

**AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO VE B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>' İN POZİTRONLAR VE X-İŞİNLARI İÇİN  
DURDURMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hanieh KAZEMIAFSHAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2013  
ANKARA**

Hanieh KAZEMIAFSHAR tarafından hazırlanan “  $Al_2O_3$ , BeO VE  $B_2O_3$  ’İN POZİTRONLAR VE X-IŞINLARI İÇİN DURDURMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr.Mehmet ÇİVİ .....

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Prof.Dr.Güneş TANIR .....

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selma MOĞOL .....

Fizik Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof.Dr. Mehmet ÇİVİ .....

Fizik, Gazi Üniversitesi

Prof.Dr. Şeref OKUDUCU .....

Fizik, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 18/04/2013

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

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU .....

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.

Hanieh KAZEMİAFSHAR

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO VE B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 'İN POZİTRONLAR VE X-IŞINLARI İÇİN  
DURDURMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hanieh KAZEMİAFSHAR**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Nisan 2013**

**ÖZET**

Dozimetrik materyallerin durdurma özelliklerinin incelendiği çalışmaların sonuçları, küçük enerji bölgesinde bir tutarsızlığın olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada (10 eV-10 keV) aralığındaki enerjilere sahip pozitronların Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO ve B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için durdurma güçleri, farklı analitik ve modifiye edilmiş eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca x-ışınlarının aynı hedeflerde durdurulmalarının incelenmesi için bu enerji aralığında kütle azalma katsayıları hesaplanmış ve bu hedeflerdeki doz değerleri ile karşılaştırılmıştır.

**Bilim Kodu : 202.1.108**

**Anahtar Kelimeler : Durdurma Gücü, Dozimetrik materyaller, Pozitronlar,  
X- ışınları**

**Sayfa Adedi : 80**

**Tez Yöneticileri : Prof. Dr. Mehmet ÇİVİ  
Prof.Dr.Güneş TANIR (2. Danışman)**

**INVESTIGATION OF THE STOPPAGE PROPERTIES OF  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$   
AND  $\text{B}_2\text{O}_3$  FOR THE POSITRONS AND X-RAYS**

**(M.Sc. Thesis)**

**Hanieh KAZEMIAFSHAR**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**April 2013**

**ABSTRACT**

**The conclusions of the researches on the stoppage properties of dosimetric materials show that there is a discrepancy within the small energy region. In this research, stoppage powers of positrons within the energy range 10 eV-10keV have been calculated by using different analytic and modified equations. Besides, mass attenuation coefficients have been calculated within this energy range and have been compared with the dose values at the targets for the investigation of the stoppage of the x-rays at the same targets.**

**Science Code : 202.1.108**

**Key Words : Stopping Power, Dosimetric materials, Positrons, X-ray**

**Page Number : 80**

**Advisers : Prof. Dr. Mehmet ÇİVİ**

**Prof.Dr.Güneş TANIR (2 nd . Advaiser )**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında, bilimsel açıdan engin bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımın her aşamasında değerli önerileri ile beni yönlendiren, sayın hocam Prof.Dr. A. Güneş TANIR'a, yardımlarını, zamanını ve hoşgörüsünü hiçbir zaman eksik etmeyen, sayın hocam Prof.Dr.Mehmet ÇİVİ'ye, sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her türlü konuda desteğini ve yardımlarını esirgemeyen öncelikle sevgili annem ve babam olmak üzere, kardeşime ve çalışmalarım süresince hep yanımda olan sevgili eşime SHAHRAM HOSSEINZADEH'e sonsuz teőekkürlerimi borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| ÖZET.....  | iv           |
| ABSTRACT.....  | v            |
| TEŞEKKÜR.....  | vi           |
| İÇİNDEKİLER.....   | vii          |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....  | ix           |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....  | x            |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....   | xii          |
| 1. GİRİŞ.....  | 1            |
| 2. TEMEL BİLGİLER.....   | 5            |
| 2.1. Pozitronların Hedefle Etkileşmesi.....  | 5            |
| 2.2. Durdurma Gücü Teorisi.....  | 7            |
| 2.2.1. Tsoulfanidis eşitliği kullanarak durdurma gücü hesabı.....                  | 13           |
| 2.2.2. Modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitliği kullanarak durdurma gücü hesabı..... | 14           |
| 2.2.3. Ortalama atomik kütle ve etkin atom numarasının hesaplanması.....           | 16           |
| 2.3. X-Işınlarının Hedefle Etkileşmeleri.....                                      | 17           |
| 2.4. Tesir Kesiti.....   | 19           |
| 2.5. X-Işınlarının Azalma Katsayıları.....   | 23           |
| 3. YÖNTEM VE HESAPLAMALAR.....   | 25           |
| 3.1. Ortalama Atomik Kütle ve Etkin Atom Numarasının Hesaplanması.....             | 25           |

**Sayfa**

|   |    |
|---|----|
| 3.2. Tsoulfanidis Eşitliği ile Durdurma Gücü Hesaplanması.....                  | 26 |
| 3.3. Modifiye Edilmiş Tsoulfanidis Eşitliği ile Durdurma Gücü Hesaplanması..... | 31 |
| 3.4. Kütle Azalma Katsayıları .....   | 46 |
| 4. SONUÇLAR.....  | 47 |
| 5. TARTIŞMA.....  | 73 |
| KAYNAKLAR.....  | 77 |
| ÖZGEÇMİŞ.....   | 80 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge  | Sayfa |
|--|-------|
| Çizelge 3.1. Hesaplamalarda kullanılan XCOM programı'nın bilgisayar ekranındaki görüntüsü.....   | 46    |
| Çizelge 4.1. Hedef olarak kullanılan materyaller için ortalama atom kütlesi ( $A_{ort}$ ), etkin atom numarası ( $Z_{eff}$ ), yoğunluk ( $\rho$ ) ve iyonizasyon potansiyeli (I) değerleri ..... | 47    |
| Çizelge 4.2. Hedef Olarak Kullanılan Suyun İçerik ve Özellikleri.....  | 49    |
| Çizelge 4.3. Hedef Olarak Kullanılan $Al_2O_3$ 'nin İçerik ve Özellikleri.....   | 50    |
| Çizelge 4.4. Hedef Olarak Kullanılan $BeO$ 'nin İçerik ve Özellikleri.....   | 51    |
| Çizelge 4.5. Hedef Olarak Kullanılan $B_2O_3$ 'nin İçerik ve Özellikleri .....   | 52    |
| Çizelge 4.6. Hedef olarak Su, $Al_2O_3$ , $BeO$ ve $B_2O_3$ için Tsoulfanidis eşitliğin 10eV-10keV enerji aralığında pozitron enerjisine bağlı maksimum durdurma Gücü.....                       | 63    |
| Çizelge 4.7. Hedef olarak Su, $Al_2O_3$ , $BeO$ ve $B_2O_3$ için Modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitliğin 10eV-10keV enerji aralığında pozitron enerjisine bağlı maksimum durdurma Gücü.....      | 63    |
| Çizelge 4.8. Hedef olarak suyun pozitronlar ve x-ışınlarında, Maksimum enerji ve sabit akı için Doz hesabı.....  | 72    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| <b>Şekil</b>   | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Şekil 1.1. Farklı durdurma gücü bölgeleri.....   | 2            |
| Şekil 2.1. Pozitron- elektron çiftinin yok olma olayı.....   | 7            |
| Şekil 2.2. Bir alfa parçacığının bir atomun elektronuyla etkileşmesi.....  | 8            |
| Şekil 2.3. dx boyuna, db kalınlığına ve b yarıçapına sahip silindir .....  | 10           |
| Şekil 2.4. Fotonların enerjilerine bağlı olarak farklı maddeler ile etkileşimi.....  | 18           |
| Şekil 2.5. Tesir kesiti ve radyasyon demetinin ortamda zayıflaması.....  | 19           |
| Şekil 2.6. Saçılma olayı.....  | 21           |
| Şekil 4.1. Su için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı, 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....                                    | 49           |
| Şekil 4.2. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı, 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....        | 50           |
| Şekil 4.3. BeO için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı, 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....                                   | 51           |
| Şekil 4.4. B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında pozitron enerjisine bağlı değişimi.....          | 52           |
| Şekil 4.5. Su için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı, 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....                                    | 53           |
| Şekil 4.6. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı, 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....        | 54           |
| Şekil 4.7. BeO için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı, 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....                                   | 55           |
| Şekil 4.8. B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı, 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....         | 56           |
| Şekil 4.9. Su için Tsoufanidis ve Modifiye Tsoufanidis durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi..... | 57           |

| <b>Şekil</b>   | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Şekil 4.10. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....                                      | 58           |
| Şekil 4.11. BeO için Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....   | 59           |
| Şekil 4.12. B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.....                                       | 60           |
| Şekil 4.13. Su, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,BeO ve B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimleri.....                  | 61           |
| Şekil 4.14. Su, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,BeO ve B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için Modifiye edilmiş Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimleri..... | 62           |
| Şekil 4.15. Su için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında Azalma Katsayıları.....  | 64           |
| Şekil 4.16. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında Azalma Katsayıları.....  | 65           |
| Şekil 4.17. BeO için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında Azalma Katsayıları.....   | 66           |
| Şekil 4.18. B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında Azalma Katsayıları.....   | 67           |
| Şekil 4.19. Su, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,BeO ve B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> un x-ışını enerjisine bağlı 10eV- 10keV enerji aralığında Azalma Katsayı kıyaslaması.....                                   | 68           |
| Şekil 5.1. Su için durdurma gücü kıyaslanması.....   | 74           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| <b>Simgeler</b>           | <b>Açıklama</b>   |
|---------------------------|---|
| <b>E</b>                  | Enerji  |
| <b><math>\beta</math></b> | Beta parçacığı  |
| <b>m</b>                  | Kütle   |
| <b>T</b>                  | Kinetik Enerji  |
| <b>c</b>                  | Işık Hızı ( $3 \times 10^8$ m/s)                            |
| <b>N</b>                  | Hedef materyalin $m^3$ ü başına atom sayısı                 |
| <b><math>N_0</math></b>   | Avagadro Sayısı ( $6,022 \times 10^{23} \frac{atom}{mol}$ ) |
| <b><math>\rho</math></b>  | Yoğunluk  |
| <b>I</b>                  | Ortalama uyarma potansiyeli                                 |
| <b>Z</b>                  | Atom Numarası   |
| <b>A</b>                  | Atom Ağırlığı   |
| <b>S</b>                  | Durdurma Gücü   |

