



## Gama ve X-Işını Radyasyonu Yarı Değer Kalınlık Değerinin Hesaplanması için Yeni Bir Denklem

Hasan BİRCAN<sup>\*1</sup>, Kaan MANİSA<sup>1</sup>, Ayşe Semra ATAN<sup>1</sup>, Mehmet ERDOĞAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 43270, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 42075, Selçuklu/Konya, Türkiye

\*yazışılan yazar e-posta: hasan.bircan@dpu.edu.tr

(Alınış: 28.04.2017, Kabul: 04.07.2017)

**Özet:** NIST standartlarına uygun olarak literatürden [1,2] alınan kurşun, alüminyum hava ve suyun kütle soğurma katsayı değerleri kullanılarak X-Işını ve Gama radyasyon soğurma kalınlıkları hesaplanmıştır. [0,001-20] MeV enerji aralığında yarı değer soğurma kalınlıklarının direk hesaplanabileceği bir denklem önerilmiştir. Denklem sabitleri radyasyonu soğuran madde için özeldir. Yarı değer kalınlık değerlerinin enerjiyle değişimi gösterilmiştir. Yarı değer kalınlık değerleri kullanılarak onda bir kalınlık değerleri ve tekrarlama kalınlık değerleri hesaplanabilir. Bu çalışmada önerilen eşitlik radyasyon zırlama kalınlıklarını pratik bir şekilde hesaplayabilir.

**Anahtar kelimeler:** Gama Işını, X-Işını, Soğurma Katsayısı, Radyasyon.

## A New Equation for Calculation of Gamma and X-ray Radiation Half Value Thickness

**Abstract:** X-ray and Gamma radiation absorption thicknesses are calculated by using the mass attenuation coefficient values of lead, aluminum, air and water accordance with the National Institute of Standards and Technology (NIST) standard in the literature. An equation can directly calculate Half-Value-Thickness (HVT), between 0.001 MeV and 20 MeV has proposed. Equation constants are specific for radiation absorbing material. The half value thickness values changing versus by energy is shown. Tenth value thickness (TVT) and repeat thickness value can be calculated by using HVT. In this study, the proposed equation could be practically calculate the radiation shielding thickness.

**Key words:** Gamma ray, X-Ray, Attenuation Coefficient, Radiation.

### 1. Giriş

Nükleer enerji ve tıp alanlarında radyasyon soğurma konusu önemini korumaktadır.  $\alpha$ ,  $\beta$  radyasyonları ve n (nötron), p (proton) parçacıklarının soğurulması için literatürde çeşitli denklemler ve çalışmalar vardır [3]. Bu denklemlerden bazıları belli maddeler için özel sabitler içermekte, bazıları ise kısıtlı enerji aralıklarında geçerli olmaktadır. Gama ve X-Işını radyasyonu için geniş enerji aralıklarında geçerli genel bir matematiksel eşitlik araştırılabilir.

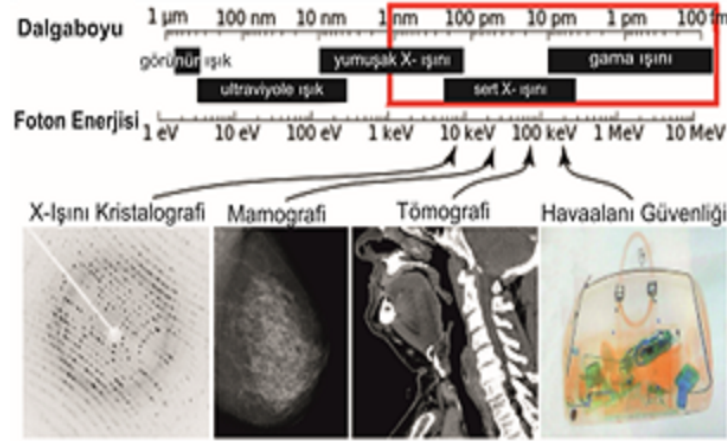
Radyasyon foton biçiminde olduğunda fotonun madde ile etkileşimine bakıldığında düşük enerjilerde elastik çarpışma olayları, biraz daha büyük enerjilerde elastik olmayan

çarpışmalardan kaynaklanan olaylar, fotoelektrik olay, Compton olayı ve daha yüksek enerjilerde çift oluşum ve üçlü oluşum olayları baskındır. Bu olayların her birinin gerçekleşme etkileşim tesir kesiti ( $\sigma$ ) ile ifade edilir. Tesir kesiti ile radyasyonun madde içindeki toplam doğrusal soğurma katsayısı ( $\mu$ ) arasında

$$\mu = n\sigma \quad (1)$$

bağıntısı vardır. Burada  $n$  birim hacimde bulunan tanecik sayısıdır [3].

