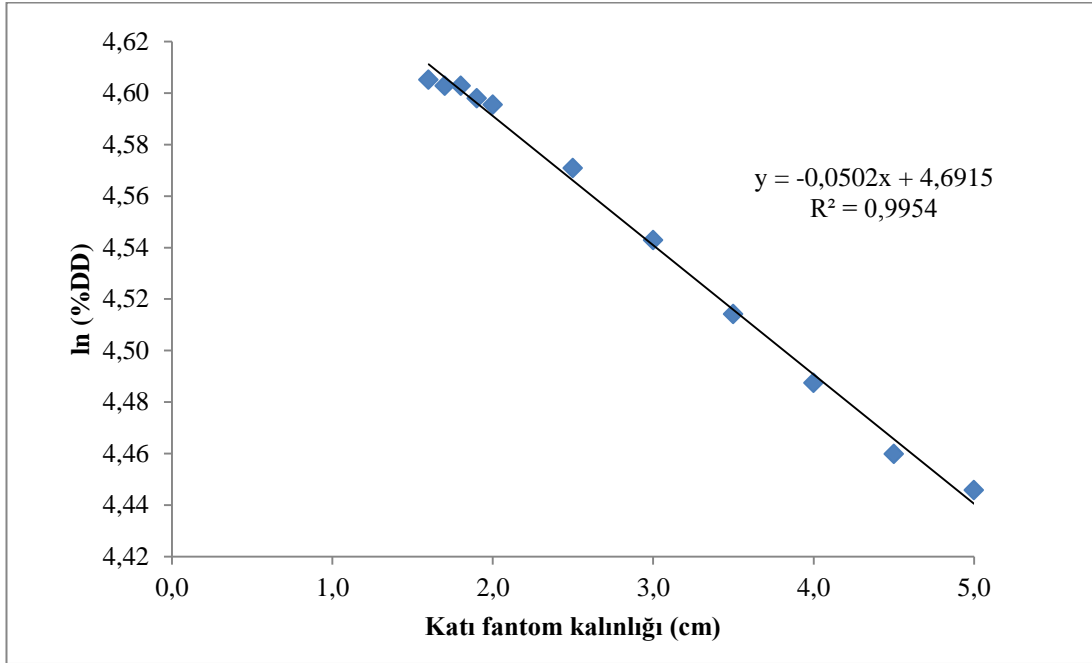
Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	8,850	13,937	19,356	2,180	2,635	2,963
0,5	52,861	57,489	62,201	3,968	4,052	4,130
1,0	75,823	79,068	82,427	4,328	4,370	4,412
1,5	88,500	90,532	92,866	4,483	4,506	4,531
2,0	95,436	96,601	98,086	4,558	4,571	4,586
2,5	98,785	99,074	99,826	4,593	4,596	4,603
2,6	99,024	99,299	100,043	4,595	4,598	4,606
2,7	99,263	99,524	100,043	4,598	4,600	4,606
2,8	99,263	99,524	100,043	4,598	4,600	4,606
2,9	99,502	99,748	100,043	4,600	4,603	4,606
3,0	99,741	99,973	100,043	4,603	4,605	4,606
3,1	99,981	99,748	100,043	4,605	4,603	4,606
3,2	99,741	99,748	99,826	4,603	4,603	4,603
3,3	99,502	99,524	99,608	4,600	4,600	4,601
3,4	99,502	99,524	99,391	4,600	4,600	4,599
3,5	99,263	99,299	99,391	4,598	4,598	4,599
4,0	98,067	98,175	98,086	4,586	4,587	4,586
4,5	96,632	96,601	96,346	4,571	4,571	4,568
5,0	94,719	94,803	94,606	4,551	4,552	4,550



Şekil 4.20. Pamuklu katı fantom 18 MV'de doz kalınlık grafiği

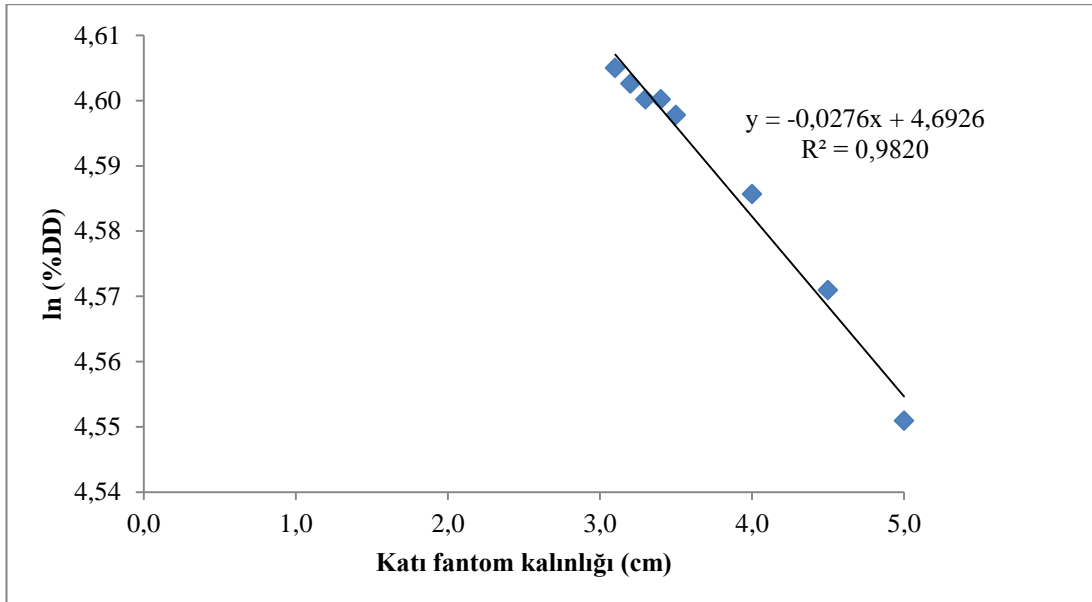
Çizelge 4.6 ve Şekil 4.20'den görüldüğü gibi 18 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 3,1 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değerleri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı pamuklu katı fantom kalınlığı için doz değerleri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Lineer azalma katsayısının hesaplanabilmesi için d_{max} noktasından itibaren ölçülen değerlerin \ln 'i alınarak grafiğe aktarılmış ve eğimden azalma katsayısı hesaplanmıştır.



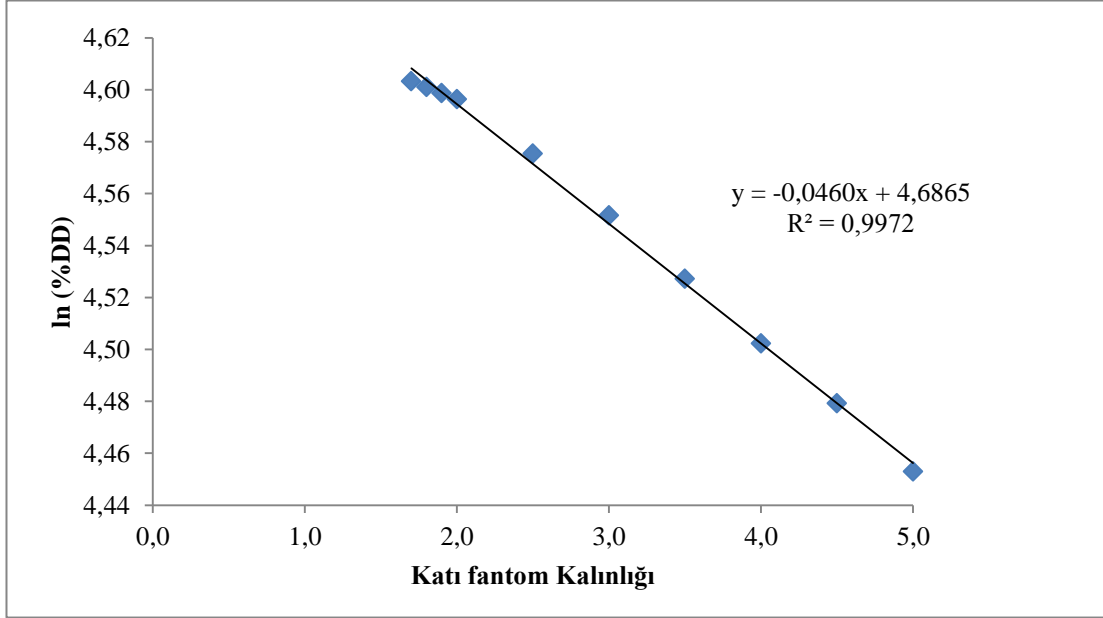
Şekil 4.21. 6 MV'de pamuklu katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi, 6 MV'de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0502 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



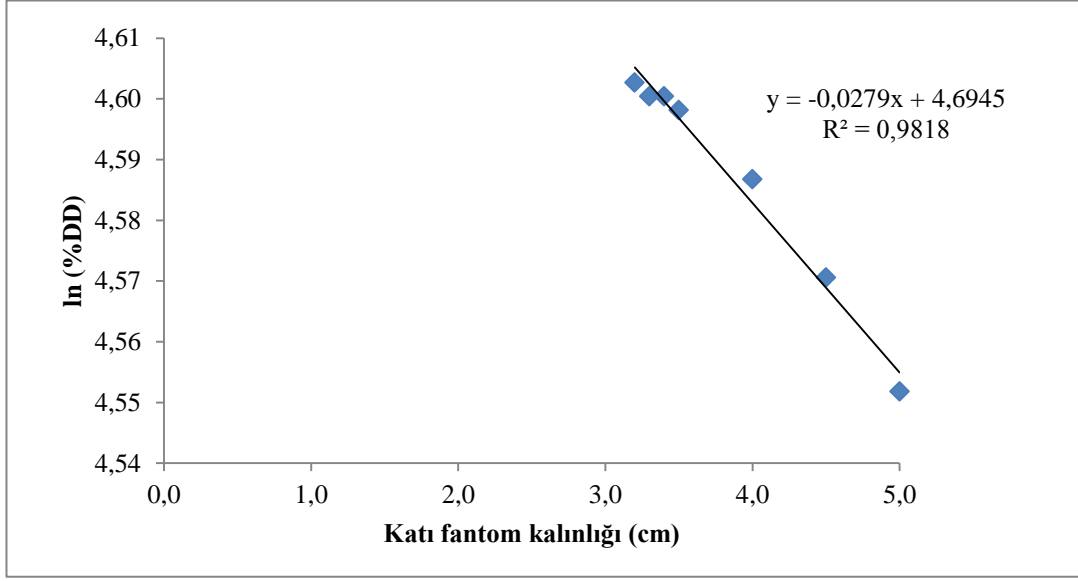
Şekil 4.22. 18 MV'de pamuklu katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi, 18 MV’de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0276 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



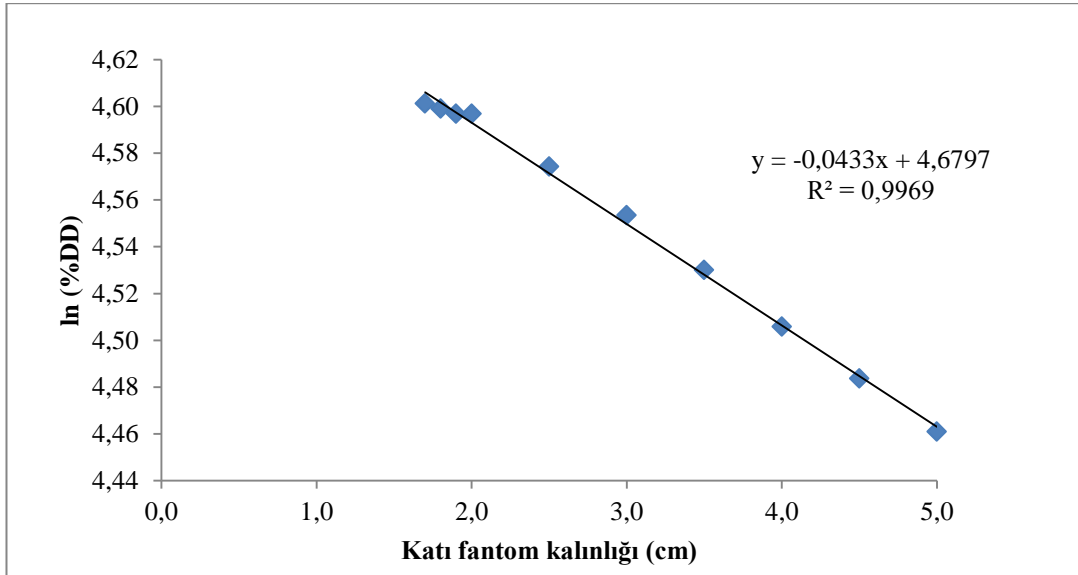
Şekil 4.23. 6 MV’de pamuklu katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.23’te görüldüğü gibi, 6 MV’de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0460 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



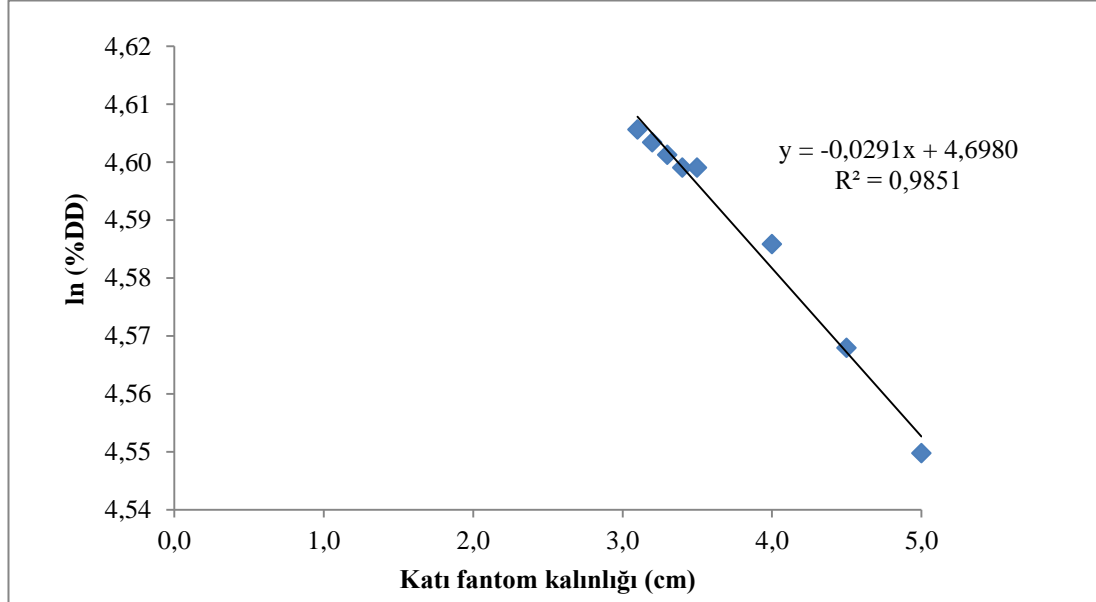
Şekil 4.24. 18 MV'de pamuklu katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.24'te görüldüğü gibi, 18 MV'de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0279 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.25. 6 MV'de pamuklu katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi, 6 MV'de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0413 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