| <b>Simgeler</b>                       | <b>Açıklama</b>                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| <b>eV</b>                             | Elektron Volt                    |
| <b>g</b>                              | Gram                             |
| <b>keV</b>                            | Kilo Elektron Volt               |
| <b>MeV</b>                            | Mega (Milyon) Elektron Volt      |
| <b><math>e^+</math></b>               | Pozitron                         |
| <b><math>r_0</math></b>               | Elektron yarıçapı                |
| <b><math>Mc^2</math></b>              | Pozitronun durgun kütle enerjisi |
| <b><math>Al_2O_3</math></b>           | Alüminyum oksit                  |
| <b>BeO</b>                            | Berilyum oksit                   |
| <b><math>B_2O_3</math></b>            | Bor oksit                        |
| <b><math>\langle I \rangle</math></b> | Ortalama uyarma enerjisi         |
| <b><math>w_i</math></b>               | Elementin ağırlık yüzdesi        |
| <b><math>\mu (cm^{-1})</math></b>     | Lineer azaltma katsayısı         |
| <b><math>\mu / \rho</math></b>        | Kütle soğurma katsayısı          |

**Simgeler**

**Açıklama**

**ICRU**

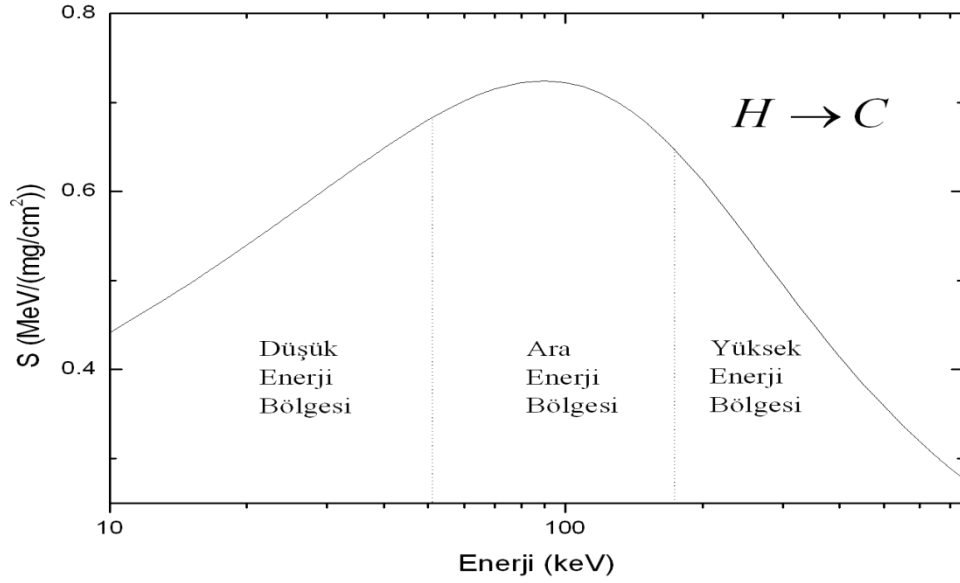
Uluslararası Radyasyon Birimleri ve  
Ölçümleri Komisyonu (International  
Commission on Radiation Units  
and Measurements)

## 1. GİRİŞ

Pozitronlar ve elektronların ortamla etkileşimleri elastik saçılma, inelastik saçılma ve frenleme ışıması yolu ile olmakta ve pozitronlar yok olmaya uğramaktadırlar. [Mott ve Massey, 1965]. Elastik etkileşmeler, hedef atomun kuantum durumlarının korunduğu yani temel durumunun etkileşmeden önce ve sonra da aynı kaldığı etkileşmelerdir. Düşük ve orta enerjili elektronlar için baskın enerji kaybetme mekanizması, ortamda elektronik uyarmaları ve iyonlaşmaları meydana getiren inelastik çarpışmalardır. Pozitronlar ve elektronların madde ile etkileşimi bir çok alanda büyük öneme sahiptir. Özellikle medikal fizik alanında (radyoterapi gibi), inelastik saçılma modelleri yardımı ile hesaplanan durdurma gücü ve enerji parametresinin, doz hesaplamalarında kullanılması nedeniyle çok büyük öneme sahiptir.

Durdurma gücü 20.y.y.'ın ilk başlarında atomun yapısını anlayabilmek için çalışılmış, ilk olarak 1913'te Bohr tarafından, klasik fizik yasaları kullanılarak hesaplanmıştır [Bohr, 1913]. Bu çalışmadan yaklaşık on yıl sonra dalga mekaniğinin gelişmesi ile 1930'da Bethe kuantum mekaniksel yaklaşımı kullanarak durdurma gücünü hesaplamıştır [Bethe, 1930]. Bu iki çalışma ile teorik olarak hesaplanan yüksek enerjili iyonların madde içinde birim yol başına kaybettikleri enerji değerleri, deneysel verilerle iyi bir uyum içerisindedir. Özellikle Bethe'nin çalışması çok daha iyi sonuçlar vermektedir ve daha sonra yapılan birçok çalışmada Bethe teorisi temel alınmıştır [Tufan, 2007].

Yüklü parçacıkların madde içinden geçerken birim yol başına kaybettikleri enerji olarak tanımlanan durdurma gücü karmaşık bir problemdir. Gelen parçacığın enerjisine göre durdurma gücünün değişimi Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi durdurma gücü önce hızlıca artmakta ve bir maksimuma ulaştıktan sonra azalmaktadır [Tufan, 2007].



Şekil 1.1. Farklı durdurma gücü bölgeleri

Şimdiye kadar durdurma gücü için ortaya konulan teorilerle elde edilen sonuçlar, gelen parçacığın tüm enerjileri için deneysel verilerle iyi bir uyum sağlayamamaktadır. Bu yüzden durdurma gücü üç ayrı bölgede incelenmektedir. İlk bölge durdurma gücünün gelen parçacığın enerjisiyle arttığı düşük enerji bölgesi, ikinci bölge durdurma gücünün düşük enerji davranışından yüksek enerji davranışına geçiş bölgesi olan ara enerji bölgesi, üçüncü bölge ise artan enerji ile durdurma gücünün azaldığı yüksek enerji bölgesidir. Bu bölgeler kesin sınırlarla birbirinden ayrılamaz. Bunun yanında mevcut durdurma gücü teorilerinin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olabilmesi için kabuk düzeltmesi, etkin ortalama uyarma enerjisi ve yoğunluk düzeltmesi gibi birtakım düzeltmeler yapılmaktadır [Tufan, 2007].

Pozitronların hedef içinde durdurulma mekanizması elektronlarınkine benzemesine rağmen bıraktıkları iz dolayısıyla çok önemli farklı bir özelliğe sahiptir. Ancak elektronlarla pozitronların durdurulmaları arasındaki fark küçük enerjilerde önem kazanmaktadır [Pimblott ve Siebbeles, 2002]. Yaklaşık 1 keV'in üzerindeki enerjilerde, enerji kaybı pozitron ve elektronlar için benzerdir. Daha düşük

enerjilerde önemli farklılıklar vardır [Pimblott ve ark., 2000]. Pozitron durdurma gücü hesapları 10 keV'in üstündeki enerjilerde [Seltzer and Berger, 1982; ICRU 37 Report], teorik ve deneysel olarak uyuşmalarına rağmen 10 keV'in altında kolay kullanılabilen bir işlem hemen hemen yok gibidir. Düşük ve orta enerjili elektronlar ve pozitronlar için baskın enerji kaybetme mekanizması, ortamda elektronik uyarılmaları ve iyonlaşmaları meydana getiren inelastik çarpışmalardır.

Nükleer radyasyonun tedavide kullanımı, kanser tümörü gibi vücutta istenmeyen yapıların yok edilmesini amaçlar. Ancak farklı radyasyon tiplerinin canlı yapı üzerindeki etkileri farklıdır ve bu farklılıkların karşılaştırılması, nükleer radyasyonun hedef dokunun birim uzunluğunda kaybettiği enerji demek olan Durdurma Gücü (SP) veya hedef organın birim uzunluğunda depolanan enerji demek olan Lineer Enerji Transferi (LET) büyüklüklerinin ölçümüyle yapılır [Keleş, 2011].

Radyasyonla tedavi, radyasyonun iyonlaştırıcı özelliğinden yararlanmaktadır. Ancak tedavide hasta bölgeye maksimum radyasyon dozu verilirken sağlam dokuları da maksimum düzeyde korumak amaçlanmalıdır. Bu durumu sağlamak yüksek LET li radyasyonla mümkün gibi görünmesine rağmen bunların menzillerinin çok kısa olması, derinlerde olan sağlıklı dokuya ulaşmayı engellediği için radyasyonla tedavi (radyoterapi) genellikle fotonlarla yapılır [Keleş, 2011].

Bir fotonun belli bir enerjide, t kalınlığında madde tabakasını geçerken soğrulma veya saçılmaya uğrama olasılığı, lineer azalma katsayısı  $\mu$  ( $cm^{-1}$ ) cinsinden nicel olarak ifade edilebilir. Genellikle yoğunluğa bağımlılığın bertaraf edilmiş hali olan kütle azalma katsayısı  $\frac{\mu}{\rho}$  ( $\frac{cm^2}{g}$ ) olarak ifade edilir.