Bu çalışmada incelenen enerji aralığı 1 keV enerjili X-Işını bölgesi ile 20 MeV enerjili gama ışını bölgesi arasındadır. Bu enerji aralığındaki bazı uygulama alanları Şekil 1'de gösterilmiştir. X-Işını kristalografi ile malzemelerin kristal yapı analizi, sağlık uygulamalarından mamografi, tomografi ve havayolu güvenlik tarama uygulamaları bulunmaktadır. Daha yüksek enerjili bölge uzay çalışmalarında, astrofizik ve yüksek enerji ve parçacık fiziği alanında araştırılmaktadır. Kullanılan enerji aralığı bölgesi ve bu enerji aralığındaki teknolojik uygulama örnekleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışmada incelenen foton radyasyon bölgesi ve kullanım alanları [4].

Soğurmada yaygın kullanılan kurşun ve alüminyumun, karışım olarak hava ve molekül olarak suyun gama ve x-ışını radyasyonu soğurma kalınlığının bulunması için XCOM programı [2] kullanılmıştır. Bu program deneysel ve teorik veri kütüphanesine sahiptir. Bundan başka Monte Carlo simülasyona dayalı FLUKA, GEANT, MCNP gibi programlarla soğurma katsayısı hesaplamaları yapılabilmektedir [5-7]. Ayrıca biyolojik dokular ve kimyasal karışımlar için ağırlık oranları kullanılarak soğurma katsayısı yaklaşık olarak hesap edilebilir [2,4,8,9].

Gelen X-ışını radyasyonunun elementlerin K, L ve M kabuklarından elektron koparması nedeniyle oluşan keskin değişimler nedeniyle tüm elementleri kapsayan genel bir formül henüz geliştirilememiş olup mevcut programlar veritabanı kullanmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Yarıdeğer Kalınlık (HVT) ve 1/10 Kalınlık Değeri (TVT)

Malzemeye gelen ışın şiddetinin yarısına düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığıdır.

$$HVT = x_{1/2} = \ln 2 / \mu_{\rho} \quad (2)$$

Benzer şekilde ışın şiddetini onda bire düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığıdır.

$$TVT = x_{1/10} = \ln 10 / \mu_{\rho} \quad (3)$$

Burada  $x_{1/2}$  yarıdeğer kalınlığı,  $\mu_{\rho}$  ise toplam doğrusal kütle soğurma katsayısıdır [3].

## 2.2 Kütle Soğurma Katsayısı

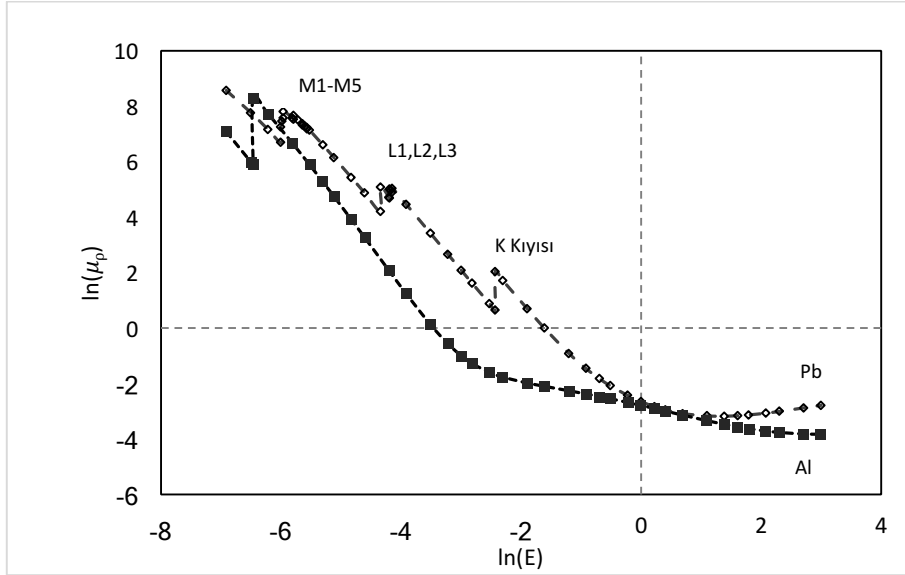
Kütle soğurma katsayısı ile doğrusal soğurma katsayısı arasında

$$\mu_{\rho} = \mu / \rho \quad (4)$$

eşitliği vardır [2,3].