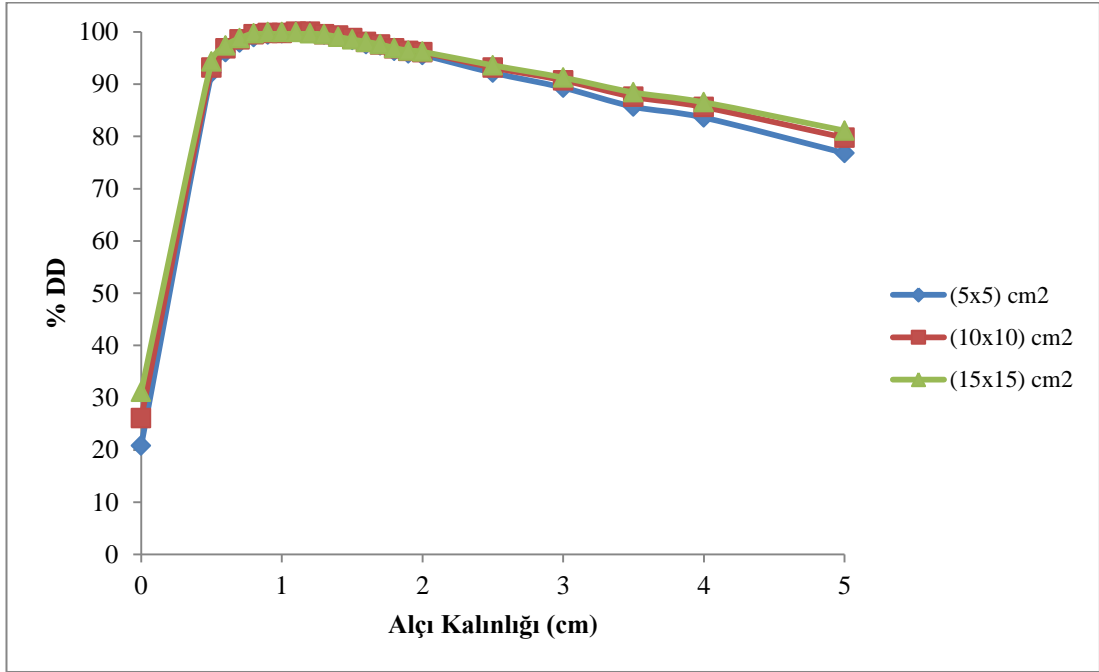
Şekil 4.26. 18 MV'de pamuklu katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.26'da görüldüğü gibi, 18 MV'de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0291 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.7'de 6MV ve Çizelge 4.8'de 18 MV'de üretilen x-ışını ile alçılı pamuklu katı fantomda alçı kalınlığı artırılarak alınan ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.7. 6 MV' de alçılı pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	20,831	26,094	31,120	3,036	3,262	3,438
0,5	92,178	93,159	94,304	4,524	4,534	4,547
0,6	96,084	96,817	97,368	4,565	4,573	4,579
0,7	97,907	98,524	98,783	4,584	4,590	4,593
0,8	98,948	99,499	99,726	4,595	4,600	4,602
0,9	99,469	99,743	99,962	4,600	4,603	4,605
1,0	99,730	99,743	99,962	4,602	4,603	4,605
1,1	99,990	99,987	99,962	4,605	4,605	4,605
1,2	99,990	99,987	99,726	4,605	4,605	4,602
1,3	99,469	99,499	99,490	4,600	4,600	4,600
1,4	99,209	99,255	99,019	4,597	4,598	4,595
1,5	98,428	98,768	98,547	4,589	4,593	4,591
1,6	97,646	98,036	98,076	4,581	4,585	4,586
1,7	97,386	97,548	97,604	4,579	4,580	4,581
1,8	96,344	96,817	96,897	4,568	4,573	4,574
1,9	95,824	96,329	96,425	4,563	4,568	4,569
2,0	95,563	96,085	96,190	4,560	4,565	4,566
2,5	92,178	93,159	93,596	4,524	4,534	4,539
3,0	89,314	90,720	91,239	4,492	4,508	4,513
3,5	85,668	87,550	88,410	4,450	4,472	4,482
4,0	83,585	85,599	86,523	4,426	4,450	4,460
5,0	76,815	79,746	81,101	4,341	4,379	4,396

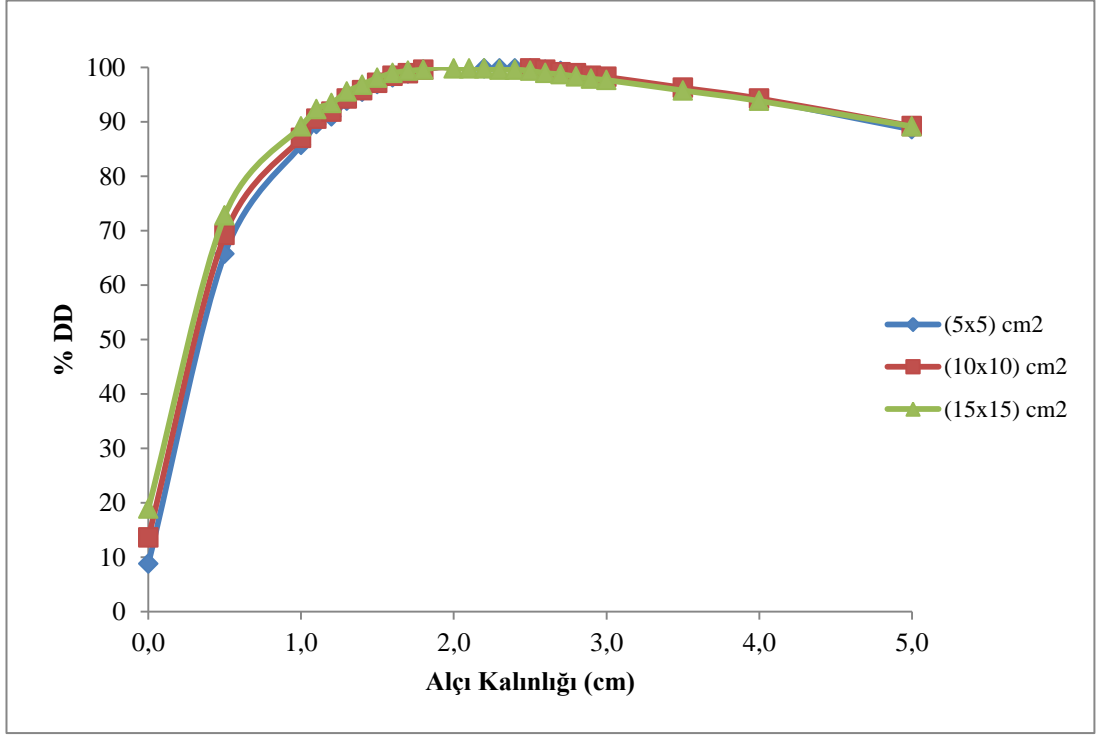


Şekil 4.27. Alçılı pamuklu katı fantom 6 MV’de doz kalınlık grafiği

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.27’den görüldüğü gibi 6 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 1,2 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değerleri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı alçılı pamuklu katı fantom kalınlığı için doz değerleri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Çizelge 4.8. 18 MV' de alçılı pamuklu katı fantom için kalınlıkla değişen doz değerleri

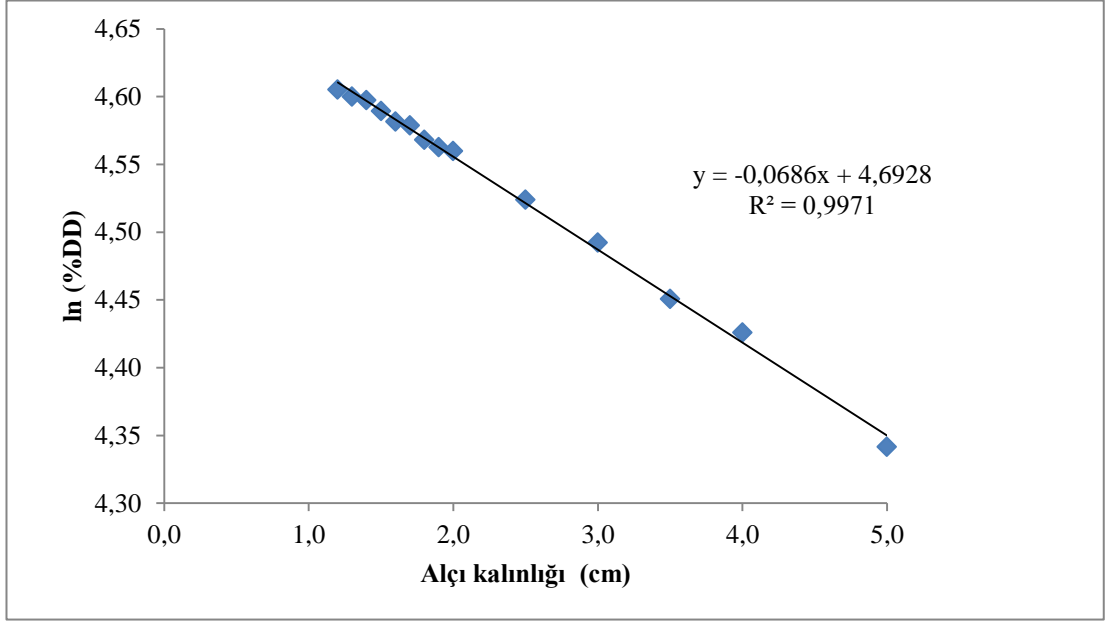
Kalınlık (cm)	(5x5) cm ² % Derin Doz	(10x10) cm ² % Derin Doz	(15x15) cm ² % Derin Doz	(5x5) cm ² ln(%DD)	(10x10) cm ² ln(%DD)	(15x15) cm ² ln(%DD)
0,0	8,813	13,627	18,940	2,176	2,612	2,941
0,5	65,740	69,235	72,781	4,186	4,238	4,287
1,0	85,747	87,039	89,168	4,451	4,466	4,491
1,1	89,558	90,555	92,360	4,495	4,506	4,526
1,2	90,988	91,874	93,424	4,511	4,520	4,537
1,3	93,846	94,292	95,552	4,542	4,546	4,560
1,4	95,513	95,830	96,829	4,559	4,563	4,573
1,5	96,942	97,149	98,106	4,574	4,576	4,586
1,6	98,133	98,468	98,957	4,586	4,590	4,595
1,7	98,848	98,908	99,382	4,594	4,594	4,599
1,8	99,562	99,567	99,595	4,601	4,601	4,601
1,9	100,039	100,007	100,021	4,606	4,605	4,605
2,0	100,039	100,007	99,808	4,606	4,605	4,603
2,1	100,039	100,007	99,808	4,606	4,605	4,603
2,2	99,801	100,007	99,808	4,603	4,605	4,603
2,3	99,801	100,007	99,595	4,603	4,605	4,601
2,4	99,801	100,007	99,595	4,603	4,605	4,601
2,5	99,801	99,787	99,382	4,603	4,603	4,599
2,6	99,562	99,567	98,957	4,601	4,601	4,595
2,7	99,324	99,127	98,744	4,598	4,596	4,593
2,8	98,848	98,908	98,318	4,594	4,594	4,588
2,9	98,371	98,468	97,893	4,589	4,590	4,584
3,0	98,133	98,248	97,680	4,586	4,587	4,582
3,5	95,990	96,270	95,765	4,564	4,567	4,562
4,0	94,084	94,292	93,849	4,544	4,546	4,542
5,0	88,606	89,237	89,168	4,484	4,491	4,491



Şekil 4. 28. Alçılı pamuklu katı fantom 18 MV’de doz kalınlık grafiği

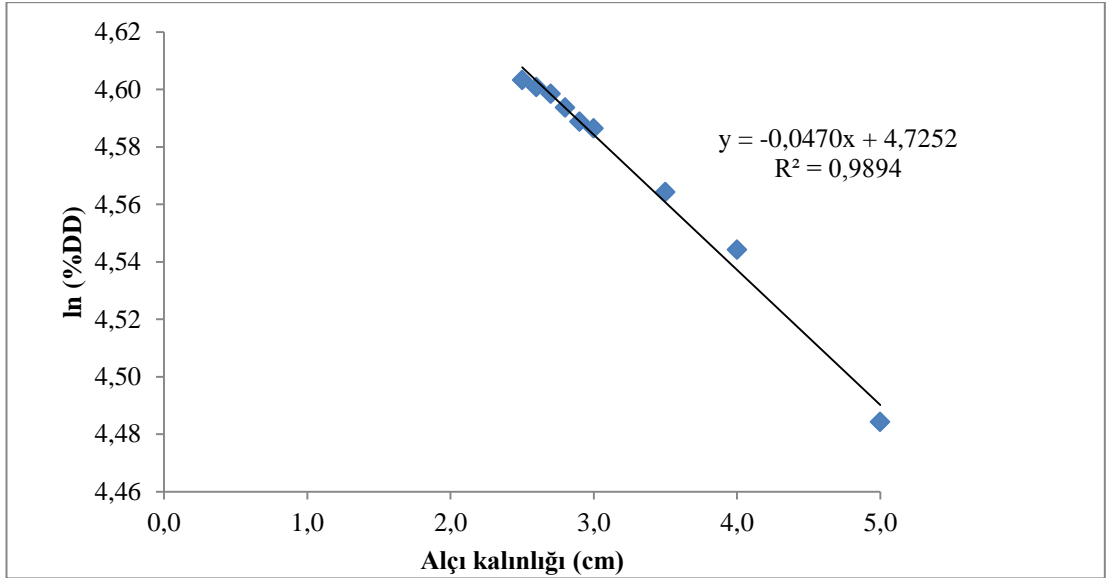
Çizelge 4.8 ve Şekil 4.28’den görüldüğü gibi 18 MV enerji için maximum doz (d_{max}) 2,1 cm civarındadır. Kalınlığa bağlı olarak artan doz değerleri, d_{max} değerlerinden sonra azalma göstermiştir. (5x5) cm², (10x10) cm², (15x15) cm² alan açıklıklarında aynı alçılı pamuklu katı fantom kalınlığı için doz değerleri incelendiğinde; artan alan açıklığında doz değeri artmaktadır.

Lineer azalma katsayısının hesaplanabilmesi için dozun azalmaya başladığı noktadan itibaren ölçülen değerlerin ln’i alınarak grafiğe aktarılmış ve eğimden azalma katsayısı hesaplanmıştır.