Bu çalışmada, hafif yüklü parçacıklar olan pozitronların insan vücudunun % 80'inin sudan oluşması nedeniyle öncelikle sudaki nükleer durdurma gücü hesaplanmıştır. Hedef meteryaller olarak  $Al_2O_3$ , BeO ve  $B_2O_3$  ele alınmıştır. Nükleer durdurma gücü hesapları Tsoulfanidis (1995) tarafından önerilen ve üzerinde bazı

modifikasyonlar yapılarak farklı araştırmacılar [Gümüş, 2008 ; Rohrich, 1954] tarafından önerilmiş analitik ifadeler kullanılarak hesaplanmış ve kıyaslanmıştır.

Ayrıca Su, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılarak çeşitli enerjilerde, kütle azalma katsayıları Berger ve Hubbell tarafından (1999) geliştirilen XCOM bilgisayar programı ile hesaplanmıştır. Kütle azalma katsayıları kullanarak pozitronlar ve x-ışınlar için maksimum enerji değerlerinde doz hesabı (10 eV-10 keV) enerji aralığında yapılmıştır.

## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1. Pozitronların Hedefle Etkileşmesi

Pozitronların ve elektronların madde içerisindeki etkileşimleri hemen hemen aynıdır. Beta parçacıklarının madde ile etkileşmesi ağır yüklü parçacıklarda olduğu gibi iyonlaşma ve uyarılmanın yanı sıra ortamdaki çekirdeğin elektrik alanından kaynaklıdır.

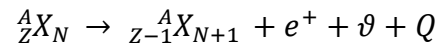
Bir ortama gelen parçacık etkileşerek ya kinetik enerjisini kaybetmeden ya da kaybederek geliş doğrultusunu değiştirerek yoluna devam etmektedir. Bir ortama gelen yüklü parçacığın yapacağı etkileşimler esnek saçılma, esnek olmayan saçılma, frenleme ışınımı (bremsstrahlung) olaylarıdır [Evans, 1955].

Atomik elektronlardan esnek saçılmada, gelen parçacık hedef atomun atomik elektronlarının alanında esnek olarak sapar. Bu tür saçılmalar sadece çok düşük enerjili gelen parçacıklar durumunda önemlidir.

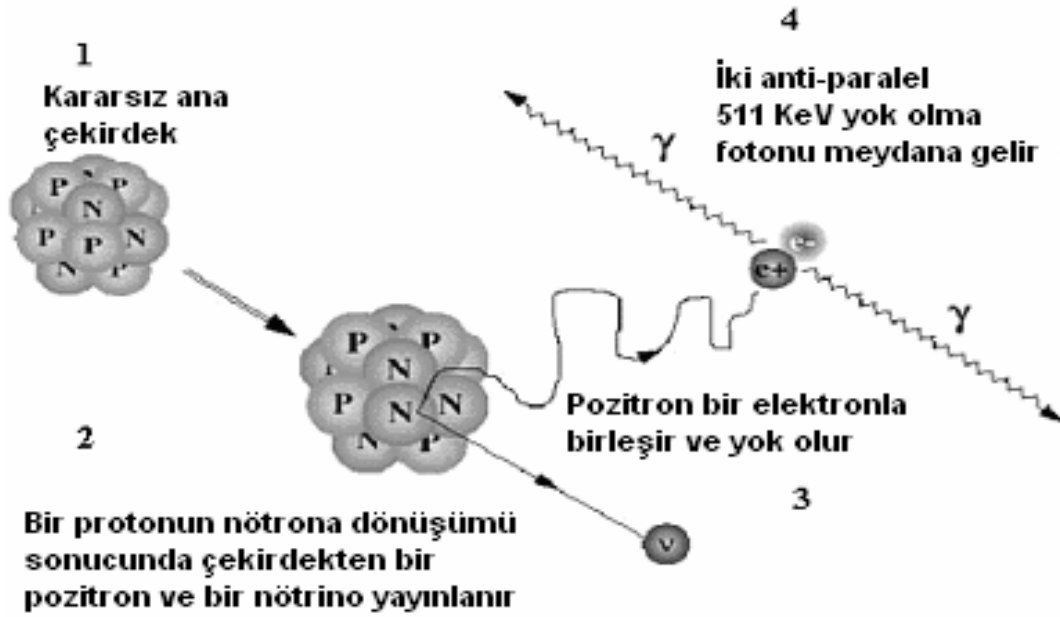
Pozitron ve elektron gibi hafif yüklü parçacıklar aynı enerjili ağır yüklü parçacıklarla karşılaştırıldıklarında kütleleri küçük olduğundan hızları yüksek olacaktır. Klasik elektromanyetik teoriye göre ivmeli hareket eden yüklü parçacık elektromanyetik radyasyon yayımlar. Pozitron gibi yüklü parçacık, atomun elektrostatik alanı nedeni ile hızlanarak büyük bir ivmeli alana maruz kalabilir ve elektromanyetik enerji yayımlayabilir. Hızları yani enerjileri yüksek olan beta parçacıkları bir çekirdek alanından geçtiği zaman, radyasyon yolu ile bir enerji kaybına uğrar. Bu enerji Bremsstrahlung ya da frenleme radyasyonu denilen sürekli x-ışını spektrumu şeklinde görülür [Powsner, 2008; Akar, 2005; Krane, 2001].

Nükleer kararlılık eğrisinin üstünde yer alan çekirdekler proton yönünden fazlalığı olan çekirdekler olup bu çekirdekler proton fazlalığından kurtularak kararlı hale

geçmektedirler. Bu çekirdeklerin proton fazlalığından kurtulmalarının yollarından biri çekirdeğin pozitron emisyonu ile bozunmasıdır. Bu reaksiyon sonucunda bir proton nötrona dönüşürken, ortama pozitif yüklü bir elektron ( $e^+$ ; pozitron), bir adet nötrino ( $\nu$ ) ve enerji ( $Q$ ) salınır. Reaksiyonda ortaya çıkan nötrino hemen hemen kütsüz olarak kabul edilen ve diğer parçacıklarla çok zayıf etkileşime giren yüksüz bir parçacıktır. Bozunum sonunda ortaya çıkan yeni çekirdeğin atom numarası ana çekirdeğe göre 1 birim azalırken kütle numarası aynı kalır . Bozunumun denklemi aşağıdaki gibidir [Demir, 2007].



Pozitron, elektronun anti-parçacığdır ve yükü dışında diğer fiziksel özellikleri aynıdır. Pozitronun ömrü çok kısadır (yaklaşık  $10^{-9}$  s). Pozitronlar ortamın atomları ile yaptıkları Coulomb etkileşimleri sonucunda enerjisini kaybederek doku içerisinde 2-7 mm ilerledikten sonra ortamdaki bir elektronla birleşerek yok olur [Levin ve Hoffman, 1999]. Yok olma olayından sonra elektron ve pozitron sahip oldukları kütlelerin enerji eşdeğeri olan her biri 511 keV enerjili iki fotona dönüşürler. Bu fotonlar, momentumun korunumu ilkesi gereği birbirlerine aynı doğrultuda fakat  $180^\circ$  zıt yönde yayınlanırlar (Şekil 2.1). Bu olaya (*annihilasyon*) yok olma olayı, oluşan fotonlara da yok olma fotonları denir [Demir, 2007].



Şekil 2.1. Pozitron-elektron çiftinin yok olma olayı.

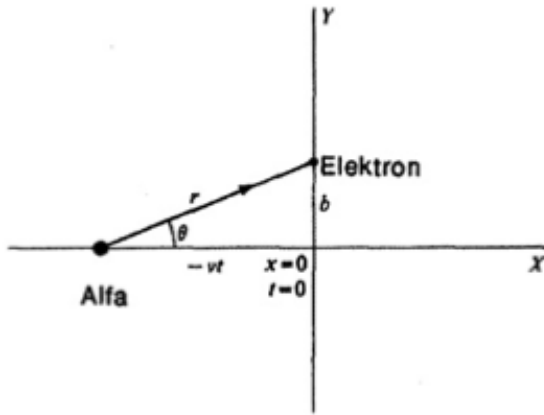
Pozitron Emisyon Tomografi (PET), elektron-pozitron yok olması olayı ile ortaya çıkan 2 adet 511 keV 'lik yok olma fotonunun eşzamanlı dedeksiyonu prensibi ile çeşitli hastalıkların teşhisini sağlayan bir görüntüleme yöntemidir [Demir, 2007].

## 2.2. Durdurma Gücü Teorisi

Durdurma gücü; Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu (ICRU) tarafından, radyasyonun ortamda hareketi boyunca birim uzunlukta ortama bıraktığı enerji olarak tanımlanır. Ancak, yüklü parçacığın ortamdaki hareketi sırasında ortamın atomuyla nasıl etkileşeceğini öngörmek pek mümkün değildir. Yüklü parçacığın Coulomb etkileşmesi yapacağını göz önüne alarak enerji kaybı için ortalama bir değerden bahsedilebilir [ICRU Report 49, 1993].

Ortama giren radyasyonun yükü, kütlesi ve hızı, ortamın yoğunluğu ve atom numarası göz önüne alınarak hesaplanan durdurma gücü hesapları ağır yüklü parçacıklar için Bethe [Bethe, 1933; Bethe, 1953] tarafından formüle edilmiştir .

Bir soğurucudan geçmekte olan yüklü bir ağır parçacık, enerjisinin büyük bir kısmını soğurucunun atomlarını iyonlaştırmakta kaybeder. Birim uzunluk başına düşen enerji kaybı, yani durdurma gücü teorik olarak hesaplanabilir. Klasik mekaniğe dayalı böyle bir durdurma gücü ifadesi ilk olarak 1915'te N. Bohr tarafından önerilmiştir. H.Bethe 1930'da kuantum mekaniği işlemlerinden yaklaşık bir ifade çıkardı. Kuantum mekaniğine dayalı benzer bir ifade 1933'te F.Bloch tarafından türetilmiştir [Arya, 1999].