## 2.3. Yarıdeğer Kalınlık Değerinin Hesaplanması

Kurşun, alüminyum hava ve su için literatürden [1,2] alınan kütle soğurma katsayısı verileri incelendiğinde enerji için  $10^4$  ve  $\mu/\rho$  değerlerinde değişim  $10^5$  mertebesinde değişmektedir. Bu değişimler çok büyük olduğundan kurşun ve alüminyumun enerjinin x ekseninde doğal logaritması alınarak kütle soğurma katsayısının da y ekseninde doğal logaritması alınarak grafiği çizilmiş ve Şekil 2’de gösterilmiştir. Su ve havanın grafikleri de benzer karakteristiktir.



Şekil 2. Kütle soğurma katsayısının foton enerjisiyle değişimi.

Şekil 2’de alüminyumun bir tane K kıyısı, kurşunun K, L ve M kıyıları görülmektedir. Literatürden alınan değerler kütle soğurma katsayısı değerleri Denklem (2) kullanılarak yarıdeğer kalınlık değerleri (HVT) hesaplanmıştır.

Şekil 3’de kurşun ve alüminyum için HVT ve TVT değerlerinin Foton enerjisine göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 3’de üçgen ve daire sembelleri ile gösterilen sembolere en

yakın noktalardan geçen eğri denklemi olarak polinomik, üstel, karekök ve küp köklü matematiksel ifadeler araştırılmış olup en uygun olarak (5) eşitliği ile uygun olduğu bulunmuştur.

$$HVT = \frac{(a + bE + cE^2 + dE^3 + eE^4 + fE^5)}{(1 + gE + hE^2 + iE^3 + jE^4 + kE^5)} \quad (5)$$

Burada E, MeV cinsinden enerji a, b, c, d, e, f, g, h, i, j ve k elemente has keyfi sabitlerdir.

Denklem (5) ile hesaplanan noktalar ile referans noktalar arasındaki farkları minimum yapmak üzere çeşitli yöntemler vardır. Bu çalışmada en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır [10]. Eğri uydurma olarak bilinen bu yöntemler için özel geliştirilmiş programlar mevcuttur. Ofis excel programları da doğrusal ve doğrusal olmayan eğri uydurma işlemleri yapılabilmektedir. Sabitlerinin hesaplanmasında doğrusal olmayan regresyon analizi için excel kullanılmıştır. Excelde bu işlem için çözücü eklentisi bulunmaktadır. Hesaplamalarda doğrusal olmayan GRG (Generalized Reduced Gradient) [11] metodu seçilmiştir.

### 3. Bulgular

Hesaplamalarda kullanılan veriler çok olduğundan seçilen bazı kütle soğurma katsayı değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Ancak hesaplamalarda tüm noktalar kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Bazı kütle soğurma katsayı değerleri [1,2].

Enerji E (MeV)	Kurşun $\mu/\rho$ (g/cm <sup>2</sup> )	Alüminyum $\mu/\rho$ (g/cm <sup>2</sup> )	Hava $\mu/\rho$ (g/cm <sup>2</sup> )	Su $\mu/\rho$ (g/cm <sup>2</sup> )
0,0010	5210	1185	3606	4078
0,0015	2356	402,2	1191	1376
0,0020	1285	2263	527,9	617,3
0,01	130,6	26,23	5,12	5,329
0,05	8,041	0,3681	0,208	0,2269
0,1	5,549	0,1704	0,1541	0,1707
1	0,07102	0,06146	0,0636	0,07072
8	0,04675	0,02437	0,0223	0,02429
10	0,04972	0,02318	0,0205	0,02219
15	0,05658	0,02195	0,0181	0,01941
20	0,06206	0,02168	0,0171	0,01813