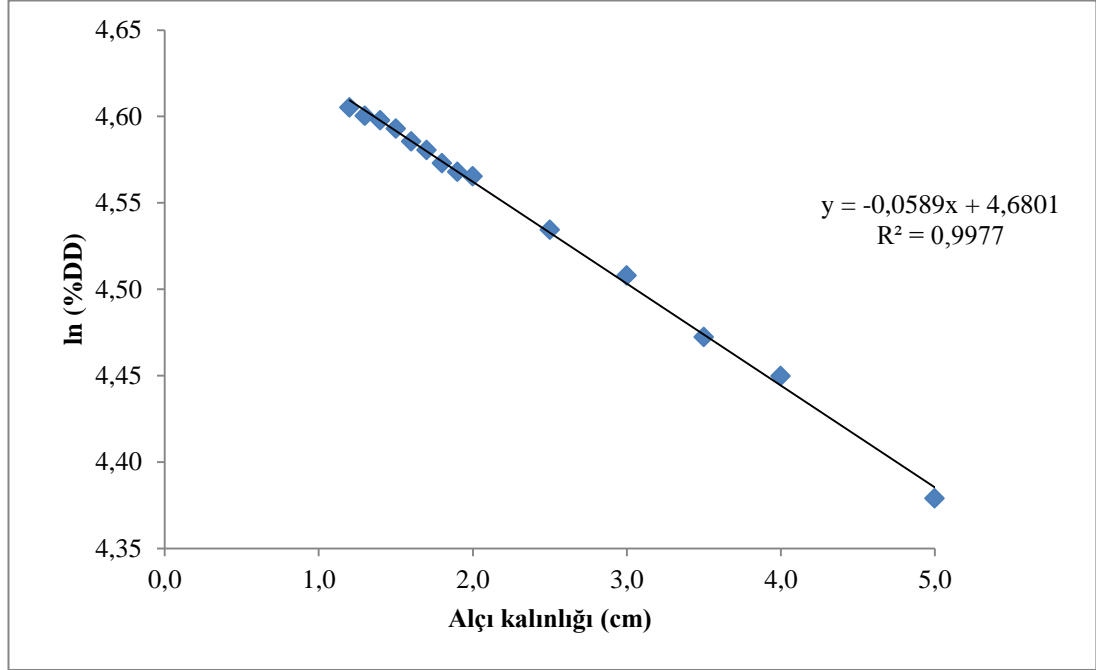
Şekil 4. 29. 6 MV'de alçılı pamuklu katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.29'da görüldüğü gibi, 6 MV'de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0686 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



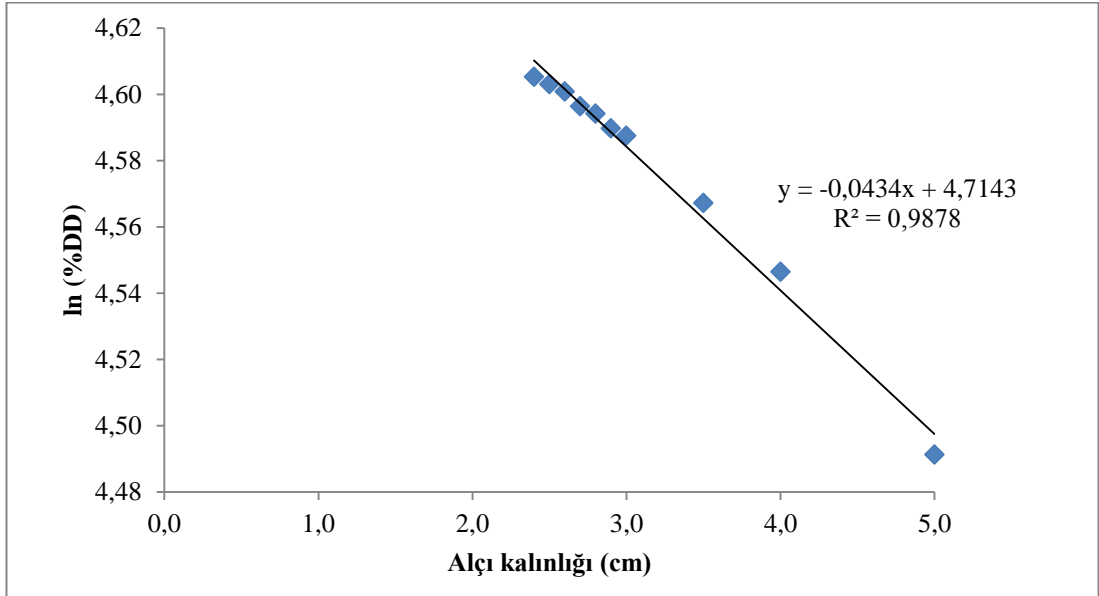
Şekil 4.30. 18 MV'de alçılı pamuklu katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.30'da görüldüğü gibi, 18 MV'de (5x5) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0470 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



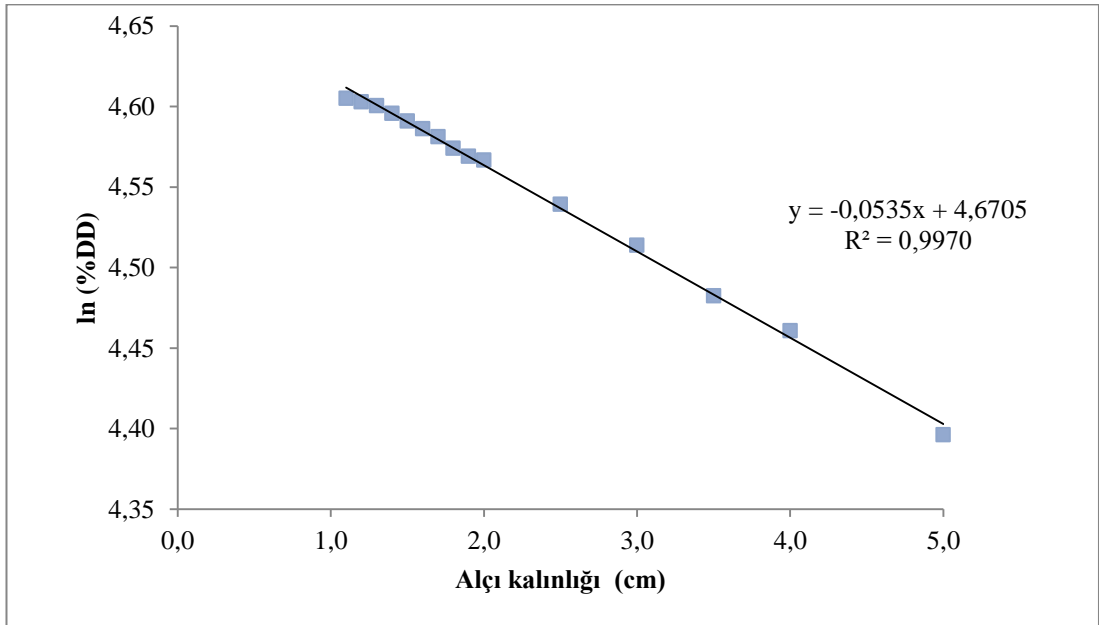
Şekil 4.31. 6 MV'de alçılı pamuklu katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.31'de görüldüğü gibi, 6 MV'de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0589 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



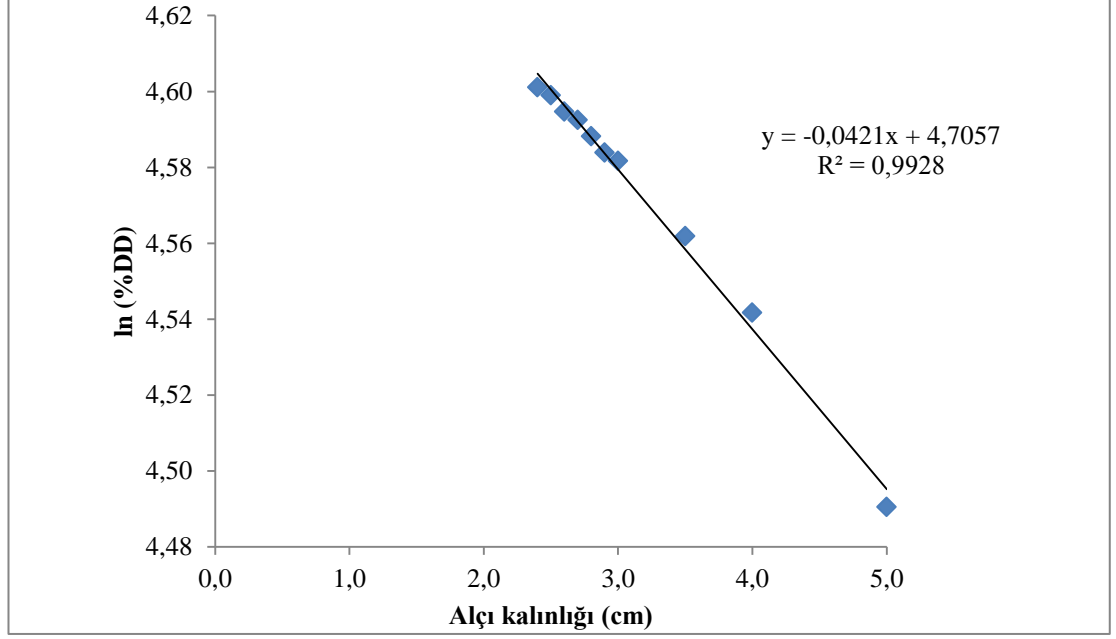
Şekil 4.32. 18 MV'de alçılı pamuklu katı fantom (10x10) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.32'de görüldüğü gibi, 18 MV'de (10x10) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0434 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.33. 6 MV'de alçılı pamuklu katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.33'te görüldüğü gibi, 6 MV'de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0535 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.34. 18 MV'de alçılı pamuklu katı fantom (15x15) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi, 18 MV'de (15x15) cm² alan açıklığı için çizilen doğrunun eğimi hesaplanarak lineer azalma katsayısı (μ) 0,0421 cm⁻¹ olarak bulunmuştur.

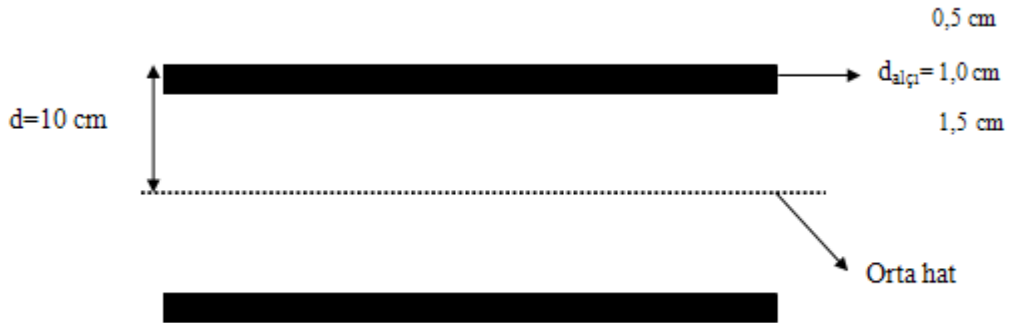
4.3. Alçı-Katı Fantom Sistemi ile Taklit Kol ve Bacak için X-ışınlarıyla Yapılan Ölçümler

Vücudun çeşitli bölgelerine uygulanması gereken radyasyon dozunun daha iyi hesaplanabilmesi için alçı ve katı fantom sisteminde farklı kalınlarda çalışılmıştır. Bu amaçla alçı ve katı fantom sisteminin toplam derinliği kol için 5,0 cm, bacak için 10,0 cm olacak şekilde ayarlanarak, alçı kalınlığı 1,5 cm'ye kadar değiştirilerek 6 MV ve 18 MV'de x-ışınlarıyla ölçümler alınmıştır. Şekil 4.35 ve Şekil. 4.36'da taklit kol ve bacak için şematik gösterim verilmiştir.

Alçı ve katı fantom sisteminin üzerinde $(5 \times 5) \text{ cm}^2$, $(10 \times 10) \text{ cm}^2$, $(15 \times 15) \text{ cm}^2$ de alanlar açılarak toplam SAD=100 cm, sıcaklık $16,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ve basınç 903 mbar'da 100 MU süre verilerek TM 30010- SN 2403 silindirik iyon odasında ölçümler alınmıştır.



Şekil 4.35. Taklit kol şematik gösterimi



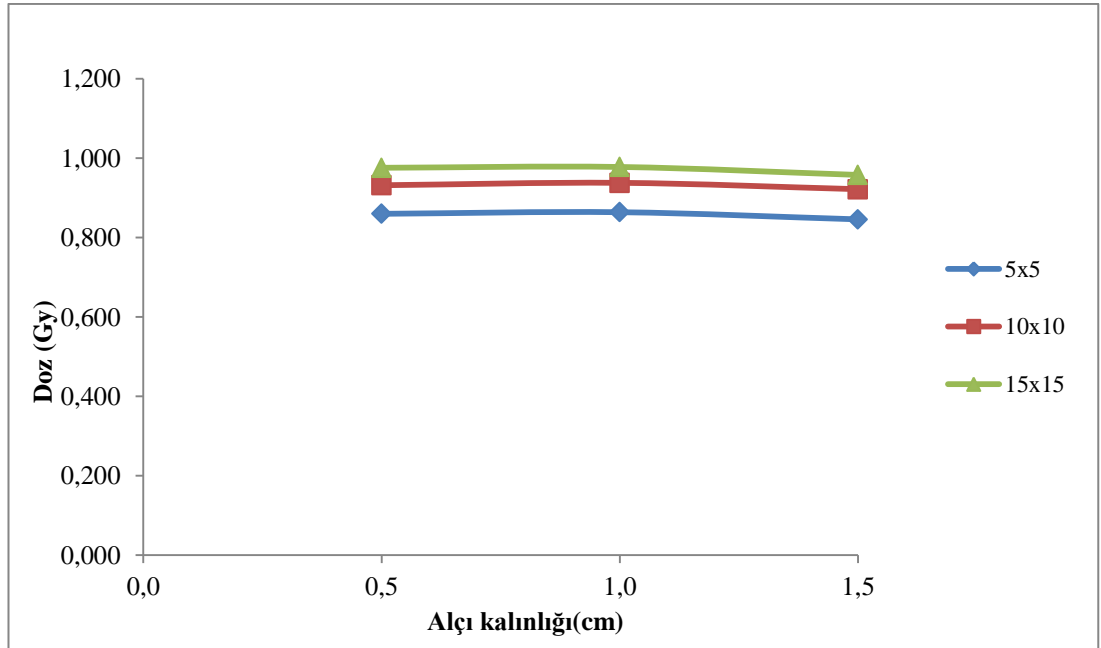
Şekil 4.36. Taklit bacak şematik gösterimi

Çizelge 4.9. Taklit kol için toplam derinlik 5 cm’de 6 MV’de kalınlıkla doz değişimi

Alçı kalınlığı (cm)	(5x5) cm ² Doz (Gy)	(10x10) cm ² Doz (Gy)	(15x15) cm ² Doz (Gy)
0,5	0,860	0,932	0,976
1,0	0,864	0,938	0,978
1,5	0,846	0,922	0,958

Çizelge 4.9’da verilen değerlerde görüldüğü gibi 1,0 cm’lik alçı kalınlığına kadar okunan doz değeri artarken bu noktadan sonra azalma görülmüştür. Bunun nedeni Çizelge 4.3’te verildiği gibi 6 MV’de alçının d_{max} noktasının 1,2 cm civarında olmasıdır. Ayrıca aynı kalınlıkta okunan doz değerlerinin alan açıklığının artmasıyla arttığı görülmektedir.

Şekil 4.37’de Taklit kol için 6 MV’de kalınlığa bağlı doz değişim grafiği verilmiştir.