Şekil 2.2. Bir alfa parçacığının bir atomun elektronuyla etkileşmesi.

$M$  kütleli, gelen parçacığın yükü  $z$  ve hızı  $v$  olsun. Soğurucunun kütle numarası  $A$ , atom numarası  $Z$  ve yoğunluğu  $\rho$  olsun. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi yüklü parçacığın yolundan  $b$  (yaklaşma parametresi) mesafede  $m$  kütleli bir elektron düşünelim. Aynı zamanda  $t = 0$ , yüklü parçacığın orijinde bulunduğu zamanı gösterebiliriz [Arya, 1999].

Problemin simetrik yapısından ( Şekil 2.2) elektrona verilen impulsun net x-bileşeni sıfırdır. Çünkü; parçacık sifira yaklaştığı zaman impulsun x-bileşenine olan katkı parçacık sıfırdan uzaklaştığı zamanki katkıyı götürür. Yani,

$$\int_{-\infty}^0 F_x dt = \int_0^{\infty} F_x dt \quad (2.1)$$

Burada  $F_x$ ,  $F=ze^2/r^2$  kuvvetinin x-bileşenidir. Elektrona verilen impulsun (momentumun) y- bileşeni

$$P_y = \int_{-\infty}^{\infty} F_y dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{ze^2}{r^2}\right) \sin\theta dt \quad (2.2)$$

olur. Değişkenleri Şekil 2.2'den tespit ederek

$$\sin\theta = b/r, \quad \cot\theta = vt/b,$$

$$dt = (b/v) \csc^2\theta d\theta$$

(2.2) bağıntısında yerlerine konulup integral işlemi yapılırsa

$$P_y = 2ze^2/b \quad (2.3)$$

elde edilir. Buradan,  $b$  mesafesindeki bir tek elektrona verilen enerji

$$E_e = \frac{P_y^2}{2m} = \frac{2z^2e^4}{mb^2v^2} \quad (2.4)$$

$N_A$  Avagadro sayısı olmak üzere, soğurucunun birim hacminde  $(Z\rho N_A)/A$  sayıda elektron vardır. Şekil 2.3 'de görüldüğü gibi problemin silindirik simetrisinden, yarıçapları  $b$  ve  $b+db$ , uzunluğu  $dx$  olan bir kabuktaki elektron sayısı ,

$$dN=2\pi b db dx (Z\rho N_A)/A \quad (2.5)$$

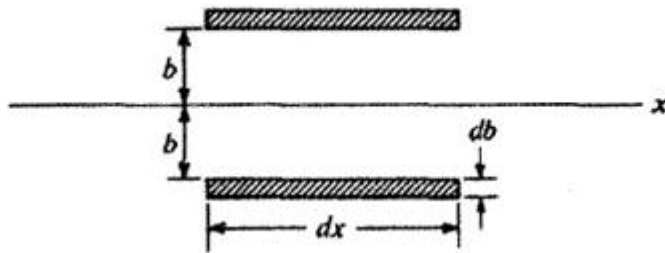
olacaktır. (2.4) ve (2.5) bağıntıları birleştirilerek,  $b$ 'de  $dx$  uzunluğunda ve  $db$  kalınlığındaki bir kabuktaki enerji kaybı

$$-dE(b) = 2\pi b db dx \frac{Z\rho N_A}{A} \frac{2z^2 e^4}{mb^2 v^2} \quad (2.6)$$

olarak bulunur. Dolayısıyla,  $b_{min}$  minimum yaklaşma parametresi ve  $b_{max}$  maksimum yaklaşım parametresi ile sınırlandırılmış bütün kabuklardaki elektronlarca birim uzunluk başına kaybedilen toplam enerji

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_A \rho Z}{mv^2 A} \int_{b_{min}}^{b_{max}} \frac{db}{b} = \frac{4\pi z^2 e^4 NZ}{mv^2} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \quad (2.7)$$

olur. Burada  $\rho N_A/A$  'yı soğurucunun birim hacmindeki atom sayısı  $N$  ile değiştirdik.



Şekil 2.3.  $dx$  boyuna,  $db$  kalınlığına ve  $b$  yarıçapına sahip silindir.

Böylece,  $b_{min}$  ve  $b_{max}$  değerlerini hesaplayabilirsek durdurma gücü (S) için bir ifade elde etmiş olacağız. Bu, çeşitli yollardan yapılabilir.

- (i)  $b$ 'nin minimum değeri, "kafa-kafaya bir çarpışmada, bir elektrona aktarılan maksimum hız, klasik olarak  $2v$ 'dir" gerçeğinden hesaplanabilir. Buna göre elektronun enerjisi

$$E_e \leq \frac{1}{2}m(2v)^2 = 2mv^2 \quad (2.8)$$

ile verilir. (2.4) ve (2.8) bağıntılarından

$$b_{min} = z e^2 / mv^2 \quad (2.9)$$

olur.

- (ii)  $b$ 'nin maksimum değeri, çarpışma sırasında elektronu serbest kabul etmenin geçersizliğinden hesaplanabilir. Elektronlar aslında bağlı olup bir miktar minimum ortalama uyarma enerjileri ( $I$ ) vardır. Böylece  $b_{max}$  sonsuz olmayıp (2.4) bağıntısından

$$\bar{I} = \frac{2z^2 e^4}{mb_{max}^2 v^2}$$

veya

$$b_{max} = ze^2 / v(2/m\bar{I})^{1/2} \quad (2.10)$$

ile verilir.

(2.7), (2.9) ve (2.10) bağıntılan birleştirilerek

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} NZ \ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right)^{1/2} \quad (2.11)$$

elde edilir.

yüksek enerjilerde rölativite düzeltmesi dikkate alınırsa şu ifade elde edilir [Arya, 1999].

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} NZ \left[ \ln\left(\frac{2m_0 v^2}{I}\right) - \ln\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (2.12)$$

Burada  $m_0$  bir elektronun durgun kütesidir. Bu eşitliklerde gelen yüklü parçacığın kütesinin yer almadığı görülmektedir. Yukarıda türetilen ifadeler alfalar, döteronlar, mezonlar ve benzeri bütün yüklü parçacıklar için doğrudur. Durdurma gücü için (2.11) bağıntısıyla verilen teorik ifadeyi deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için alfa parçacıklarının durumunu ele alalım. Burada  $Z = 2$  olduğu için (2.11) bağıntısı

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{16\pi e^4}{mv^2} NZ \ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right) \quad (2.13)$$

şekline girer [Arya, 1999].

Bu çalışmada düşük enerjilerde ve 2 farklı eşitlik kullanarak elektron ve pozitronlar için durdurma gücü hesabı yapılmıştır.

### 2.2.1. Tsoulfanidis eşitliği kullanarak durdurma gücü hesabı[Tsoulfanidis, 1995]

Yüklü parçacıklar (proton, döteron ve alfa parçacıkları) için durdurma gücü ,

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[ \ln\left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2\right) - \beta^2 \right] \quad (2.14)$$

dır.Tsoulfanidis tarafından pozitronlar için verilen durdurma gücü ifadesi, MeV/cm biriminde[Tsoulfanidis, 1995], şu şekilde tanımlanmıştır :

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[ \ln\left(\frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1}}{I} mc^2\right) - \frac{\beta^2}{24} \left(23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3}\right) + \frac{\ln 2}{2} \right]$$

Elektronlar için verilen durdurma gücü ifadesi ise;

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[ \ln\left(\frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1}}{I} mc^2\right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (\gamma^2 + 2\gamma - 1)\ln 2\right) \right]$$

Bu eşitliklerdeki ifadeler ;

$r_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2,818 \times 10^{-15}$  m, Klasik elektron yarıçapıdır.

$mc^2$ : Elektronun durgun kütle enerjisi olup 0,511 MeV

$Mc^2$  : Protonun durgun kütle enerjisi olup 931,5 MeV

N: Hedef materyalin  $m^3$  ü başına atom sayısıdır ( $N = \rho N_0 / A$  )

A: Hedef materyalin atom ağırlığı

Z: Hedef materyalin atom numarası

T: Parçacığın MeV cinsinden kinetik enerjisi

I: Hedefin eV cinsinden ortalama uyarma potansiyeli

$\beta = v/c$

$$\gamma = (T + mc^2) / mc^2 = 1 / (1 - \beta^2)^{1/2}$$

şeklinde tanımlanmaktadır [E'lannunziata, 2003]

### 2.2.2. Modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitliği kullanarak durdurma gücü hesabı

Rohrlich and Carlson tarafından pozitronlar için verilen durdurma gücü ifadesi, MeV.