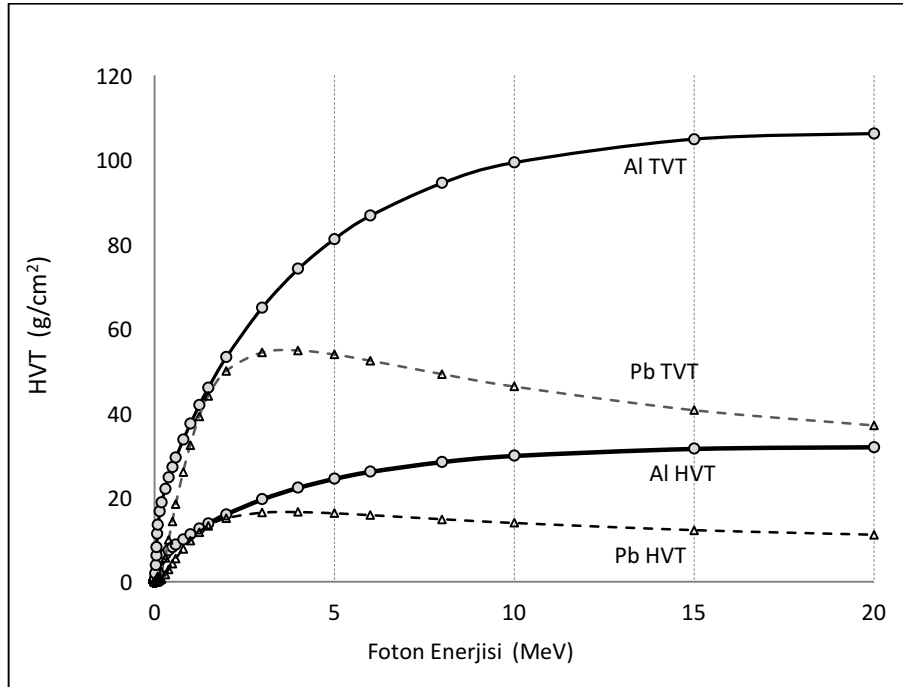
Denklem (5) 11 parametrelidir olup 5. derece iki farklı polinomun birbirine bölünmesi biçiminde tanımlanan rasyonel bir denklemdir. Şekil 3’de Denklem (5) ile hesaplanan değerlerin literatürden hesaplanan değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Alüminyum, kurşun hava ve su için bulunan keyfi sabitler ve uyum analizi sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Parametre değerleri ve uyum analiz sonuçları

Parametre	Kurşun	Alüminyum	Hava	Su
-----------	--------	-----------	------	----

	$\rho = 11,35 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 0,001205 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$
a	-0.007200	0.001437	0.020639	0.019069
b	-11.773908	-11.509050	-11.956827	-11.638329
c	1.048436	-0.609463	1769.944154	1724.226461
d	45.537662	240.095915	36194.152320	33914.136696
e	17.933021	107.300289	32629.256310	29296.619436
f	29.052727	2925.622874	259.355790	-24.785257
g	-364.741740	17952.499826	-26.094791	-27.406591
h	58.427223	482.436700	893.982388	954.443771
i	1580.687351	22668.427250	5078.403816	5205.404557
j	8.493584	24.526827	540.638070	483.057305
k	50.082283	611.879336	8.903946	2.605064
$r^2$	0,999959	0,999999	0,999999	0,999999
SSE	0,040491	0,004180	0,001473	0,001178



**Şekil 3.** Yarı değer ve Onda bir kalınlık değerlerinin yoğunlukla çarpımının foton enerjisiyle değişimi. (daire ve üçgenler literatürdeki noktaları gösterirken sürekli ve kesikli çizgiler bu çalışmadan elde edilmiştir.)

Seçilmiş birkaç foton enerjisi için literatürden bulunan yarıdeğer kalınlıklarının bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 3’de gösterilmiştir. Burada 0,662 MeV enerji değeri Cs137’ye aittir. Co60 ise 1,332 MeV ve 1,173 MeV enerji değerlerinde iki gama fotonu yayar.