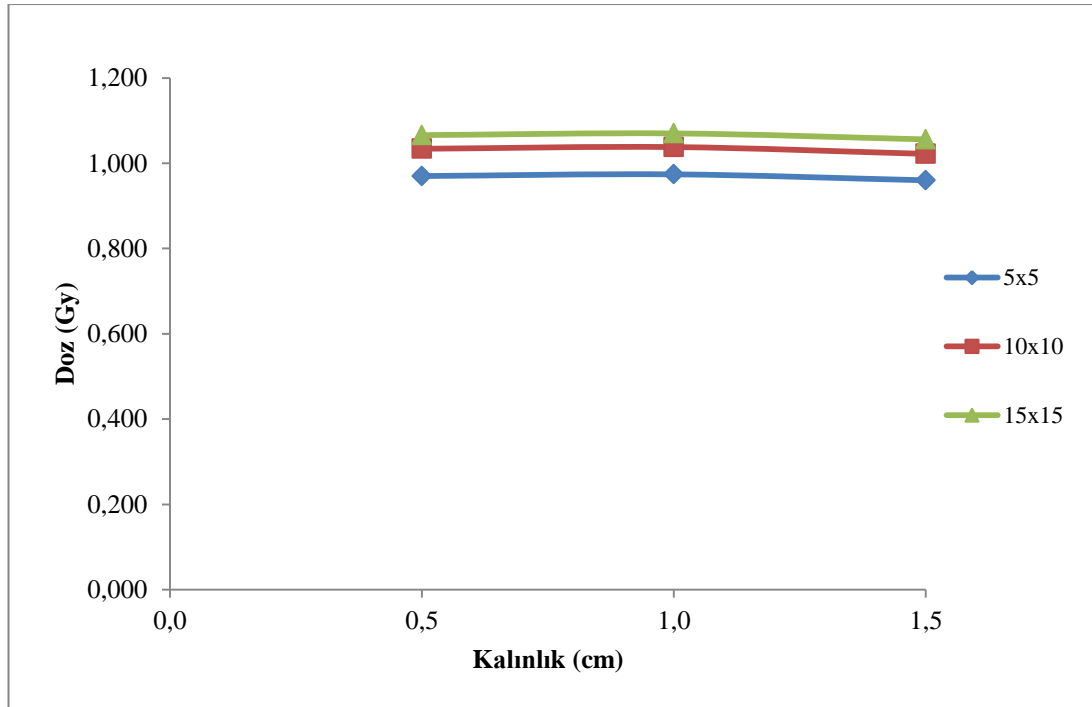


Şekil 4.37. Taklit kol için 6 MV’de doz kalınlık grafiği

Çizelge 4.10. Taklit kol için toplam derinlik 5 cm’de 18 MV’de kalınlıkla doz değişimi

Alçı kalınlığı (cm)	(5x5) cm ² Doz (Gy)	(10x10) cm ² Doz (Gy)	(15x15) cm ² Doz (Gy)
0,5	0,970	1,034	1,066
1,0	0,974	1,038	1,070
1,5	0,960	1,022	1,056

Şekil 4.38’de Taklit kol için 18 MV’de kalınlığa bağlı doz değişim grafiği verilmiştir.

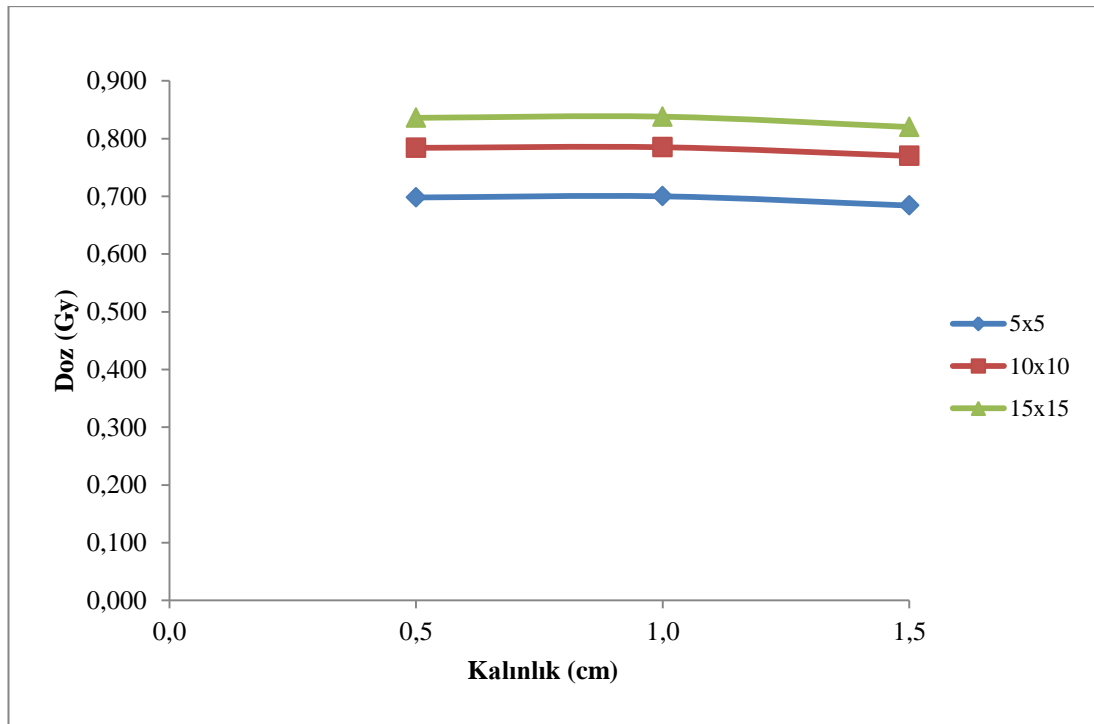


Şekil 4.38. Taklit kol için 18 MV’ de doz kalınlık grafiği

Çizelge 4.11. Taklit bacak için toplam derinlik 10 cm' de 6 MV'de kalınlıkla doz değişimi

Alçı kalınlığı (cm)	(5x5) cm ² Doz (Gy)	(10x10) cm ² Doz (Gy)	(15x15) cm ² Doz (Gy)
0,5	0,698	0,784	0,836
1,0	0,700	0,785	0,838
1,5	0,684	0,770	0,820

Şekil 4.39'da Taklit bacak için 6 MV'de kalınlığa bağlı doz değişim grafiği verilmiştir.

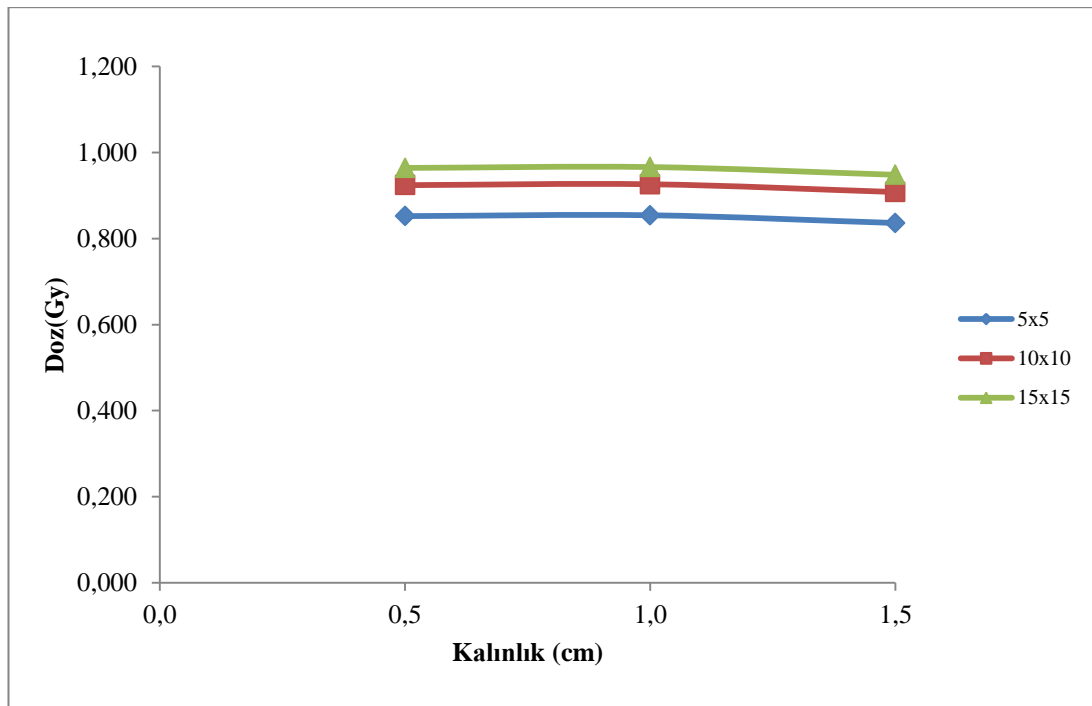


Şekil 4.39. Taklit bacak için 6 MV'de doz kalınlık grafiği

Çizelge 4.12. Taklit bacak için toplam derinlik 10 cm’de 18 MV’de kalınlıkla doz değişimi

Alçı kalınlığı (cm)	(5x5) cm ² Doz (Gy)	(10x10) cm ² Doz (Gy)	(15x15) cm ² Doz (Gy)
0,5	0,852	0,924	0,964
1,0	0,854	0,926	0,966
1,5	0,836	0,908	0,948

Şekil 4.40’da Taklit bacak için 18 MV’de kalınlığa bağlı doz değişim grafiği verilmiştir.

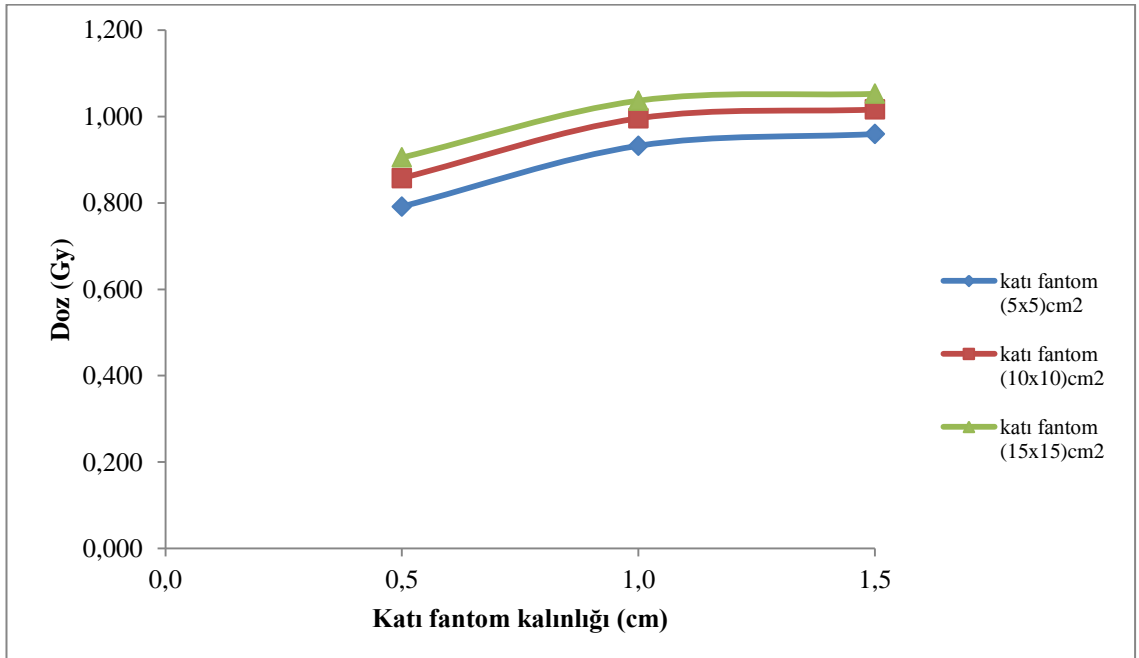


Şekil 4.40. Taklit bacak için 18 MV’de doz kalınlık grafiği

Taklit kol ve bacak için verilen değerlerle katı fantomun kalınlığa bağlı olan doz değişiminin karşılaştırılabilmesi için, 6 MV’deki değerler Çizelge 4.13 ve Şekil 4.41’de verilmiştir. 18 MV’deki değerler ise Çizelge 4.14 ve Şekil 4.42’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. 6 MV’de katı fantom kalınlığına bağlı değişen doz

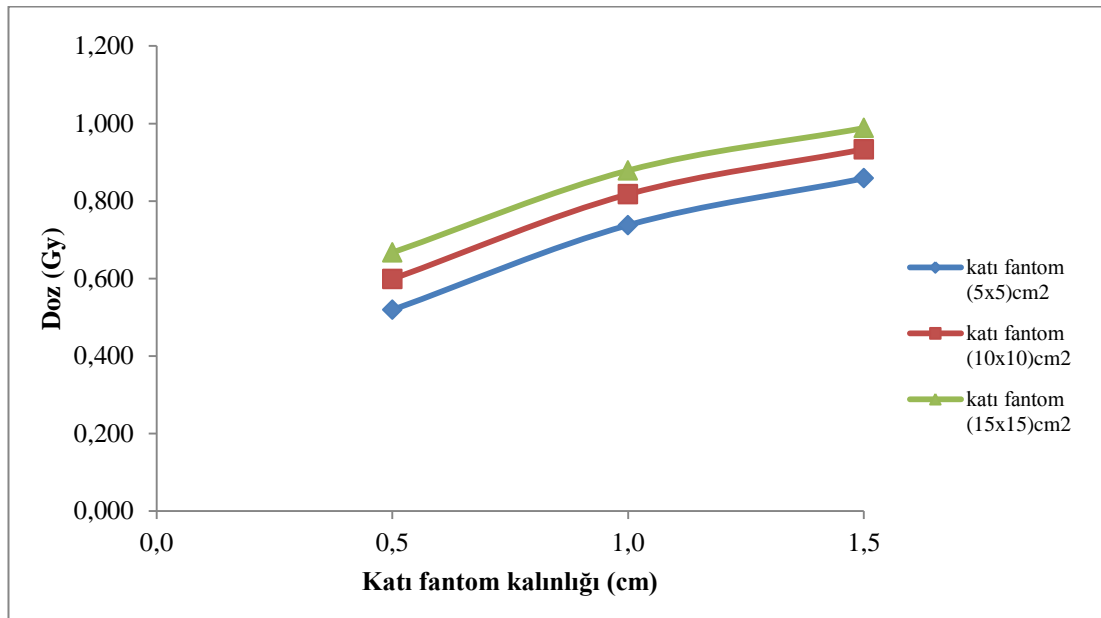
Katı Fantom Kalınlığı (cm)	(5x5) cm ² Doz (Gy)	(10x10) cm ² Doz (Gy)	(15x15) cm ² Doz (Gy)
0,5	0,792	0,857	0,905
1,0	0,932	0,996	1,036
1,5	0,959	1,016	1,052



Şekil 4.41. 6 MV’de katı fantom kalınlığına bağlı doz değişim grafiği

Çizelge 4.14. 18 MV'de katı fantom kalınlığına bağlı değişen doz

Katı Fantom Kalınlığı (cm)	(5x5) cm ² Doz (Gy)	(10x10) cm ² Doz (Gy)	(15x15) cm ² Doz (Gy)
0,5	0,519	0,599	0,667
1,0	0,738	0,817	0,879
1,5	0,858	0,934	0,988



Şekil 4.42. 18 MV'de katı fantom kalınlığına bağlı doz değişim grafiği

4.4. NIST X-Ray Programına Göre Alçının Bileşimindeki Elementlerin Kütle Azalma Katsayısının Hesaplanması

ODTÜ Merkezi Laboratuvar, AR-GE Eğitim ve Ölçme Merkezi'nde XRF cihazı ile analizi yapılmış olan alçının kütle azalma katsayısı NIST X-Ray (NIST: National Institute of Standards and Technology Standard Reference Data Program) programı kullanılarak hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

NIST X-Ray programı yardımıyla alçının içindeki bileşik ve elementlerin 6 MV ve 18 MV'deki değerlerden yararlanılarak, bu enerjilerdeki kütle azalma katsayıları hesaplanmıştır. NIST programındaki element ve bileşiklerin farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayılarını veren tablo Ek.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.15'te ODTÜ Merkezi Laboratuvar, AR-GE Eğitim ve Ölçme Merkezi'nden alçı için alınmış olan analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.15. Alçı içindeki bileşenler ve kütlece yüzdesi

Bileşen	Kütlece %
B ₂ O ₃	8,8500
CO ₂	4,0400
Na ₂ O	0,0069
MgO	0,3120
Al ₂ O ₃	0,0571
SiO ₂	0,3730
SO ₃	48,900
Cl	0,0079
K ₂ O	0,0084
CaO	36,700
Fe ₂ O ₃	0,0231
SrO	0,7310

Çizelge 4.16'da ise bu elementlerin NIST X-Ray programından okunan kütle azalma katsayıları verilmiştir.