$cm^2/g$  biriminde [Gümüş, 2008; 2005] şu şekilde tanımlanmıştır :

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{mv^2 A} z^{*2} N_0 Z^* \left[ \ln\left(\frac{T}{I^*}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\tau}{2}\right) + \frac{F^+(\tau)}{2} \right]$$

$$F^+(\tau) = 2 \ln 2 - \frac{\beta}{12} \left( 23 + \frac{14}{\tau + 2} + \frac{10}{(\tau + 2)^2} + \frac{4}{(\tau + 2)^3} \right)$$

Elektronlar için verilen durdurma gücü ifadesi ise; [Gümüş, 2008 ; 2005]

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{mv^2 A} z^{*2} N_0 Z^* \left[ \ln\left(\frac{T}{I^*}\right) + \frac{F^-(\tau)}{2} \right]$$

$$F^-(\tau) = 1 - \beta^2 + \left[ \left( \frac{\tau^2}{8} \right) - (2\tau + 1) \ln 2 \right] (1 + \tau)^2$$

Bu eşitliklerdeki ifadeler ; [Gümüş, 2008 ;2005]

$$k = \frac{4\pi e^4 N_0}{mc^2} = 0,307075 \text{ MeV. cm}^2$$

$z^*$ : Gönderilen parçacığın atom numarası olup ve

$z^{*2} = 1 - \exp(-2200\beta^{1,78})$  ile tanımlanır. [Sugiyama, 1985]

$Z^*$ : Hedefin atom numarası olup ve

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x + b)}{(x + b)^3}$$

ile tanımlanır. [Sugiyama, 1985]

b : normalleşme sabiti dir. [Cabrera ve ark, 1997]

$$b = \left(\frac{8}{\pi}\right)^{2/3}$$

$$x = -2 \left(\frac{b}{3}\right) + \frac{\left(\frac{b}{3}\right)^2}{\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}} + \left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}} +$$

$$\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$a = \frac{b^2}{0.60647} \frac{v_0^2}{v^2} Z^{4/3}$$

$$v_0 = 2,42 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

I\* : Hedefin ortalama uyarma enerjisi olup ve

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Z c_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

ile tanımlanır.

$$c_0 = 0,6064741718$$

$$\alpha = \frac{Z}{2Z^*} \left[ x^2(x + 3b) \ln x + x(x + b)b + x(\ln 6 - 2)3b^2 + b^3 \left( \ln 6 - \frac{10}{3} \right) + \right. \\ \left. (3x + b)b^2 \ln \frac{b^2}{(x + b)^4} - (x + b)^3 \ln(x + b) \right] / (x + b)^3$$

$I=10,46313462 \gamma Z$  ; [Andersen ve ark, 1977; ICRU 37, 1984]

$$\tau = \frac{T}{mc^2}$$

[Gümüş, 2008 ; 2005]

### 2.2.3. Ortalama atomik kütle ve etkin atom numarasının hesaplanması

Hedef, elementlerin karışımından oluşan bir bileşik ise kullanılacak olan ortalama kütle numarası ( $A_{ort}$ ), etkin atom numarası ( $Z_{ef}$ ) ve uyarılma enerjisi ( $I$ ) değerleri ;

$$A_{ort} = \sum_{i=1}^n w_i A_i$$

$$Z_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i}\right) Z_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i}\right) Z_i}$$

olarak hesaplanır.

Uyarma Enerjisi kuantum mekaniksel bir yaklaşım kullanarak teorik veya deneysel olarak elde edilir. Eger hedef saf bir element ise şöyle tanımlanır :

$Z > 12$  için  $I=(9,76+ 58,8 Z^{-1,19}) Z$  [Tsoulfanidis, 1995]

Ancak hedef, bir bileşik ise ortalama uyarma enerjisi Bethe teorisi ile hesaplanır:

$$\langle I \rangle = \exp \left\{ \sum_{i=1}^n w_i \left( \frac{Z_i}{A_i} \right) \ln I_i / \sum_{i=1}^n w_i \left( \frac{Z_i}{A_i} \right) \right\}$$

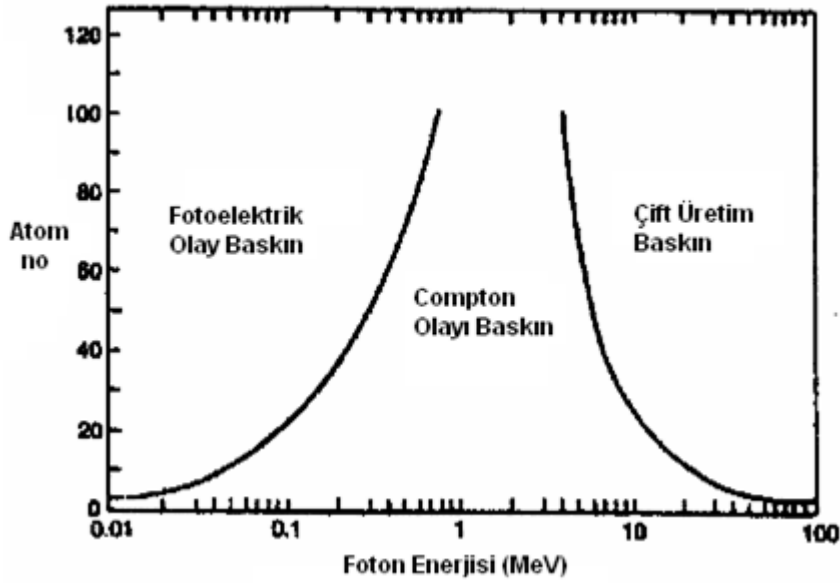
Burada  $w_i, Z_i, A_i, I_i$  sırasıyla, bileşik içindeki elementlerin yüzde ağırlıkları, atom numaraları, atom ağırlıkları, ortalama uyarma enerjisi dir [E'lannunziata, 2003; Berger and Seltzer, 1982].

### 2.3. X-Işınlarnın Hedefle Etkileşmeleri

Fotonlar madde içinden geçerken ya çekirdekler ile ya da yörünge elektronları ile etkileşirler. Elektrik yükleri olmadığından etkileştikleri madde içerisinde itilip çekilmezler, ancak yolları üzerindeki parçacıklarla çarpışma yaparlar. X-ışınları başlıca üç etkileşmeyle enerjilerini kaybeder. Bunlar;

1. Bağlı elektronlar ile etkileşerek Fotoelektrik olayı,
2. Hemen hemen serbest elektronlar ile etkileşerek Compton saçılması,
3. Atomun çekirdeğine yakın bir yerde bir pozitron ve bir elektron meydana getirme yani, Çift oluşum dur.

Bu üç olayın olma olasılığı x-ışınlarının enerjileri ve etkileştikleri maddenin atom numarasına bağlı olarak değişir. Bu olaylar sonucunda foton ya soğurulur ya da enerjisinin bir kısmını maddede bırakarak saçılır veya hiç enerji bırakmadan yön değiştirir [Khan, 2003].



Şekil 2.4 . Fotonların enerjilerine bağlı olarak farklı maddeler ile etkileşimi

Düşük enerjili fotonlar için en önemli enerji kaybı fotoelektrik olayla olur. Foton etkileştiği maddenin sıkı bağlı elektronlarının birine enerjisinin tümünü vererek soğurular ve elektron serbest hale geçer. Bu yolla atomdan ayrılan fotoelektronun kinetik enerjisi soğurulan fotonun enerjisi ile bağlanma enerjisinin arasındaki farka eşittir. Serbest hale geçen fotoelektron ortamda ilerlerken ikincil iyonizasyona, uyardırmaya ve frenleme ışınımına sebep olur [Khan, 2003].

Düşük atom numaralı hedeflerde, enerjileri 30 keV-20 MeV arasında olan fotonlar için Compton saçılması önemli bir etkileşimdir. Gelen foton, etkileştiği hedefin zayıf bağlı veya serbest elektronlarıyla elastik çarpışma yapmak suretiyle etkileşir. Enerjisinin ve momentumunun bir kısmını elektrona verir ve daha düşük enerjili yeni bir foton olarak başka bir doğrultuda yol alır. Radyasyonla tedavide yaygın olarak kullanılan enerji aralığı için etkileşme olasılığı en yüksek olay Compton olayıdır [Khan, 2003].

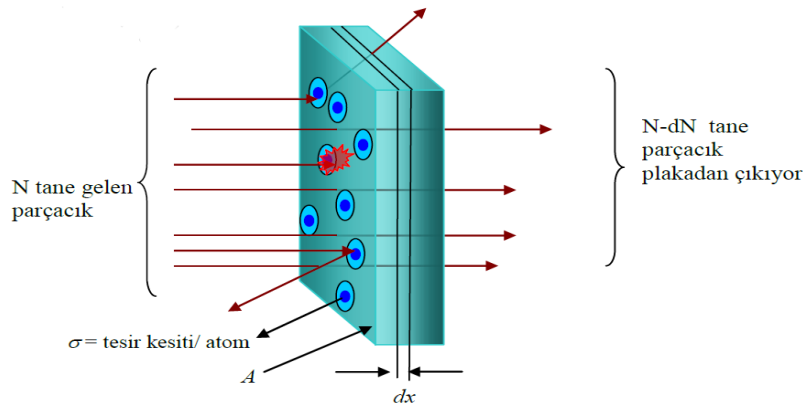
Çift oluşumu, bir fotonun, bir elektron ile bir pozitron ortaya çıkararak yok olduğu bir süreçtir. Enerjisi 1,02 MeV'den daha büyük olan bir foton, çekirdeğin elektrik

alanına girdiğinde etkileşerek bir elektron ile bir pozitron çifti oluşturur ve kaybolur. Çift oluşumunda meydana gelen elektron, serbest elektronlar gibi atomlarla etkileşir, pozitron ise ortamdan bir serbest elektron yakalayarak 0,51 MeV'lik birbirine zıt yönde foton yayınlayarak (yok olma olayı) yok olur [Khan, 2003].

#### 2.4. Tesir Kesiti

Hedefe gelen yüklü parçacığın etkileşme olasılığı tesir kesiti ifadesi ile hesaplanabilir [Baykal, 2011] .

Gelen her parçacık hedefte belli bir kesit görür. Şekil 2.5'de gösterildiği gibi hedefe gelen parçacık madde ile etkileşmeler yapar. Parçacık demetinin gördüğü kesite bağlı olarak etkileşme olasılığı değişmektedir [Baykal, 2011].



Şekil 2.5. Tesir kesiti ve radyasyon demetinin ortamda zayıflaması

$I$  şiddetinde bir ışın demeti,  $dx$  kalınlığında bir  $A$  yüzeyine gelsin. Maddenin birim hacmindeki atom sayısı  $n$  ve atomik tesir kesiti  $\sigma$  ise, ışına maruz kalan madde

alanı  $An\sigma t$  olur. Gelen demetteki parçacık sayısı  $N$  ise, yüzeydeki çekirdeklerle etkileşen parçacık sayısı  $dN$ ,

$$f = \frac{dN}{N} = \frac{n\sigma A dx}{A}$$

olarak belirlenir [Baykal, 2011].