**Tablo 3.** Bazı Foton Enerjilerine karşılık yarıdeğer kalınlıklarının karşılaştırılması.

Enerji (MeV)	Kurşun	Bu çalışma	Alüminyum	Bu çalışma	Hava	Bu çalışma	Su	Bu çalışma
--------------	--------	------------	-----------	------------	------	------------	----	------------

	$x_{1/2}$ (cm) [3]	$x_{1/2}$ (cm) [3]	$x_{1/2}$ (cm) [3]	$x_{1/2}$ (cm) [3]	$x_{1/2}$ (cm) [3]	$x_{1/2}$ (cm) [3]	$x_{1/2}$ (cm) [3]	$x_{1/2}$ (cm) [3]
0,1	0,011	0,011	1,507	1,506	3726	3728	4,060	4,054
0,3	0,151	0,155	2,164	2,465	5372	5392	5,843	5,847
0,662	0,558	0,553	3,424	3,440	7420	7462	8,039	8,087
1	0,860	0,867	4,177	4,182	9047	9049	9,802	9,805
1,173	0,987	0,990	4,541	4,527	9830	9792	10,662	10,610
1,332	1,088	1,084	4,829	4,826	10470	10444	11,342	11,317
2	1,326	1,325	5,938	5,937	11110	12928	14,028	14,020
3	1,442	1,445	7,249	7,256	16040	16069	17,456	17,468
4	1,455	1,456	8,270	8,269	18680	18692	20,382	20,379
5	1,429	1,430	9,059	9,056	20940	20912	22,871	22,871
10	1,228	1,228	11,070	11,080	28170	28130	31,216	31,234
20	-	0,983	-	11,846	-	33736	-	38,231

#### 4. Sonuç ve Yorum

Kurşun ve alüminyum için kütle soğurma katsayıları, kurşun için K, L ve M kabuklarından, alüminyum için K kabuğundan elektron koparma enerji bölgelerinde fotoelektrik etki nedeniyle Şekil 2’de görüldüğü gibi aniden artmaktadır. Bu ani değişim bölgelerinde kütle soğurma katsayısının eğri uydurma hesaplamalarında zorluk çıkmakta ve hata artmaktadır. Hava için sadece bir tane  $3.20290E-03$  MeV değerinde argona ait K kıyısı vardır. Su için K, L veya M kıyısı bulunmamaktadır [2].

Şekil 3 incelendiğinde göre hafif atom olarak seçilen alüminyum yarı değer kalınlığı ağır atom olarak seçilen kurşundan daha fazladır. Kurşun için 3 MeV’den sonra yarı değer kalınlığındaki azalma ilginç olup nükleer ve elektronik alanda çift oluşum ve üçlü oluşum etkilerinden kaynaklanmaktadır. Alüminyum için benzer etki 20 MeV’e kadar gözlenmemektedir.

HVT ve TVT grafikleri incelendiğinde üstel veya logaritmik değişim gibi görünse de yapılan hesaplamalara göre daha karmaşık bir fonksiyonla elde ifade edilmesi gerektiğini göstermiştir. Buna göre bu çalışmada önerilen Denklem (5) kullanılarak yarıdeğer kalınlık değeri onda bir ve tekrarlamalı kalınlıkları hesaplanabilmektedir.

Tablo 2’de hata kare toplamları (SSE) ve regresyon sabitinin karesi ( $r^2$ ) değerlerine bakıldığında iyi uyumludur. Kurşun için düşük enerji bölgesinde yarıdeğer kalınlık değerleri çok küçük olduğundan  $0,008$  MeV ve altındaki tüm değerlerde yarıdeğer kalınlığı için  $0,00237$  g/cm<sup>2</sup> alınmalıdır. Buna göre 8 keV gama enerjisine kadar akıyı yarıya düşürmek için  $0,0021$  mm kalınlık kullanılması gerekmektedir. Bu düşük enerji bölgesinde maalesef kurşun için Denklem (5) ile bulunacak sonuçlar geçersiz olmaktadır.  $0,0021$  mm kalınlıkta kurşun zırhlama yerine uygulamada  $0,01$  mm kalınlıkta kurşun kullanıldığında sorun olmayacaktır.