Çizelge 4.16.Elementlerin NIST X-Ray programından alınan kütle azalma katsayıları

Element	6 MV Kütle azalma katsayısı (cm ² /g)	18 MV Kütle azalma katsayısı (cm ² /g)
B	0,04108	0,02248
O	0,04459	0,02552
C	0,04442	0,02469
Na	0,04282	0,02559
Mg	0,04426	0,02681
Al	0,04324	0,02655
Si	0,04480	0,02788
S	0,04498	0,02872
Cl	0,04328	0,02798
K	0,04399	0,02915
Ca	0,04524	0,03035
Fe	0,04265	0,03057
Sr	0,04079	0,03268

6 MV'de B₂O₃ için yapılan örnek hesap:

B₂O₃ bileşiğinde kütlece % bileşimi;

% 31,06 B

% 68,94 O

Alçı da ise kütlece % 8,85 B₂O₃ bulunmaktadır (Çizelge 4.15). Buna bağlı olarak da alçıdaki B ve O yüzdesine geçilirse;

% 2,74881 B ve % 6,10119 O olduğu görülür.

Çizelge 4.16'da verilen NIST elementlerin kütle azalma katsayıları (cm²/g) ve yoğunlukları kullanılarak alçıdaki B₂O₃'ün 6 MV'de lineer azalma katsayısı (μ) hesaplanır.

$$\mu(\text{cm}^{-1}) = \text{kütle azalma katsayısı} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\right) \times \text{yoğunluk} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \times \text{kütlece \%} \quad (4.1)$$

$$\rho_B = 2,34 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_O = 1,43 \text{ g/cm}^3$$

B₂O₃ için 6 MV'de toplam lineer azalma katsayısı;

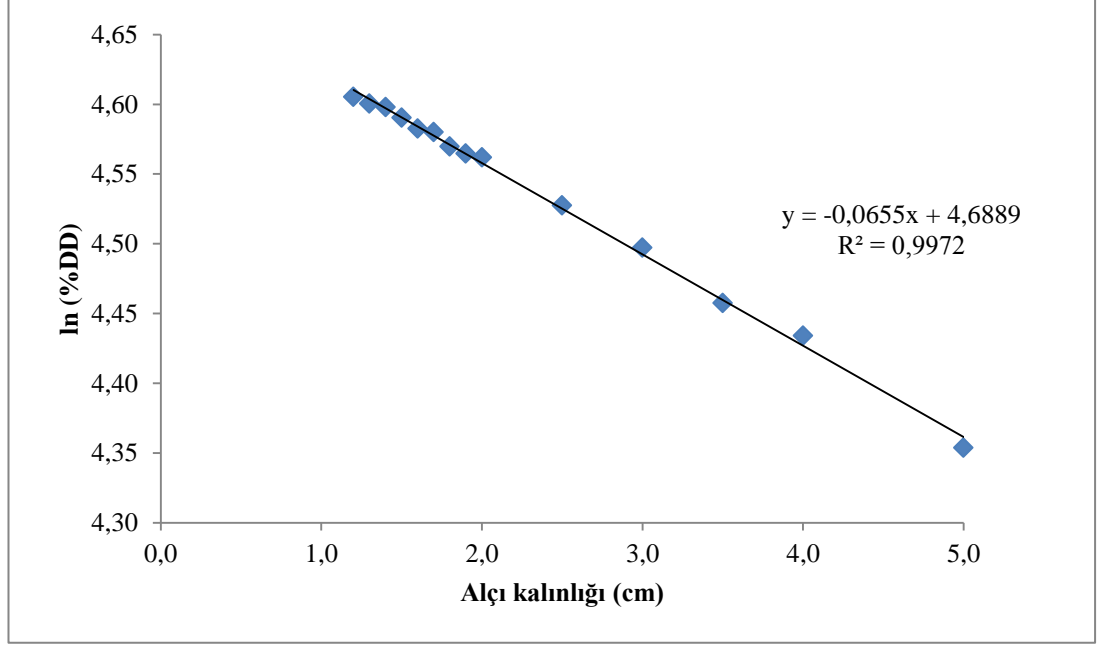
$$\begin{aligned} \mu_{B_2O_3}(\text{cm}^{-1}) = & [(0,04108 \text{ cm}^2/\text{g}) \times (2,34 \text{ g/cm}^3) \times (0,0274881) \\ & + (0,004459 \text{ cm}^2/\text{g}) \times (1,43 \text{ g/cm}^3) \times (0,0610119)] \end{aligned}$$

$$\mu_{B_2O_3}(\text{cm}^{-1}) = 0,006532 \text{ cm}^{-1}$$

Benzer şekilde diğer bileşiklerin de lineer azalma katsayısı hesaplanarak 6 MV'de alçının toplam lineer azalma katsayısı;

$$\mu = 0,0715 \text{ cm}^{-1} \text{ bulunmuştur.}$$

Elde edilen sonuç deneysel olarak elde edilen verilerle çizilen Şekil 4.43'te alçılı katı fantom için $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ 'de lineer azalma katsayısı $0,0655 \text{ cm}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen iki değer karşılaştırılırsa birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.43. 6 MV'de alçılı katı fantom $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ için lineer azalma katsayısı grafiği

18 MV'de B_2O_3 için yapılan örnek hesap:

Çizelge 4.16'da verilen NIST elementlerin kütle azalma katsayıları (cm^2/g) ve yoğunlukları kullanılarak B_2O_3 'ün 18 MV'de lineer azalma katsayısı (μ) hesaplanır.

$$\rho_B = 2,34 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_O = 1,43 \text{ g/cm}^3$$

B_2O_3 için 18 MV' de toplam lineer azalma katsayısı;

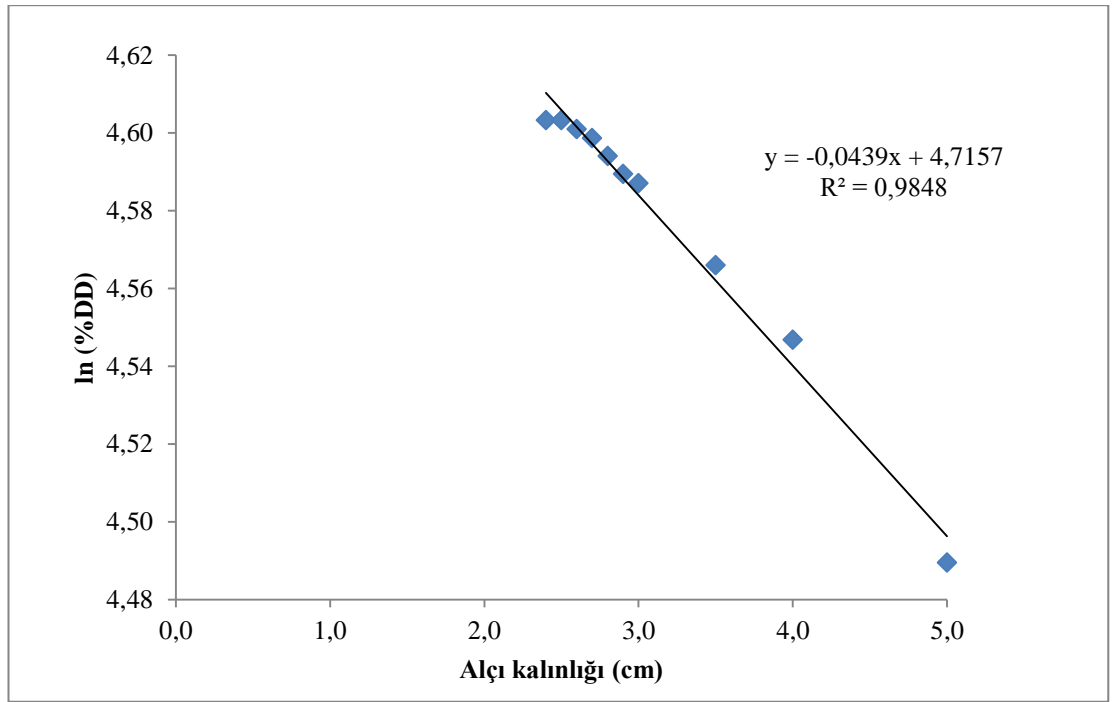
$$\begin{aligned} \mu_{B_2O_3}(\text{cm}^{-1}) = & [(0,02248 \text{ cm}^2/\text{g}) \times (2,34 \text{ g/cm}^3) \times (0,0274881) \\ & + (0,02552 \text{ cm}^2/\text{g}) \times (1,43 \text{ g/cm}^3) \times (0,0610119)] \end{aligned}$$

$$\mu_{B_2O_3}(\text{cm}^{-1}) = 0,003672 \text{ cm}^{-1}$$

Benzer şekilde diğer bileşiklerin de lineer azalma katsayısı hesaplanarak 18 MV’de alçının toplam lineer azalma katsayısı;

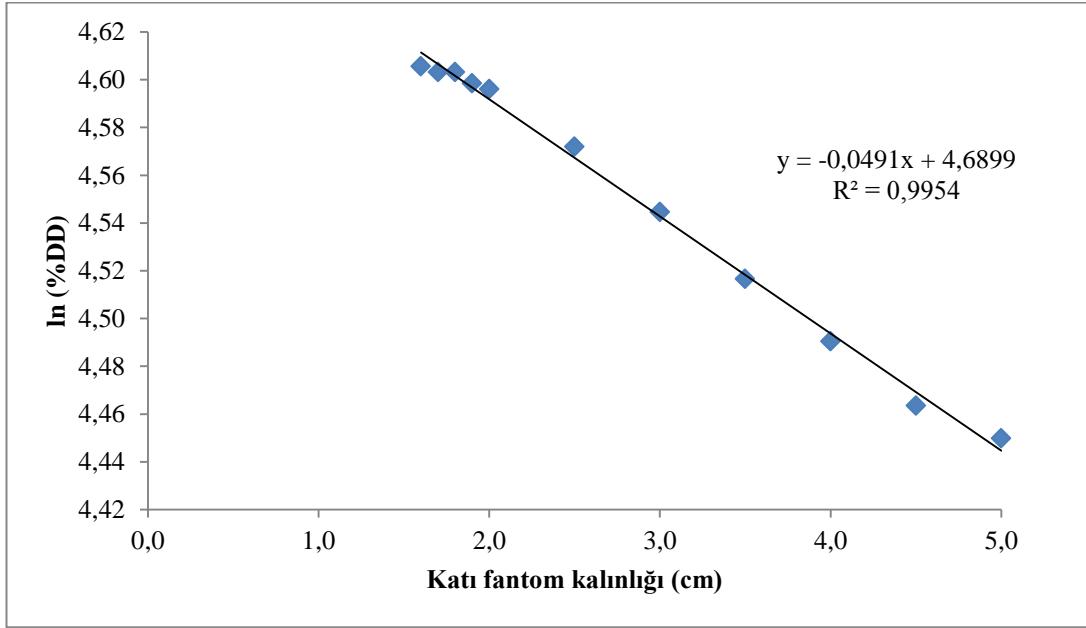
$\mu = 0,0438 \text{ cm}^{-1}$ bulunmuştur.

Elde edilen sonuç deneysel olarak elde edilen verilerle çizilen Şekil 4.44’te alçılı katı fantom için $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ ’de lineer azalma katsayısı $0,0439 \text{ cm}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen iki değer karşılaştırılırsa birbirine yakın olduğu görülmektedir.



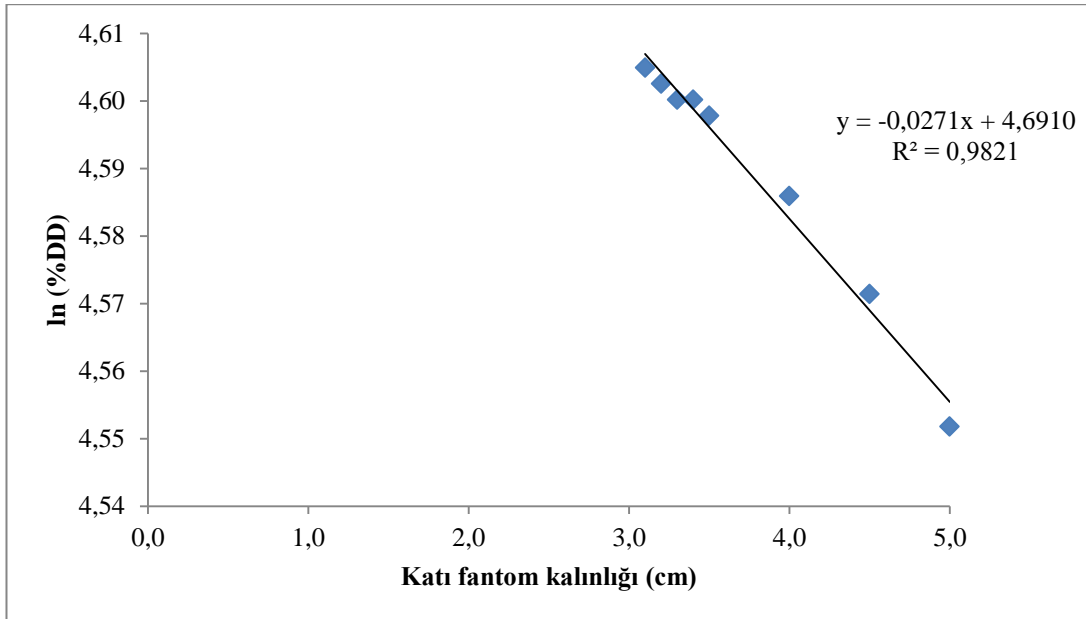
Şekil 4.44. 18 MV’de alçılı katı fantom $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ için lineer azalma katsayısı grafiği

6 MV’de katı fantom eş değeri olan su için, $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ ’de lineer azalma katsayısı NIST X-Ray programından (Ek. 2) $0,0494 \text{ cm}^{-1}$ olarak okunmuştur. Bu değer Şekil.4.45’te 6 MV’de katı fantom için hesaplanan lineer azalma katsayısı $0,0491 \text{ cm}^{-1}$ ile uyum sağlamıştır.



Şekil 4.45. 6 MV'de katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

18 MV'de katı fantom eş değeri olan su için, (5x5) cm²'de lineer azalma katsayısı NIST X-Ray programından (Ek.2) 0,0271 cm⁻¹ olarak okunmuştur. Bu değer Şekil.4.46'da 18 MV'de katı fantom için hesaplanan lineer azalma katsayısı 0,0271 cm⁻¹ ile uyum sağlamıştır.



Şekil 4.46. 18 MV'de katı fantom (5x5) cm² için lineer azalma katsayısı grafiği

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Deneysel çalışmaları Atatürk Göğüs Hastalıkları ve Göğüs Cerrahisi Eğitim ve Araştırma Hastanesi'nde yapılan tez kapsamında LINAC, Siemens Oncor Impression M5395 cihazı kullanılarak 6 MV ve 18 MV enerjilerde çalışılmıştır. Radyoterapide amaç, hedef organın en doğru dozu alıp kritik organ ve sağlıklı dokuların en az dozu almasıdır. Yapılan çalışmalarda alçılı hastalara verilmesi gereken radyasyon dozunun iyi planlanabilmesi için alçı kalınlığının doza etkisi araştırılmıştır.