Şekil 2.5’de gösterildiği gibi aynı parçacık demetinin, sonlu bir  $x$  kalınlığındaki bir yüzeye geldiğini düşünelim. Eğer parçacık sadece bir defa etkileşiyorsa,

$$\frac{dN}{N} = \frac{n\sigma A dx}{A}$$

şeklinde yazılabilir. Başlangıçta parçacık sayısı  $N_0$  olursa ,

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -n\sigma \int_0^x dx$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin integrali alınır,

$$\ln N - \ln N_0 = -n\sigma x$$

$$N = N_0 e^{-n\sigma x}$$

bağıntısı elde edilir. Burada, mikroskopik tesir kesitidir ve birimi Barn dır.

$$1\text{Barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Makroskopik tesir kesiti ise  $\mu$  ile gösterilir.  $n$  hedefte birim hacimdeki atom sayısı,

$$n = \frac{\rho N_A}{A}$$

dir.

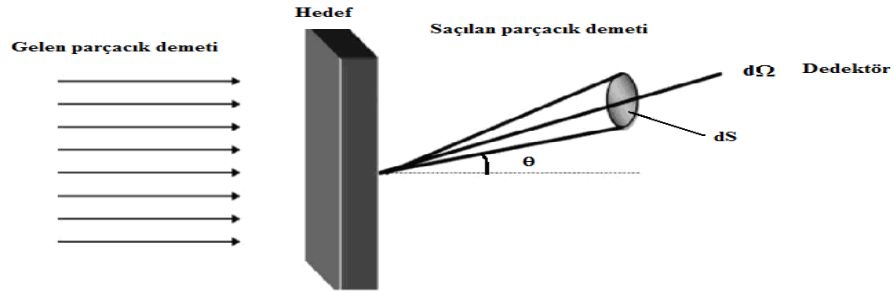
X- ışınları için makroskopik tesir kesiti  $\sigma n$  yerine  $\mu$  ile gösterilir ve lineer azalma katsayısı olarak tanımlanır.

$$\sigma = \mu$$

$$N = N_0 e^{-n\sigma x}$$

olur [Baykal, 2011].

Burada  $N$ ,  $x$  kalınlığından geçen, hedefe gelen  $N_0$  parçacık sayısıdır.



Şekil 2.6. Saçılma olayı

Şekil 2.6'deki, eşit enerjili parçacıklardan oluşan bir demetin, başlangıç noktasına konulmuş bir hedef üzerine gönderildiğini varsayalım. Saçılma olayını gözlemek için kullanılan dedektörlerin genellikle etkin kesit alanları vardır. Bu etkin alana  $dS$  dersek, bunun gördüğü katı açı  $d\Omega$ ,

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$$

ile verilmektedir [Akar, 2005].

$$\text{Diferansiyel tesir kesiti} = \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega}$$

olarak tanımlanmaktadır. Diferansiyel tesir kesiti hesabında parçacığın türü, enerjisi ve saçılmanın gerçekleştiği ortam çok önemli rol oynar. Diferansiyel tesir kesitinin tüm açılar üzerinden integrali alınırsa toplam tesir kesiti,

$$\sigma = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega} \sin \theta d\theta$$

elde edilmektedir .

Spin yönleri gelişigüzel yayıldığından diferansiyel tesir kesiti  $\phi$  den bağımsızdır ve  $\phi$  üzerinden integral alındığında,

$$\sigma = 2\pi \int_0^{\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta$$

elde edilmektedir [Baykal, 2011].

Burada  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \sigma(\theta)$  diferansiyel-tesir-kesitidir. Diferansiyel-tesir-kesiti ölçümünün faydası, sadece enerjiye bağımlı olmayıp, aynı zamanda tesir kesitinin yöne bağımlılığının nükleer reaksiyonun cinsine göre olduğu gerçeğinin bulunmasında da vardır. Bir nükleer kuvvet tipi kabullenerek, farklı nükleer reaksiyonların açısız dağılımını ifade etmek mümkündür.

## 2.5. X- Işınlınının Azalma Katsayıları

Bir ortama giren x-radyasyonunun madde ile etkileşmesi, ortamın lineer azalma katsayısına bağlıdır. Gelen fotonun enerjisine ve ortamın atom numarasına bağlı olan lineer azalma katsayısı, gelen fotonun madde içindeki giriciliğini ve davranışını karakterize eder. Lineer azalma katsayısı soğurucu ortamın yoğunluğuna da bağlıdır. Yoğunluğa bağımlılığından kurtulmak için “ kütle azalma katsayısı ” kullanılır. Kütle Azalma katsayısı  $\frac{\mu}{\rho}$  olarak tanımlanmıştır [Demir, 2008].

Eğer  $\mu$  ( $cm^{-1}$ ), soğurucu maddenin yoğunluğu ( $\frac{g}{cm^3}$ ) ise kütle Azalma katsayısı  $\frac{\mu}{\rho}$  ( $\frac{cm^2}{g}$ ) boyutunda olacaktır.

X-ışınlarının bir ortamdaki giriciliği ve yayınlanma özelliklerinin anlaşılması bakımından lineer Azalma katsayıları önemli bir nicelik olup soğurucu ortamın cinsine ve gamma ışınlarının enerjisine bağlıdır (Evans, 1955).

$dt$  kalınlığındaki bir madde üzerine gelen demetin şiddeti maddeyi geçtikten sonra azalacaktır. Bu azalma ;

$$- dI_0 = I_{son} - I_{ilk} = I_{geçen} - I_{gelen} = I - I_0 < 0$$

şeklinde gösterilebilir.

Burada işaretin negatifliği gelen ışının şiddetindeki azalmayı gösterir. Bu azalma gelen şiddet ve kalınlıkla doğru orantılı olacaktır. Buradaki orantı katsayısı  $\mu$  azalma katsayısıdır ;

$$dI_0 = \mu I_0 dt$$

yazılabilir. Buradan

$$\int_{I_0}^I \frac{dI_0}{I_0} = - \int_0^t \mu dt$$

$$I = I_0 e^{-\mu t}$$

bulunur.  $I = I_0 e^{-\mu t}$  ifadesi "Lambert kanunu", "Beer kanunu" veya "Beer-Lambert kanunu" olarak bilinir.

Örnek bir tek saf elementten oluşmuyorsa, örneği oluşturan elementlerin toplam azalma katsayılarının ağırlıklı ortalaması

$$\mu = \sum_m C_m \mu_m$$

ifadesinden bulunabilir. Burada  $C_m$  numune içinde  $m$ . elementin ağırlık kesri (yüzde ağırlığı),  $\mu_m$  ise  $m$  elementin azalma katsayısıdır.

Kütle azalma katsayısı birim alanda birim kütle başına düşen azalmayı ya da alınan enerji kesri demektir [Demir, 2008].

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{cm}^2/\text{g})$$

### 3. YÖNTEM VE HESAPLAMALAR

#### 3.1. Ortalama Atomik Kütle ve Etkin Atom Numarasının Hesaplanması

Bu çalışmada, durdurma gücü hesaplamak için seçilen hedefler tek bir elementten oluşmayıp kompleks yapılardan oluştuklarından ortalama “kütle numaralarının” ve “etkin atom numaralarının” tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için eşitlikler NIST programından alınmıştır.

Ortalama kütle numarası ;

$$A_{\text{ort}} = \sum_{i=1}^n (A_i w_i)$$

ve etkin atom numarası ;

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i}{A_i}\right) Z_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i}{A_i}\right) Z_i}$$

eşitlikleri kullanarak hesaplanmıştır.

Bu eşitliklerdeki ; “ n ” hedefin element sayısı, “  $W_i$  ” i.elementin ağırlık yüzdesini, “  $N_i$ ” elementin atom sayısını ve “ M ” hedefin moleküler ağırlığını temsil eder.  $W_i = N_i A_i / M$  'dir [Tubiana ve ark., 1990] .

Örnek olarak, Su için Ortalama Kütle Numarası için yapılan işlem aşağıda verilmiştir:

$$A_{\text{ort}} = \sum_{i=1}^n (A_i w_i)$$

$$A_{\text{ort}} = A_H W_H + A_O W_O = 1 \times 0,111894 + 16 \times 0,888106 = 14,321$$

Etkin Atom Numarası ise ,

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i}{A_i}\right) Z_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i}{A_i}\right) Z_i}$$

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\left(\frac{W_H}{A_H}\right) Z_H^2 + \left(\frac{W_O}{A_O}\right) Z_O^2}{\left(\frac{W_H}{A_H}\right) Z_H + \left(\frac{W_O}{A_O}\right) Z_O} = \frac{\left(\frac{0,111894}{1}\right) (1)^2 + \left(\frac{0,888106}{16}\right) (8)^2}{\left(\frac{0,111894}{1}\right) (1) + \left(\frac{0,888106}{16}\right) (8)} = 6,6$$

olarak bulunur.

### 3.2. Tsoulfanidis Eşitliği ile Durdurma Gücü Hesaplanması

Su'yun pozitronlar için durdurma gücü hesabına bir örnek aşağıda sunulmuştur.

Pozitronlar için Tsoulfanidis durdurma gücü eşitliği [Tsoulfanidis, 1995],

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ$$

$$\left[ \ln\left(\frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1}}{1} mc^2\right) - \frac{\beta^2}{24} \left(23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3}\right) + \frac{\ln 2}{2} \right]$$

dir. Bu ifadede,

$$N = \rho N_0 / A$$

$\rho$  :hedefin yoğunluğu ,  $N_0$ : Avagadro sayısı ,  $A$ : hedefin kütle numarasıdır.