Fotoelektrik etki nedeniyle oluşan K, L, M kabuklarındaki uyarılmalar kütle soğurma katsayısını veren genel bir denklem bulunmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden kalınlık değerlerine geçilerek uyum analizinde büyük zorluk çıkaran bu bölge 0-3 MeV enerji aralığında matematiksel olarak küçültülmüş olmaktadır. Tablo 2 incelendiğinde alüminyum için bulunan SSE değeri kurşundan daha küçüktür. Çünkü alüminyumun

Şekil 2’den görüleceği üzere L ve M kabuk uyarılmaları yoktur. Dolayısıyla ağır atomlara doğru çoğalan bu uyarılmalar ne kadar çoksa SSE değeri o kadar artacaktır. Hava ve su için bu uyarılmalar az olduğundan SSE değerleri daha küçük olmaktadır. Buradan alüminyum için hesaplamalar kurşuna göre daha güvenilirdir.  $r^2$  değerlerinden görüleceği üzere her iki element, su ve hava için de hesaplamaların uyumları oldukça iyidir.

Bu çalışmada hava gibi bir karışımın su gibi bir molekülün ayrıca element olarak alüminyum ve kurşun için parametreler belirlenmiş ve pratik bir şekilde radyasyon akısını yarıya düşürecek denklem önerilmiştir. Onda bir veya yüzde bire düşürecek kalınlıklarda buradan hesaplanabilmektedir. Benzer biçimde diğer element, bileşik ve karışımların yarıdeğer kalınlıklarının hesaplanması için Denklem 5’deki keyfi parametreler bulunabilir.

## Kaynakça

- [1] M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, J. Chang, J.S. Coursey, R. Sukumar, D.S. Zucker, and K. Olsen, (2010), *XCOM: Photon Cross Section Database (version 1.5)*. [Online] [10.03.2016]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Available: <http://physics.nist.gov/xcom>
- [2] J.H. Hubbell and S.M. Seltzer, 2004., *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (version 1.4)*. [Online] [10.03.2016]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Available: <http://physics.nist.gov/xaamdi>
- [3] A.G. Tanır, M.H. Bölükdemir, and K. Koç, *Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği*. Ankara: Palme Yayıncılık, 2013, böl.7, böl.8.
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray> ,[10.03.2016].
- [5] T. Korkut, A. Karabulut, G. Budak, and F. Demir, “Monte Carlo Simülasyonu ile Kolemanit Cevherinin Çeşitli Foton Enerjileri için Radyasyon Soğurganlığının Belirlenmesi,” *X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi*, 6-9 Ekim, 2009, Muğla, s. 428–431.
- [6] M.E. Medhat and V.P. Singh, “Mass attenuation coefficients of composite materials by Geant4, XCOM and experimental data: comparative study,” *Radiation Effects & Defects in Solids*, vol. 169, no. 9, pp. 800–807, 2014.
- [7] P. Singh, A.M. Ali, N.M. Badiger, and A.M. El-Khayatt, “Monte Carlo simulation of gamma ray shielding parameters of concretes,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 265, pp. 1071–1077, 2013.
- [8] I. Akkurt and A. M. El-Khayatt, “Effective atomic number and electron density of marble concrete,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 295, no.1, pp. 633–638, 2013.
- [9] <https://www.nist.gov/pml/note-nist-x-ray-attenuation-databases> , 10.03.2016
- [10] Ö. Gürnlü Alma and Ö. Vupa, “Regresyon Analizinde Kullanılan En Küçük Kareler ve En Küçük Medyan Kareler Yöntemlerinin Karşılaştırılması,” *SDÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, vol. 3, no. 2, pp. 219 – 229, 2008.
- [11] M. Angus and A.M. Brown, “A step-by-step guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 65, pp. 191–200, 2001.
- [12] <https://ehs.missouri.edu/rad/isotopedata/cs-137.pdf>,[10.03.2016].

## Semboller

$\mu$	Toplam Doğrusal Soğurma Katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ )
$\rho$	Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$\mu_\rho$	Kütle Soğurma Katsayısı ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )
$\text{HVT} = x_{1/2}$	Yarı Değer Kalınlığı (cm)
$\text{TVT} = x_{1/10}$	Onda Bir Değer Kalınlığı (cm)
E	Enerji (MeV)
$\sigma$	Toplam Tesir Kesiti ( $\text{barn}=10^{-24} \text{cm}^2$ )
n	Birim Hacimde Bulunan Tanecik Sayısı
GRG	Generalized Reduced Gradient
SSE	Hataların karelerinin toplamı
$r^2$	Belirleme katsayısı