Alçı radyoterapide şu amaçlarla kullanılır;

- 1) 2D (iki boyutlu) kontur almak için,
- 2) Hasta sabitlemek için,



Resim 5. 1. Radyoterapi uygulanan hastanın alçı yardımıyla sabitlenmesi

Kalıp olarak kullanıldığında hem hasta sabitlemeyi hem de dozu cilt yüzeyine taşımak için kullanılır.

- 3) Vücutta kırık, çatlak veya herhangi bir sabitlemeden dolayı alçıya alınmış hastaya radyoterapi uygulanmasında.

Yapılan ölçümlerde 6 MV ve 18 MV'de (10x10) cm² alan açıklıklarında elde edilen d_{max} değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. 6 MV ve 18 MV’de katı fantom ve alçılı katı fantom için (10x10) cm² alan açıklığında d_{max} değerleri

Enerji d_{max}	6 MV	18 MV
Alçılı katı fantom	1,1 cm	2,0 cm
Katı fantom	1,5 cm	3,0 cm

Çizelge 5.1’den görüldüğü gibi alçılı katı fantomdaki lineer azaltma katsayısının katı fantoma göre büyük olması d_{max} değerini cilde yaklaştırmaktadır. Bolus etkisi yapması bu fotonların (6 MV ve 18 MV), “skin sparing effect” i yani cilt koruyucu etkiyi ortadan kaldırır. Alçıda bolus etkisinin olması eritem (cilt yanığı) veya deskuamasyon (sulu cilt yanığı) gibi bazen istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Burada dikkat edilecek nokta hastada alçının bolus etkisi yaparak cilt dozunu artırmasıdır.

Alçının ortalama fiziksel yoğunluğu 1,25 kg/dm³ ile 1,60 kg/dm³ arasında olabilir ancak alçının kalıplaştırmasında homojen bir dağılım olmayıp ara ara hava kabarcıkları bulunabilir. Atatürk Göğüs Hastalıkları ve Göğüs Cerrahisi Eğitim ve Araştırma Hastanesi’ne gelen alçılı hastalarda rastgele alınan 10 noktada ortalama HU (CT number) değeri 222,3 bulunmuştur, elektron yoğunluğu ise 1,2665 olarak bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Alçı bir hastadan herhangi 10 noktadan alınan ölçümlerin HU ve elektron yoğunluğu değerleri

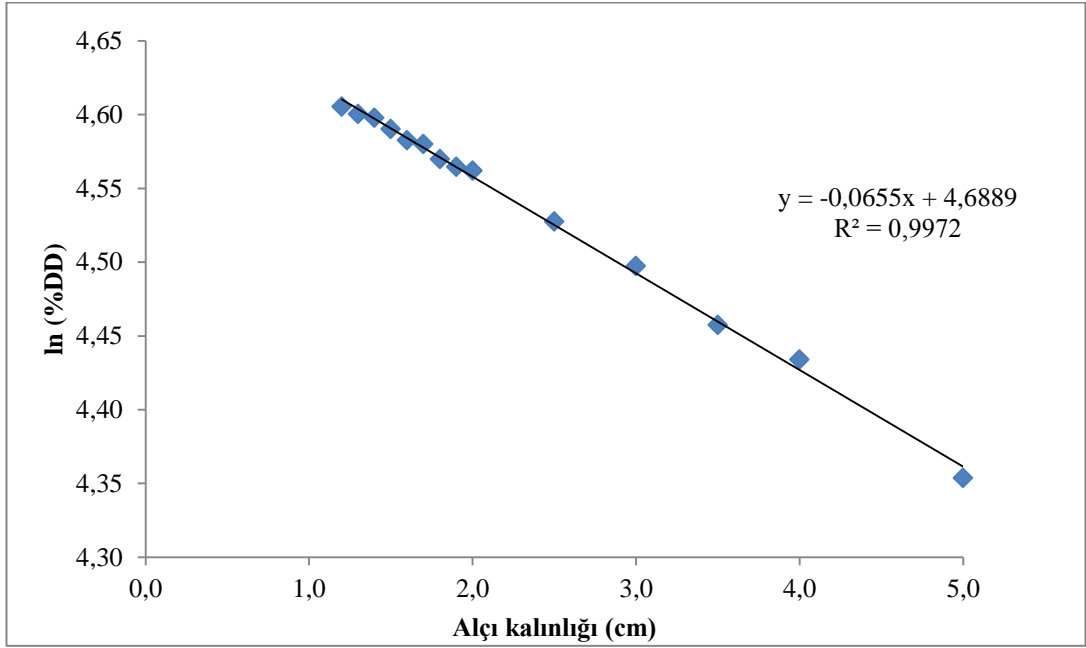
CT numarası (HU)	Elektron Yoğunluğu
424	1,421
220	1,274
227	1,284
64	1,137
162	1,232
258	1,305
35	1,095
419	1,432
397	1,411
17	1,074

Bu tür hastalarda el hesabı ile TPS kontrolü yapılırken alçı kalınlığının hesaba eklenmesi ayrıca alçı ile cilt arasındaki hava değerinin de el hesabına katılması gerekmektedir.

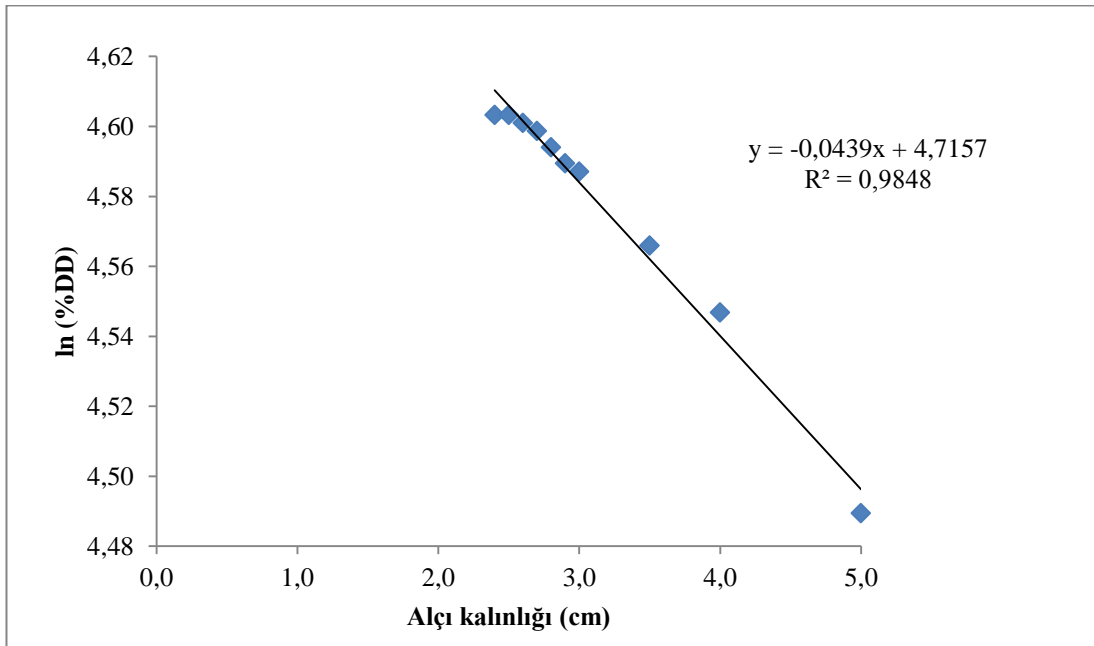
Doku eşdeğeri olan katı fantomun ve alçılı katı fantomun kalınlıkları değiştirilerek 6 MV ve 18 MV’de farklı alan açıklıklarındaki doz değerleri okunmuştur. Alçılı sistemde bulunan pamuğun da etkisinin net olarak görülebilmesi için pamuklu katı fantom içinde benzer şekilde ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda pamuğun soğurulan doza etkisinin yok denilebilecek kadar az olduğu gözlenmiştir. Ayrıca taklit kol ve bacak sistemi oluşturularak 5,0 cm ve 10,0 cm derinlikte alçı kalınlığı 0,5 cm, 1,0 cm ve 1,5 cm olacak şekilde değiştirilerek doz değerleri ölçülmüştür.

Alınan ölçümler doğrultusunda çizilen tüm grafiklerden, artan enerjiye bağlı olarak aynı kalınlık ve alan açıklığında ölçülen doz miktarının azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi 6 MV’de lineer azalma katsayısı $0,0655 \text{ cm}^{-1}$ ve 18 MV’de lineer azalma katsayısı $0,0439 \text{ cm}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. 1. (5x5) cm² 6 MV’de alçılı katı fantom için lineer azalma katsayısı grafiği



Şekil 5. 2. (5x5) cm² 18 MV’de alçılı katı fantom için lineer azalma katsayısı grafiği

Çalışmamızda NIST X-Ray programı kullanılarak 6 MV ve 18 MV’de alçının lineer azalma katsayısı teorik olarak hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Teorik olarak elde edilen lineer azalma katsayıları deneysel bulgularla karşılaştırıldığında (5x5) cm²’lik alan açıklığında birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Bu sonuçların doğruluğunun ispatlanabilmesi için su eşdeğeri olan katı fantom için de 6 MV ve 18 MV’de deneysel ve teorik olarak lineer azalma katsayıları hesaplanmış ve aynı şekilde (5x5) cm²’lik alan açıklığında birbirine yakın olduğu görülmüştür.

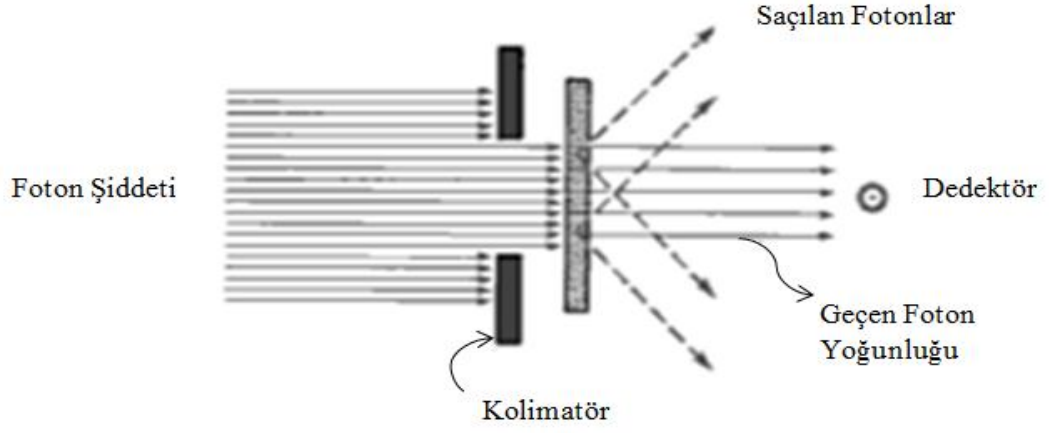
Çizelge 5.3’te alçılı katı fantom ve katı fantom için (5x5) cm² alan açıklığında deneysel ve teorik olarak hesaplanan lineer azalma katsayılarının karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 5.3. Alçılı katı fantom ve katı fantom için deneysel ve teorik olarak hesaplanan lineer azalma katsayısının karşılaştırılması

	6 MV		18 MV	
	Alçılı katı fantom	Katı fantom	Alçılı katı fantom	Katı fantom
Deneysel olarak elde edilen μ (cm ⁻¹)	0,0655	0,0491	0,0457	0,0271
Teorik olarak hesaplanan μ (cm ⁻¹)	0,0715	0,0494	0,0438	0,0271

Elde edilen bu sonuçlara göre (5x5) cm²’lik alan açıklığında katı fantom için de lineer azalma katsayılarının deneysel ve teorik olarak örtüştüğü için, alçılı katı fantomda da (5x5) cm²’lik alan açıklığının uygun olduğu söylenebilir.

Lineer azalma katsayısında, kütle geçildikten sonra saçılmaları dahil etmeyecek uzaklıkta dedektör kullanılır. Radyoterapide ise hem saçılmaların hem de geçen fotonların oluşturduğu azalma hesaplanır. Bu çalışmada ise saçılmaları lineer azalma hesabının dışında tutabilmek için narrow beam ölçebileceğimiz (yani saçılmaların en az olduğu) (5x5) cm²’lik alan kabul edildi. Şekil 5.3’te bu düzeneğin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5. 3. Gönderilen foton şiddetinin hedef kalınlığına bağlı değişimi

Sonuçtaki sapmalar az olan artı fark bu saçılmalardan gelmiş veya kullandığımız enerjinin saf monoenerjik ($6 \text{ MV} \cong 2 \text{ MeV}$ ve $18 \text{ MV} \cong 6 \text{ MeV}$) olmadığından olabilir. Çünkü modellemelerin tümü monoenerjiler (2 MeV ve 6 MeV) için yapılmıştır.

Alçılı hasta modellememiz ile katı fantom arasında anlamlı bir fark çıkmamasının nedeni alçı ile hasta cildi arasında hava bulunması nedeni ile alçının yarattığı yoğunluğu, havanın yarattığı yoğunlukla su eşdeğeri yoğunluğa eşitlenmesidir.

Aynı enerji ve aynı kalınlıkta artan alan açıklığında ölçülen doz miktarının da arttığı gözlenmiştir. Bu da alan açıklığının artmasıyla saçılmaların arttığını ve lineer azalma katsayısının azaldığının göstergesidir. Çizelge 5.4'te alçılı katı fantom için alan açıklığına bağlı olarak lineer azalama katsayısının değişimi verilmiştir.

Çizelge 5. 4. Alçılı katı fantom için alan açıklığına bağlı lineer azalma katsayısı değişimi

Alan açıklığı	6 MV μ (cm ⁻¹)	18 MV μ (cm ⁻¹)
(5x5) cm ²	0,0655	0,0457
(10x10) cm ²	0,0564	0,0425
(15x15) cm ²	0,0512	0,0404

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre alçının farklı enerjiler, alan açıklıkları ve kalınlıklardaki doz üzerine etkisi görülmüş olup, lineer azalma katsayıları hesaplanmıştır. Sonuç olarak alçının soğurulan doz üzerindeki etkisi deneysel ve teorik olarak sunulmuştur.

KAYNAKLAR

Akar, A., Gümüş, H., Okumuşoğlu, N. T., “Electron Inelastic Mean Free Path Formula and CSDA-Range Calculation in Biological Compounds for Low and Intermediate Energies”, *Applied Radiation and Isotopes*, 64 (5):543-550 (2006).

Beiser, A., “Modern Fiziğin Kavramları”, Ömür Akyüz., *Mc Graw Hill-Akademi*, İstanbul, 13: 475-478 (1997).

Bomford, C. K., Kunkler, I.H., “Walter and Miller’s Textbook of Radiotherapy 6th ed.”, *Churcill Livingstone*, 89-111 (1994).

Chantler, C.T., “Theoretical Form Factor, Attenuation and Scattering Tabulation for $Z=1-92$ from $E=1-10$ eV to $E=0.4-1.0$ MeV”, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 24, 71–643 (1995).

Das, A., Ferbel, T., “Introduction to nuclear and particle physics”, *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, Singapore 146-151 (2005).

Dietze, G., Kaul, A., Becker, D., “Radiological Protection”, *Springer*, 355-368 (2003).

Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, Levring, H., “X-ray absorption in matter, Reengineering XCOM”, *Radiation Physics Chemistry*, 23-24 (2001)

Göksel, S.A., “Radyasyonların Biyolojik Etkileri ve Radyasyon Korunması”, *İ.T.Ü. Matbaası*, İstanbul, 56-64 (1973).

Hubbel, J.H., “Bibliography of photon total cross-section (Attenuation coefficients) measurements 10 eV to 13,5 GeV”, *NISTIR*, 5437(1994).