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2 N_0 Z}{\beta^2 A}$$

$$\left[ \ln\left(\frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1}}{1} mc^2\right) - \frac{\beta^2}{24} \left(23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3}\right) + \frac{\ln 2}{2} \right]$$

$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$  “Kütle durdurma gücü” olarak tanımlanır.

T=0,01 MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

dır. Su’yun Tsoulfanidis durdurma gücü ise;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi(2,818 \times 10^{-13})^2 \frac{0,511 \times 6,62 \times 10^{23} \times 6,6}{(0,194985)^2 \times 14,321}$$

$$\left[ \ln\left(\frac{0,194985 \times 1,019569 \sqrt{1,019569 - 1}}{75 \times 10^{-6}} \times 0,511\right) \right]$$

$$- \frac{0,194985}{24} \left(23 + \frac{14}{1,019569 + 1} + \frac{10}{(1,019569 + 1)^2} + \frac{4}{(1,019569 + 1)^3}\right) + \frac{\ln 2}{2}]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 20,606168 \quad \left(\frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}}\right)$$

bulunur.

**Hedef  $\text{Al}_2\text{O}_3$  olursa ,**

Kütle durdurma gücü için ;

$T=0,01$  MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

dır.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  'un Tsoulfanidis durdurma gücü ise;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi(2,818 \times 10^{-13})^2 \frac{0,511 \times 6,62 \times 10^{23} \times 10,674}{(0,194985)^2 \times 21,83}$$

$$\left[ \ln \left( \frac{0,194985 \times 1,019569 \sqrt{1,019569 - 1}}{145,2 \times 10^{-6}} \times 0,511 \right) \right.$$

$$\left. - \frac{0,194985}{24} \left( 23 + \frac{14}{1,019569 + 1} + \frac{10}{(1,019569 + 1)^2} + \frac{4}{(1,019569 + 1)^3} \right) + \frac{\ln 2}{2} \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 19,27956 \quad \left( \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}} \right)$$

bulunur.

**Hedef BeO olursa ;**

Kütle durdurma gücü için ;

T=0,01 MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

dır. BeO 'nun Tsoulfanidis durdurma gücü ise;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi(2,818 \times 10^{-13})^2 \frac{0,511 \times 6,62 \times 10^{23} \times 6,665}{(0,194985)^2 \times 13,477}$$

$$\left[ \ln \left( \frac{0,194985 \times 1,019569 \sqrt{1,019569 - 1}}{93,2 \times 10^{-6}} \times 0,511 \right) \right]$$

$$- \frac{0,194985}{24} \left( 23 + \frac{14}{1,019569 + 1} + \frac{10}{(1,019569 + 1)^2} + \frac{4}{(1,019569 + 1)^3} \right) + \frac{\ln 2}{2} ]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 21,2458 \quad \left( \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}} \right)$$

bulunur.

**Hedef B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olursa ;**

Kütle durdurma gücü ;

T=0,01 MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

dır. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 'un Tsoulfanidis durdurma gücü ise;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi(2,818 \times 10^{-13})^2 \frac{0,511 \times 6,62 \times 10^{23} \times 7,35}{(0,194985)^2 \times 14,45}$$

$$\left[ \ln \left( \frac{0,194985 \times 1,019569 \sqrt{1,019569 - 1}}{99,6 \times 10^{-6}} \times 0,511 \right) \right]$$

$$- \frac{0,194985}{24} \left( 23 + \frac{14}{1,019569 + 1} + \frac{10}{(1,019569 + 1)^2} + \frac{4}{(1,019569 + 1)^3} \right) + \frac{\ln 2}{2} ]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 20,3845 \left( \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}} \right)$$

bulunur.

### 3.3. Modifiye Edilmiş Tsoulfanidis Eşitliği ile Durdurma Gücü Hesaplanması :

Tsoulfanidis eşitliğinde hedefin atom numarası (Z) ve hedefe gönderilen pozitronların z'leri için Modifiye Tsoulfanidis çalışmasında kullanılan eşitlikler yerleştirilerek yeni bir durdurma gücü ifadesi önerilmiştir.

**Su için :**

Pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis durdurma gücü eşitliği, [Gümüş, 2008; 2005]

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{mv^2 A} z^{*2} N_0 Z^* \left[ \ln\left(\frac{T}{I^*}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\tau}{2}\right) + \frac{F^+(\tau)}{2} \right]$$

$$F^+(\tau) = 2\ln 2 - \frac{\beta}{12} \left( 23 + \frac{14}{\tau + 2} + \frac{10}{(\tau + 2)^2} + \frac{4}{(\tau + 2)^3} \right)$$

T=0,01 MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

Bu eşitlikte modifiye atom numarası  $Z^*$ 'ın hesaplanması için gerekli eşitlikler aşağıda verilmiştir. Bu eşitliklerde a, b ve X parçacığın hızına ( $V_0$  ve V) bağlı sabitlerdir [Gümüş, 2008; 2005].

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x + b)}{(x + b)^3}$$

$$b = \left(\frac{8}{\pi}\right)^{2/3} = \left(\frac{8}{3,14}\right)^{2/3} = 1,8648$$

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{v_0^2}{v^2} Z^{4/3}$$

$$v_0 = 2,42 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$a = \frac{(1,8648)^2}{0,60647} \frac{(2,42 \times 10^6)^2}{(7,97067)^2} (6,6)^{4/3} = 0,1214936$$

$$x = -2 \left(\frac{b}{3}\right) + \frac{\left(\frac{b}{3}\right)^2}{\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}} + \left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$x = -2 \left(\frac{1,8648}{3}\right) +$$

$$\frac{\left(\frac{1,8648}{3}\right)^2}{\left[\frac{0,1214936}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,1214936}{2}\right)^2 + 0,1214936 \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}}$$

$$\left[\frac{0,1214936}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,1214936}{2}\right)^2 + 0,1214936 \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$x=0,039484171$  (Cabrera-Trujillo ve ark., 1997; Gümüş, 2005)

$$Z^* = 6,6 \times \frac{(1,8648)^2(3x + 1,8648)}{(x + 1,8648)^3} = 6,591605142$$

Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ )'ın hesaplaması için;

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Z c_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$\alpha = \frac{Z}{2Z^*} [x^2(x + 3b)\ln x + x(x + b)b + x(\ln 6 - 2)3b^2 + b^3 \left( \ln 6 - \frac{10}{3} \right) + (3x + b)b^2 \ln \frac{b^2}{(x + b)^4} - (x + b)^3 \ln(x + b)] / (x + b)^3$$

burada  $c_0=0,6064741718$  'dır.

$$I = 10,46313462 \gamma Z \quad ; \quad [ \text{Andersen ve ark, 1977; ICRU 37, 1984} ]$$

$$\gamma = \frac{75 \times 10^{-6}}{10,46313462 \times 6.6} = 1,086064241 \times 10^{-6}$$

$$\alpha = \frac{6,6}{2(6,591605142)} [(0,039484171)^2(0,39484171 + 3(1,8648)) \ln(0,039484171) + 0,039484171(0,039484171 + 1,8648)1,8648 + 0,039484171(\ln 6 - 2)3(1,8648)^2 + (1,8648)^3 \left( \ln 6 - \frac{10}{3} \right) + (3(0,039484171) + 1,8648) 1,8648^2 \ln \frac{(1,8648)^2}{(0,039484171 + 1,8648)^4} - (0,039484171 + 1,8648)^3 \ln(0,039484171 + 1,8648) / (0,039484171 + 1,8648)^3]$$

$$\alpha = -1,7103649$$

$$\exp(\alpha) = 0,180799799$$

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Z c_0^{-\frac{3}{2}} \exp(\alpha) = 7,46359 \times 10^{-5}$$

Gönderilen parçacığın modifiye Atom Numarasının Hesaplanması için;

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200\beta^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200(0.194985)^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1$$

Su 'yun Modifiye edilmiş Tsoulfanidis Eşitliği ile durdurma gücü ise ;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 0,307075 \frac{1}{14,231} 6,591605142 \left[ \ln \left( \frac{0,01}{7,46359 \times 10^{-5}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{0,019569}{2} \right) + \frac{2 \ln 2 - \left( \frac{0,194985}{12} \right) \left( 23 + \left( \frac{14}{(0,019569 + 2)} + \frac{10}{(0,019569 + 2)^2} + \frac{4}{(0,019569 + 2)^3} \right) \right)}{2} \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 19,80972 \left( \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}} \right)$$

bulunur.

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için ;**

Pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis'in durdurma gücü eşitliği, [Gümüş, 2008; 2005]

T=0,01 MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

Bu eşitlikte modifiye atom numarası  $Z^*$ 'ın hesaplanması için gerekli eşitlikler aşağıda verilmiştir. Bu eşitliklerde a, b ve X parçacığın hızına ( $V_0$  ve V) bağlı sabitlerdir [Gümüş, 2008; 2005].