Hubbel, J.H., “Review of photon interaction cross-section data in the medical and biological context”, *Phys. Med. Biol.*, R1-R22, 44 (1999).

Hubbel, J.H., “X-ray cross-sections and crossroads (The International Radiation Physics Society)- Richard Pratt’s contribution to both”, *Radiat. Phys. Chem.*, 59 (2000)

Hubbel, J.H., Seltzer, S.M., “Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements $Z=1$ to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest”, NISTIR 5632, *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD 20899, USA.

IAEA, “Technical Reports Series No. 277 : Absorbed dose determination in photon and electron beams”, *IAEA*, Vienna, 9-11 (1987).

Khan, F.M., “The Physics of Radiation Therapy 3rd ed”, *Lippincott Williams and Wilkins*, Philadelphia, Chapter 4, 42-64, 74 Chapter 14, 297, 315-317 (2003).

Krane, S.K., “Nükleer Fizik 1. Cilt”, Çeviri Edit. Şarer B., *Palme Yayıncılık*, Ankara, 193-206, 246,588-590 (2001).

Martin, J. E., “Effect of E and Z on Proton Attenuation and Absorption”, *Physics for radiation protection*, Michigan, 252 (2003).

Martin, J. E., “Physics for Radiation Protection 2nd ed.”, *Wiley- Vch Verlag*, 278 (2011).

Parthasaradhi, K., Esposito, A., Pelliccioni, M., “ Photon attenuation coefficients in tissue equivalent compounds” , *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part A. Applied Radiation and Isotopes*, 43: 1481-1484 (1992).

Pychlau, G.,“ Instruction manual RW3 slab phantom T29672 and T40006.1.001”, *PTW*, Germany, 5, 6, (2007)

UROC, “Temel Radyoterapi, Radyasyon Fiziği ve Radyobioloji Kursu Programı”, *V. Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi*, İzmir, 13,14,21,22 (2002).

Stabin, M.G.,“ Radiation Protection and Dozimetry” Radiological Protection, *Springer* ,244-308 (2008)

EKLER

EK-1. NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.1. Bor için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	1.229E+03	1.228E+03
1.50000E-03	3.766E+02	3.759E+02
2.00000E-03	1.597E+02	1.591E+02
3.00000E-03	4.667E+01	4.617E+01
4.00000E-03	1.927E+01	1.886E+01
5.00000E-03	9.683E+00	9.332E+00
6.00000E-03	5.538E+00	5.223E+00
8.00000E-03	2.346E+00	2.072E+00
1.00000E-02	1.255E+00	1.006E+00
1.50000E-02	4.827E-01	2.698E-01
2.00000E-02	3.014E-01	1.084E-01
3.00000E-02	2.063E-01	3.506E-02
4.00000E-02	1.793E-01	2.084E-02
5.00000E-02	1.665E-01	1.737E-02
6.00000E-02	1.583E-01	1.680E-02
8.00000E-02	1.472E-01	1.785E-02
1.00000E-01	1.391E-01	1.940E-02
1.50000E-01	1.243E-01	2.255E-02
2.00000E-01	1.136E-01	2.453E-02
3.00000E-01	9.862E-02	2.654E-02
4.00000E-01	8.834E-02	2.731E-02
5.00000E-01	8.065E-02	2.749E-02
6.00000E-01	7.460E-02	2.737E-02
8.00000E-01	6.549E-02	2.671E-02
1.00000E+00	5.890E-02	2.586E-02
1.25000E+00	5.266E-02	2.472E-02
1.50000E+00	4.791E-02	2.362E-02
2.00000E+00	4.108E-02	2.171E-02
3.00000E+00	3.284E-02	1.889E-02
4.00000E+00	2.798E-02	1.698E-02
5.00000E+00	2.476E-02	1.562E-02
6.00000E+00	2.248E-02	1.461E-02
8.00000E+00	1.945E-02	1.322E-02
1.00000E+01	1.755E-02	1.232E-02
1.50000E+01	1.495E-02	1.104E-02
2.00000E+01	1.368E-02	1.039E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.2. Karbon için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	2.211E+03	2.209E+03
1.50000E-03	7.002E+02	6.990E+02
2.00000E-03	3.026E+02	3.016E+02
3.00000E-03	9.033E+01	8.963E+01
4.00000E-03	3.778E+01	3.723E+01
5.00000E-03	1.912E+01	1.866E+01
6.00000E-03	1.095E+01	1.054E+01
8.00000E-03	4.576E+00	4.242E+00
1.00000E-02	2.373E+00	2.078E+00
1.50000E-02	8.071E-01	5.627E-01
2.00000E-02	4.420E-01	2.238E-01
3.00000E-02	2.562E-01	6.614E-02
4.00000E-02	2.076E-01	3.343E-02
5.00000E-02	1.871E-01	2.397E-02
6.00000E-02	1.753E-01	2.098E-02
8.00000E-02	1.610E-01	2.037E-02
1.00000E-01	1.514E-01	2.147E-02
1.50000E-01	1.347E-01	2.449E-02
2.00000E-01	1.229E-01	2.655E-02
3.00000E-01	1.066E-01	2.870E-02
4.00000E-01	9.546E-02	2.950E-02
5.00000E-01	8.715E-02	2.969E-02
6.00000E-01	8.058E-02	2.956E-02
8.00000E-01	7.076E-02	2.885E-02
1.00000E+00	6.361E-02	2.792E-02
1.25000E+00	5.690E-02	2.669E-02
1.50000E+00	5.179E-02	2.551E-02
2.00000E+00	4.442E-02	2.345E-02
3.00000E+00	3.562E-02	2.048E-02
4.00000E+00	3.047E-02	1.849E-02
5.00000E+00	2.708E-02	1.710E-02
6.00000E+00	2.469E-02	1.607E-02
8.00000E+00	2.154E-02	1.468E-02
1.00000E+01	1.959E-02	1.380E-02
1.50000E+01	1.698E-02	1.258E-02
2.00000E+01	1.575E-02	1.198E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.3. Alüminyum için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	1.185E+03	1.183E+03
1.50000E-03	4.022E+02	4.001E+02
1.55960E-03	3.621E+02	3.600E+02
1.55960E-03	3.957E+03	3.829E+03
2.00000E-03	2.263E+03	2.204E+03
3.00000E-03	7.880E+02	7.732E+02
4.00000E-03	3.605E+02	3.545E+02
5.00000E-03	1.934E+02	1.902E+02
6.00000E-03	1.153E+02	1.133E+02
8.00000E-03	5.033E+01	4.918E+01
1.00000E-02	2.623E+01	2.543E+01
1.50000E-02	7.955E+00	7.487E+00
2.00000E-02	3.441E+00	3.094E+00
3.00000E-02	1.128E+00	8.778E-01
4.00000E-02	5.685E-01	3.601E-01
5.00000E-02	3.681E-01	1.840E-01
6.00000E-02	2.778E-01	1.099E-01
8.00000E-02	2.018E-01	5.511E-02
1.00000E-01	1.704E-01	3.794E-02
1.50000E-01	1.378E-01	2.827E-02
2.00000E-01	1.223E-01	2.745E-02
3.00000E-01	1.042E-01	2.816E-02
4.00000E-01	9.276E-02	2.862E-02
5.00000E-01	8.445E-02	2.868E-02
6.00000E-01	7.802E-02	2.851E-02
8.00000E-01	6.841E-02	2.778E-02
1.00000E+00	6.146E-02	2.686E-02
1.25000E+00	5.496E-02	2.565E-02
1.50000E+00	5.006E-02	2.451E-02
2.00000E+00	4.324E-02	2.266E-02
3.00000E+00	3.541E-02	2.024E-02
4.00000E+00	3.106E-02	1.882E-02
5.00000E+00	2.836E-02	1.795E-02
6.00000E+00	2.655E-02	1.739E-02
8.00000E+00	2.437E-02	1.678E-02
1.00000E+01	2.318E-02	1.650E-02
1.50000E+01	2.195E-02	1.631E-02
2.00000E+01	2.168E-02	1.633E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.4. Oksijen için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	4.590E+03	4.576E+03
1.50000E-03	1.549E+03	1.545E+03
2.00000E-03	6.949E+02	6.926E+02
3.00000E-03	2.171E+02	2.158E+02
4.00000E-03	9.315E+01	9.221E+01
5.00000E-03	4.790E+01	4.715E+01
6.00000E-03	2.770E+01	2.708E+01
8.00000E-03	1.163E+01	1.116E+01
1.00000E-02	5.952E+00	5.565E+00
1.50000E-02	1.836E+00	1.545E+00
2.00000E-02	8.651E-01	6.179E-01
3.00000E-02	3.779E-01	1.729E-01
4.00000E-02	2.585E-01	7.530E-02
5.00000E-02	2.132E-01	4.414E-02
6.00000E-02	1.907E-01	3.207E-02
8.00000E-02	1.678E-01	2.468E-02
1.00000E-01	1.551E-01	2.355E-02
1.50000E-01	1.361E-01	2.506E-02
2.00000E-01	1.237E-01	2.679E-02
3.00000E-01	1.070E-01	2.877E-02
4.00000E-01	9.566E-02	2.953E-02
5.00000E-01	8.729E-02	2.971E-02
6.00000E-01	8.070E-02	2.957E-02
8.00000E-01	7.087E-02	2.887E-02
1.00000E+00	6.372E-02	2.794E-02
1.25000E+00	5.697E-02	2.669E-02
1.50000E+00	5.185E-02	2.551E-02
2.00000E+00	4.459E-02	2.350E-02
3.00000E+00	3.597E-02	2.066E-02
4.00000E+00	3.100E-02	1.882E-02
5.00000E+00	2.777E-02	1.757E-02
6.00000E+00	2.552E-02	1.668E-02
8.00000E+00	2.263E-02	1.553E-02
1.00000E+01	2.089E-02	1.483E-02
1.50000E+01	1.866E-02	1.396E-02
2.00000E+01	1.770E-02	1.360E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.5. Magnezyum için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	9.225E+02	9.203E+02
1.14237E-03	6.474E+02	6.452E+02
1.30500E-03	4.530E+02	4.509E+02
1.30500E-03	5.444E+03	5.310E+03
1.50000E-03	4.004E+03	3.918E+03
2.00000E-03	1.932E+03	1.899E+03
3.00000E-03	6.585E+02	6.499E+02
4.00000E-03	2.974E+02	2.937E+02
5.00000E-03	1.583E+02	1.561E+02
6.00000E-03	9.381E+01	9.227E+01
8.00000E-03	4.061E+01	3.965E+01
1.00000E-02	2.105E+01	2.036E+01
1.50000E-02	6.358E+00	5.925E+00
2.00000E-02	2.763E+00	2.432E+00
3.00000E-02	9.306E-01	6.855E-01
4.00000E-02	4.881E-01	2.815E-01
5.00000E-02	3.292E-01	1.451E-01
6.00000E-02	2.570E-01	8.820E-02
8.00000E-02	1.951E-01	4.671E-02
1.00000E-01	1.686E-01	3.410E-02
1.50000E-01	1.394E-01	2.766E-02
2.00000E-01	1.245E-01	2.761E-02
3.00000E-01	1.065E-01	2.871E-02
4.00000E-01	9.492E-02	2.928E-02
5.00000E-01	8.647E-02	2.938E-02
6.00000E-01	7.988E-02	2.921E-02
8.00000E-01	7.008E-02	2.848E-02
1.00000E+00	6.296E-02	2.753E-02
1.25000E+00	5.629E-02	2.629E-02
1.50000E+00	5.129E-02	2.514E-02
2.00000E+00	4.426E-02	2.322E-02
3.00000E+00	3.613E-02	2.067E-02
4.00000E+00	3.159E-02	1.915E-02
5.00000E+00	2.873E-02	1.819E-02
6.00000E+00	2.681E-02	1.756E-02
8.00000E+00	2.445E-02	1.683E-02
1.00000E+01	2.313E-02	1.646E-02
1.50000E+01	2.168E-02	1.614E-02
2.00000E+01	2.127E-02	1.609E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementelerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.6. Sodyum için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy	μ/ρ	μ_{en}/ρ
1.00000E-03	6.542E+02	6.522E+02
1.03542E-03	5.960E+02	5.941E+02
1.07210E-03	5.429E+02	5.410E+02
1.07210E-03	6.435E+03	6.320E+03
1.50000E-03	3.194E+03	3.151E+03
2.00000E-03	1.521E+03	1.504E+03
3.00000E-03	5.070E+02	5.023E+02
4.00000E-03	2.261E+02	2.238E+02
5.00000E-03	1.194E+02	1.178E+02
6.00000E-03	7.030E+01	6.915E+01
8.00000E-03	3.018E+01	2.941E+01
1.00000E-02	1.557E+01	1.499E+01
1.50000E-02	4.694E+00	4.313E+00
2.00000E-02	2.057E+00	1.759E+00
3.00000E-02	7.197E-01	4.928E-01
4.00000E-02	3.969E-01	2.031E-01
5.00000E-02	2.804E-01	1.063E-01
6.00000E-02	2.268E-01	6.625E-02
8.00000E-02	1.796E-01	3.761E-02
1.00000E-01	1.585E-01	2.931E-02
1.50000E-01	1.335E-01	2.579E-02
2.00000E-01	1.199E-01	2.635E-02
3.00000E-01	1.029E-01	2.771E-02
4.00000E-01	9.185E-02	2.833E-02
5.00000E-01	8.372E-02	2.845E-02
6.00000E-01	7.736E-02	2.830E-02
8.00000E-01	6.788E-02	2.760E-02
1.00000E+00	6.100E-02	2.669E-02
1.25000E+00	5.454E-02	2.549E-02
1.50000E+00	4.968E-02	2.437E-02
2.00000E+00	4.282E-02	2.249E-02
3.00000E+00	3.487E-02	1.997E-02
4.00000E+00	3.037E-02	1.842E-02
5.00000E+00	2.753E-02	1.743E-02
6.00000E+00	2.559E-02	1.675E-02
8.00000E+00	2.319E-02	1.595E-02
1.00000E+01	2.181E-02	1.552E-02
1.50000E+01	2.023E-02	1.508E-02
2.00000E+01	1.970E-02	1.496E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.7. Sodyum için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	1.570E+03	1.567E+03
1.50000E-03	5.355E+02	5.331E+02
1.83890E-03	3.092E+02	3.070E+02
1.83890E-03	3.192E+03	3.059E+03
2.00000E-03	2.777E+03	2.669E+03
3.00000E-03	9.784E+02	9.516E+02
4.00000E-03	4.529E+02	4.427E+02
5.00000E-03	2.450E+02	2.400E+02
6.00000E-03	1.470E+02	1.439E+02
8.00000E-03	6.468E+01	6.313E+01
1.00000E-02	3.389E+01	3.289E+01
1.50000E-02	1.034E+01	9.794E+00
2.00000E-02	4.464E+00	4.076E+00
3.00000E-02	1.436E+00	1.164E+00
4.00000E-02	7.012E-01	4.782E-01
5.00000E-02	4.385E-01	2.430E-01
6.00000E-02	3.207E-01	1.434E-01
8.00000E-02	2.228E-01	6.896E-02
1.00000E-01	1.835E-01	4.513E-02
1.50000E-01	1.448E-01	3.086E-02
2.00000E-01	1.275E-01	2.905E-02
3.00000E-01	1.082E-01	2.932E-02
4.00000E-01	9.614E-02	2.968E-02
5.00000E-01	8.748E-02	2.971E-02
6.00000E-01	8.077E-02	2.951E-02
8.00000E-01	7.082E-02	2.875E-02
1.00000E+00	6.361E-02	2.778E-02
1.25000E+00	5.688E-02	2.652E-02
1.50000E+00	5.183E-02	2.535E-02
2.00000E+00	4.480E-02	2.345E-02
3.00000E+00	3.678E-02	2.101E-02
4.00000E+00	3.240E-02	1.963E-02
5.00000E+00	2.967E-02	1.878E-02
6.00000E+00	2.788E-02	1.827E-02
8.00000E+00	2.574E-02	1.773E-02
1.00000E+01	2.462E-02	1.753E-02
1.50000E+01	2.352E-02	1.746E-02
2.00000E+01	2.338E-02	1.757E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.8. Sülfür için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	2.429E+03	2.426E+03
1.50000E-03	8.342E+02	8.314E+02
2.00000E-03	3.853E+02	3.828E+02
2.47200E-03	2.168E+02	2.145E+02
2.47200E-03	2.070E+03	1.935E+03
3.00000E-03	1.339E+03	1.265E+03
4.00000E-03	6.338E+02	6.066E+02
5.00000E-03	3.487E+02	3.360E+02
6.00000E-03	2.116E+02	2.046E+02
8.00000E-03	9.465E+01	9.171E+01
1.00000E-02	5.012E+01	4.847E+01
1.50000E-02	1.550E+01	1.477E+01
2.00000E-02	6.708E+00	6.235E+00
3.00000E-02	2.113E+00	1.809E+00
4.00000E-02	9.872E-01	7.466E-01
5.00000E-02	5.849E-01	3.779E-01
6.00000E-02	4.053E-01	2.199E-01
8.00000E-02	2.585E-01	1.000E-01
1.00000E-01	2.020E-01	6.052E-02
1.50000E-01	1.506E-01	3.516E-02
2.00000E-01	1.302E-01	3.080E-02
3.00000E-01	1.091E-01	2.983E-02
4.00000E-01	9.665E-02	2.991E-02
5.00000E-01	8.781E-02	2.984E-02
6.00000E-01	8.102E-02	2.959E-02
8.00000E-01	7.098E-02	2.878E-02
1.00000E+00	6.373E-02	2.780E-02
1.25000E+00	5.697E-02	2.652E-02
1.50000E+00	5.193E-02	2.535E-02
2.00000E+00	4.498E-02	2.349E-02
3.00000E+00	3.715E-02	2.118E-02
4.00000E+00	3.293E-02	1.993E-02
5.00000E+00	3.036E-02	1.923E-02
6.00000E+00	2.872E-02	1.884E-02
8.00000E+00	2.682E-02	1.850E-02
1.00000E+01	2.589E-02	1.845E-02
1.50000E+01	2.517E-02	1.864E-02
2.00000E+01	2.529E-02	1.889E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.9. Klor için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	2.832E+03	2.829E+03
1.50000E-03	9.771E+02	9.742E+02
2.00000E-03	4.520E+02	4.494E+02
2.82240E-03	1.774E+02	1.752E+02
2.82240E-03	1.637E+03	1.506E+03
3.00000E-03	1.473E+03	1.361E+03
4.00000E-03	7.037E+02	6.626E+02
5.00000E-03	3.901E+02	3.711E+02
6.00000E-03	2.384E+02	2.282E+02
8.00000E-03	1.075E+02	1.034E+02
1.00000E-02	5.725E+01	5.510E+01
1.50000E-02	1.784E+01	1.700E+01
2.00000E-02	7.739E+00	7.227E+00
3.00000E-02	2.425E+00	2.114E+00
4.00000E-02	1.117E+00	8.756E-01
5.00000E-02	6.483E-01	4.433E-01
6.00000E-02	4.395E-01	2.570E-01
8.00000E-02	2.696E-01	1.148E-01
1.00000E-01	2.050E-01	6.745E-02
1.50000E-01	1.480E-01	3.639E-02
2.00000E-01	1.266E-01	3.067E-02
3.00000E-01	1.054E-01	2.898E-02
4.00000E-01	9.311E-02	2.887E-02
5.00000E-01	8.453E-02	2.874E-02
6.00000E-01	7.795E-02	2.847E-02
8.00000E-01	6.826E-02	2.767E-02
1.00000E+00	6.128E-02	2.671E-02
1.25000E+00	5.478E-02	2.549E-02
1.50000E+00	4.994E-02	2.436E-02
2.00000E+00	4.328E-02	2.258E-02
3.00000E+00	3.585E-02	2.043E-02
4.00000E+00	3.188E-02	1.931E-02
5.00000E+00	2.950E-02	1.871E-02
6.00000E+00	2.798E-02	1.839E-02
8.00000E+00	2.628E-02	1.819E-02
1.00000E+01	2.549E-02	1.824E-02
1.50000E+01	2.496E-02	1.861E-02
2.00000E+01	2.520E-02	1.899E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementelerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.10. Potasyum için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	4.058E+03	4.053E+03
1.50000E-03	1.418E+03	1.415E+03
2.00000E-03	6.592E+02	6.563E+02
3.00000E-03	2.198E+02	2.174E+02
3.60740E-03	1.327E+02	1.306E+02
3.60740E-03	1.201E+03	1.065E+03
4.00000E-03	9.256E+02	8.304E+02
5.00000E-03	5.189E+02	4.752E+02
6.00000E-03	3.205E+02	2.974E+02
8.00000E-03	1.469E+02	1.383E+02
1.00000E-02	7.907E+01	7.490E+01
1.50000E-02	2.503E+01	2.370E+01
2.00000E-02	1.093E+01	1.023E+01
3.00000E-02	3.413E+00	3.045E+00
4.00000E-02	1.541E+00	1.272E+00
5.00000E-02	8.679E-01	6.454E-01
6.00000E-02	5.678E-01	3.730E-01
8.00000E-02	3.251E-01	1.628E-01
1.00000E-01	2.345E-01	9.161E-02
1.50000E-01	1.582E-01	4.346E-02
2.00000E-01	1.319E-01	3.378E-02
3.00000E-01	1.080E-01	3.015E-02
4.00000E-01	9.495E-02	2.959E-02
5.00000E-01	8.600E-02	2.929E-02
6.00000E-01	7.922E-02	2.895E-02
8.00000E-01	6.929E-02	2.807E-02
1.00000E+00	6.216E-02	2.707E-02
1.25000E+00	5.556E-02	2.581E-02
1.50000E+00	5.068E-02	2.467E-02
2.00000E+00	4.399E-02	2.290E-02
3.00000E+00	3.666E-02	2.084E-02
4.00000E+00	3.282E-02	1.985E-02
5.00000E+00	3.054E-02	1.935E-02
6.00000E+00	2.915E-02	1.914E-02
8.00000E+00	2.766E-02	1.910E-02
1.00000E+01	2.704E-02	1.928E-02
1.50000E+01	2.687E-02	1.983E-02
2.00000E+01	2.737E-02	2.029E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.11. Potasyum için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	4.867E+03	4.861E+03
1.50000E-03	1.714E+03	1.710E+03
2.00000E-03	7.999E+02	7.966E+02
3.00000E-03	2.676E+02	2.650E+02
4.00000E-03	1.218E+02	1.197E+02
4.03810E-03	1.187E+02	1.166E+02
4.03810E-03	1.023E+03	8.887E+02
5.00000E-03	6.026E+02	5.373E+02
6.00000E-03	3.731E+02	3.387E+02
8.00000E-03	1.726E+02	1.600E+02
1.00000E-02	9.341E+01	8.744E+01
1.50000E-02	2.979E+01	2.804E+01
2.00000E-02	1.306E+01	1.220E+01
3.00000E-02	4.080E+00	3.665E+00
4.00000E-02	1.830E+00	1.538E+00
5.00000E-02	1.019E+00	7.822E-01
6.00000E-02	6.578E-01	4.520E-01
8.00000E-02	3.656E-01	1.958E-01
1.00000E-01	2.571E-01	1.085E-01
1.50000E-01	1.674E-01	4.876E-02
2.00000E-01	1.376E-01	3.639E-02
3.00000E-01	1.116E-01	3.146E-02
4.00000E-01	9.783E-02	3.060E-02
5.00000E-01	8.851E-02	3.019E-02
6.00000E-01	8.148E-02	2.979E-02
8.00000E-01	7.122E-02	2.884E-02
1.00000E+00	6.388E-02	2.780E-02
1.25000E+00	5.709E-02	2.650E-02
1.50000E+00	5.207E-02	2.532E-02
2.00000E+00	4.524E-02	2.352E-02
3.00000E+00	3.780E-02	2.147E-02
4.00000E+00	3.395E-02	2.052E-02
5.00000E+00	3.170E-02	2.007E-02
6.00000E+00	3.035E-02	1.992E-02
8.00000E+00	2.892E-02	1.997E-02
1.00000E+01	2.839E-02	2.022E-02
1.50000E+01	2.838E-02	2.088E-02
2.00000E+01	2.903E-02	2.140E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.12. Demir için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	9.085E+03	9.052E+03
1.50000E-03	3.399E+03	3.388E+03
2.00000E-03	1.626E+03	1.620E+03
3.00000E-03	5.576E+02	5.535E+02
4.00000E-03	2.567E+02	2.536E+02
5.00000E-03	1.398E+02	1.372E+02
6.00000E-03	8.484E+01	8.265E+01
7.11200E-03	5.319E+01	5.133E+01
7.11200E-03	4.076E+02	2.978E+02
8.00000E-03	3.056E+02	2.316E+02
1.00000E-02	1.706E+02	1.369E+02
1.50000E-02	5.708E+01	4.896E+01
2.00000E-02	2.568E+01	2.260E+01
3.00000E-02	8.176E+00	7.251E+00
4.00000E-02	3.629E+00	3.155E+00
5.00000E-02	1.958E+00	1.638E+00
6.00000E-02	1.205E+00	9.555E-01
8.00000E-02	5.952E-01	4.104E-01
1.00000E-01	3.717E-01	2.177E-01
1.50000E-01	1.964E-01	7.961E-02
2.00000E-01	1.460E-01	4.825E-02
3.00000E-01	1.099E-01	3.361E-02
4.00000E-01	9.400E-02	3.039E-02
5.00000E-01	8.414E-02	2.914E-02
6.00000E-01	7.704E-02	2.836E-02
8.00000E-01	6.699E-02	2.714E-02
1.00000E+00	5.995E-02	2.603E-02
1.25000E+00	5.350E-02	2.472E-02
1.50000E+00	4.883E-02	2.360E-02
2.00000E+00	4.265E-02	2.199E-02
3.00000E+00	3.621E-02	2.042E-02
4.00000E+00	3.312E-02	1.990E-02
5.00000E+00	3.146E-02	1.983E-02
6.00000E+00	3.057E-02	1.997E-02
8.00000E+00	2.991E-02	2.050E-02
1.00000E+01	2.994E-02	2.108E-02
1.50000E+01	3.092E-02	2.221E-02
2.00000E+01	3.224E-02	2.292E-02

EK-1. (Devam) NIST X-Ray Programından Alınan Elementlerin Kütle Azalma Katsayısı Tabloları

Çizelge 1.13. Stronsiyum için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	3.494E+03	3.487E+03
1.50000E-03	1.347E+03	1.341E+03
1.93960E-03	7.207E+02	7.152E+02
1.93960E-03	2.864E+03	2.807E+03
2.00000E-03	2.589E+03	2.539E+03
2.00680E-03	2.571E+03	2.521E+03
2.00680E-03	3.577E+03	3.501E+03
2.10895E-03	3.201E+03	3.134E+03
2.21630E-03	2.842E+03	2.786E+03
2.21630E-03	3.241E+03	3.176E+03
3.00000E-03	1.525E+03	1.500E+03
4.00000E-03	7.297E+02	7.181E+02
5.00000E-03	4.058E+02	3.988E+02
6.00000E-03	2.496E+02	2.446E+02
8.00000E-03	1.150E+02	1.118E+02
1.00000E-02	6.274E+01	6.037E+01
1.50000E-02	2.079E+01	1.938E+01
1.61046E-02	1.714E+01	1.585E+01
1.61046E-02	1.108E+02	5.200E+01
2.00000E-02	6.386E+01	3.602E+01
3.00000E-02	2.157E+01	1.493E+01
4.00000E-02	9.818E+00	7.346E+00
5.00000E-02	5.306E+00	4.103E+00
6.00000E-02	3.214E+00	2.511E+00
8.00000E-02	1.481E+00	1.135E+00
1.00000E-01	8.365E-01	6.093E-01
1.50000E-01	3.369E-01	2.028E-01
2.00000E-01	2.042E-01	1.013E-01
3.00000E-01	1.247E-01	4.906E-02
4.00000E-01	9.811E-02	3.634E-02
5.00000E-01	8.443E-02	3.156E-02
6.00000E-01	7.570E-02	2.917E-02
8.00000E-01	6.447E-02	2.660E-02
1.00000E+00	5.714E-02	2.498E-02
1.25000E+00	5.072E-02	2.342E-02
1.50000E+00	4.630E-02	2.225E-02
2.00000E+00	4.079E-02	2.082E-02
3.00000E+00	3.569E-02	1.995E-02
4.00000E+00	3.365E-02	2.013E-02

EK-2. Katı fantom eşdeğeri su için NIST X-Ray programından alınan kütle azalma katsayısı değerleri

Çizelge 2.1. Su için farklı enerjilerdeki kütle azalma katsayısı

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	4.078E+03	4.065E+03
1.50000E-03	1.376E+03	1.372E+03
2.00000E-03	6.173E+02	6.152E+02
3.00000E-03	1.929E+02	1.917E+02
4.00000E-03	8.278E+01	8.191E+01
5.00000E-03	4.258E+01	4.188E+01
6.00000E-03	2.464E+01	2.405E+01
8.00000E-03	1.037E+01	9.915E+00
1.00000E-02	5.329E+00	4.944E+00
1.50000E-02	1.673E+00	1.374E+00
2.00000E-02	8.096E-01	5.503E-01
3.00000E-02	3.756E-01	1.557E-01
4.00000E-02	2.683E-01	6.947E-02
5.00000E-02	2.269E-01	4.223E-02
6.00000E-02	2.059E-01	3.190E-02
8.00000E-02	1.837E-01	2.597E-02
1.00000E-01	1.707E-01	2.546E-02
1.50000E-01	1.505E-01	2.764E-02
2.00000E-01	1.370E-01	2.967E-02
3.00000E-01	1.186E-01	3.192E-02
4.00000E-01	1.061E-01	3.279E-02
5.00000E-01	9.687E-02	3.299E-02
6.00000E-01	8.956E-02	3.284E-02
8.00000E-01	7.865E-02	3.206E-02
1.00000E+00	7.072E-02	3.103E-02
1.25000E+00	6.323E-02	2.965E-02
1.50000E+00	5.754E-02	2.833E-02
2.00000E+00	4.942E-02	2.608E-02
3.00000E+00	3.969E-02	2.281E-02
4.00000E+00	3.403E-02	2.066E-02
5.00000E+00	3.031E-02	1.915E-02
6.00000E+00	2.770E-02	1.806E-02
8.00000E+00	2.429E-02	1.658E-02
1.00000E+01	2.219E-02	1.566E-02
1.50000E+01	1.941E-02	1.441E-02
2.00000E+01	1.813E-02	1.382E-02

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : KARAMAN,Onur
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 25.04.1987 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (507) 666 17 78
e-mail : onurkaraman06@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fizik Bölümü	2012
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2009
Lise	Ayrancı Lisesi	2004
Yabancı Dil	İngilizce	