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x + b)}{(x + b)^3}$$

$$b = \left(\frac{8}{\pi}\right)^{2/3} = \left(\frac{8}{3,14}\right)^{2/3} = 1,8648$$

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{v_0^2}{v^2} Z^{4/3}$$

$$v_0 = 2,42 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$a = \frac{(1,8648)^2}{0,60647} \frac{(2,42 \times 10^6)^2}{(7,97067)^2} (10,674)^{4/3} = 0,230638$$

$$x = -2 \left(\frac{b}{3}\right) + \frac{\left(\frac{b}{3}\right)^2}{\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}} + \left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}} +$$

$$\left[ \frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a\left(\frac{b}{3}\right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$x = -2\left(\frac{1,8648}{3}\right) +$$

$$\frac{\left(\frac{1,8648}{3}\right)^2}{\left[ \frac{0,230638}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,230638}{2}\right)^2 + 0,230638\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}} +$$

$$\left[ \frac{0,230638}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,230638}{2}\right)^2 + 0,230638\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$x = 0,07664369 \quad (\text{Cabrera-Trujillo ve ark., 1997; Gümüş, 2005})$$

$$Z^* = 10,674 \times \frac{(1,8648)^2(3(0,07664369) + 1,8648)}{(0,07664369 + 1,8648)^3} = 10,62540639$$

Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ )'ın hesaplaması için;

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Z c_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$\alpha = \frac{Z}{2Z^*} [x^2(x + 3b)\ln x + x(x + b)b + x(\ln 6 - 2)3b^2 + b^3 \left(\ln 6 - \frac{10}{3}\right) +$$

$$(3x + b)b^2 \ln \frac{b^2}{(x + b)^4} - (x + b)^3 \ln(x + b)] / (x + b)^3$$

burada  $c_0 = 0,6064741718$  'dır.

$$I = 10,46313462 \gamma Z \quad ; \quad [\text{Andersen ve ark, 1977; ICRU 37, 1984}]$$

$$\gamma = \frac{145,2 \times 10^{-6}}{10,46313462 \times 10,674} = 1,300102534 \times 10^{-6}$$

$$\alpha = \frac{10,674}{2(10,62540639)} [ (0,07664369)^2(0,07664369 + 3(1,8648)) \ln(0,07664369) + 0,07664369(0,07664369 + 1,8648)1,8648 + 0,07664369(\ln 6 - 2)3(1,8648)^2 + (1,8648)^3 \left( \ln 6 - \frac{10}{3} \right) (3(0,07664369) + 1,8648)1,8648^2 \ln \frac{(1,8648)^2}{(0,07664369 + 1,8648)^4} (0,07664369 + 1,8648)^3 \ln(0,07664369 + 1,8648) ] / (0,07664369 + 1,8648)^3$$

$$\alpha = -1,72136057$$

$$\exp(\alpha) = 0,178822681$$

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Zc_0^{-\frac{3}{2}} \exp(\alpha) = 1,4291500 \times 10^{-4}$$

Gönderilen Parçacığın Modifiye Atom Numarasının Hesaplanması için;

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200\beta^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200(0,194985)^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1$$

$Al_2O_3$  'un modifiye edilmiş Tsoufanidis eşitliği ile durdurma gücü ise ;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 0,307075 \frac{1}{21,83} 10,62540639 \left[ \ln \left( \frac{0,01}{1,4291500 \times 10^{-4}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{0,019569}{2} \right) + \frac{2 \ln 2 - \left( \frac{0,194985}{12} \right) \left( 23 + \left( \frac{14}{(0,019569 + 2)} + \frac{10}{(0,019569 + 2)^2} + \frac{4}{(0,019569 + 2)^3} \right) \right)}{2} \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 18,41739466 \left( \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}} \right)$$

bulunur.

**BeO için ;**

Pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis'in durdurma gücü eşitliği, [Gümüş, 2008; 2005]

T=0,01 MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

Bu eşitlikte modifiye atom numarası  $Z^*$ 'ın hesaplanması için gerekli eşitlikler aşağıda verilmiştir. Bu eşitliklerde a, b ve X parçacığın hızına ( $V_0$  ve V) bağlı sabitlerdir [Gümüş, 2008; 2005].

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x + b)}{(x + b)^3}$$

$$b = \left(\frac{8}{\pi}\right)^{2/3} = \left(\frac{8}{3,14}\right)^{2/3} = 1,8648$$

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{v_0^2}{v^2} Z^{4/3}$$

$$v_0 = 2,42 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$a = \frac{(1,8648)^2}{0,60647} \frac{(2,42 \times 10^6)^2}{(7,97067)^2} (6,665)^{4/3} = 0,1230916$$

$$x = -2 \left( \frac{b}{3} \right) + \frac{\left( \frac{b}{3} \right)^2}{\left[ \frac{a}{2} + \left( \frac{b}{3} \right)^3 + \sqrt{\left( \frac{a}{2} \right)^2 + a \left( \frac{b}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}} + \left[ \frac{a}{2} + \left( \frac{b}{3} \right)^3 + \sqrt{\left( \frac{a}{2} \right)^2 + a \left( \frac{b}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} + \left[ \frac{a}{2} + \left( \frac{b}{3} \right)^3 + \sqrt{\left( \frac{a}{2} \right)^2 + a \left( \frac{b}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$x = -2 \left( \frac{1,8648}{3} \right) + \frac{\left( \frac{1,8648}{3} \right)^2}{\left[ \frac{0,1230916}{2} + \left( \frac{1,8648}{3} \right)^3 + \sqrt{\left( \frac{0,1230916}{2} \right)^2 + 0,1230916 \left( \frac{1,8648}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}} + \left[ \frac{0,1230916}{2} + \left( \frac{1,8648}{3} \right)^3 + \sqrt{\left( \frac{0,1230916}{2} \right)^2 + 0,1230916 \left( \frac{1,8648}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$x=0,040628728 \quad (\text{Cabrera-Trujillo ve ark., 1997; Gümüş, 2005})$$

$$Z^* = 6,665 \times \frac{(1,8648)^2 (3(0,040628728) + 1,8648)}{(0,040628728 + 1,8648)^3} = 6,656293642$$

Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ )'ın hesaplaması için;

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Z c_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$\alpha = \frac{Z}{2Z^*} [x^2(x+3b)\ln x + x(x+b)b + x(\ln 6 - 2)3b^2 + b^3 \left(\ln 6 - \frac{10}{3}\right) + (3x+b)b^2 \ln \frac{b^2}{(x+b)^4} - (x+b)^3 \ln(x+b)] / (x+b)^3$$

Burada  $c_0=0.6064741718$  ' dir.

$$I = 10,46313462 \gamma Z \quad ; \quad [ \text{Andersen ve ark, 1977; ICRU 37, 1984} ]$$

$$\gamma = \frac{93,2 \times 10^{-6}}{10,46313462 \times 10,674} = 1,336453786 \times 10^{-6}$$

$$\alpha = \frac{6,665}{2(6,656293642)} [ (0,040628728)^2 (0,040628728 + 3(1,8648)) \ln(0,040628728) + 0,040628728(0,040628728 + 1,8648)1,8648 + 0,040628728(\ln 6 - 2)3(1,8648)^2 + (1,8648)^3 \left(\ln 6 - \frac{10}{3}\right) + (3(0,040628728) + 1,8648)1,8648^2 \ln \frac{(1,8648)^2}{(0,040628728 + 1,8648)^4} - (0,040628728 + 1,8648)^3 \ln(0,040628728 + 1,8648) ] / (0,040628728 + 1,8648)^3$$

$$\alpha = -1,710487099$$

$$\exp(\alpha) = 0,180777714$$

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Z c_0^{-\frac{3}{2}} \exp(\alpha) = 9,2736227 \times 10^{-5}$$

Gönderilen Parçacığın Modifiye Atom Numarasının Hesaplanması için;

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200\beta^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200(0,194985)^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1$$

BeO 'nun modifiye edilmiş Tsoulfanidis'in eşitliği ile durdurma gücü ise ;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 0,307075 \frac{1}{13,477} 6,656293642 \left[ \ln \left( \frac{0,01}{9,2736227 \times 10^{-5}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{0,019569}{2} \right) + \frac{2 \ln 2 - \left( \frac{0,194985}{12} \right) \left( 23 + \left( \frac{14}{(0,019569 + 2)} + \frac{10}{(0,019569 + 2)^2} + \frac{4}{(0,019569 + 2)^3} \right) \right)}{2} \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 20,390703 \quad \left( \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}} \right)$$

bulunur.

**B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için ;**

Pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis'in durdurma gücü eşitliği, [Gümüş, 2008; 2005]

T=0,01 MeV enerjili pozitronlar için

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1,019569$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,194985$$

$$\tau = \frac{T}{mc^2} = \frac{0,01}{0,511} = 0,019569$$

Bu eşitlikte modifiye atom numarası  $Z^*$ 'ın hesaplanması için gerekli eşitlikler aşağıda verilmiştir. Bu eşitliklerde a, b ve X parçacığın hızına ( $V_0$  ve V) bağlı sabitlerdir [Gümüş, 2008; 2005].

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x + b)}{(x + b)^3}$$

$$b = \left(\frac{8}{\pi}\right)^{2/3} = \left(\frac{8}{3,14}\right)^{2/3} = 1,8648$$

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{v_0^2}{v^2} Z^{4/3}$$

$$v_0 = 2,42 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$a = \frac{(1,8648)^2}{0,60647} \frac{(2,42 \times 10^6)^2}{(7,97067)^2} (7,13)^{4/3} = 0,1346731$$

$$x = -2 \left(\frac{b}{3}\right) + \frac{\left(\frac{b}{3}\right)^2}{\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}} + \left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a \left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$x = -2 \left(\frac{1,8648}{3}\right) +$$

$$\frac{\left(\frac{1,8648}{3}\right)^2}{\left[\frac{0,1346731}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,1346731}{2}\right)^2 + 0,1346731 \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}} + \left[\frac{0,1346731}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,1346731}{2}\right)^2 + 0,1346731 \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}}$$

$$x=0,043979663 \quad (\text{Cabrera-Trujillo ve ark., 1997; Gümüş, 2005})$$

$$Z^* = 7,13 \times \frac{(1,8648)^2(3(0,040628728) + 1,8648)}{(0,040628728 + 1,8648)^3} = 7,118618764$$

Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ )'ın hesaplaması için;

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Z c_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$\alpha = \frac{Z}{2Z^*} [x^2(x + 3b)\ln x + x(x + b)b + x(\ln 6 - 2)3b^2 + b^3 \left(\ln 6 - \frac{10}{3}\right) + (3x + b)b^2 \ln \frac{b^2}{(x + b)^4} - (x + b)^3 \ln(x + b)] / (x + b)^3$$

Burada  $c_0=0.6064741718$  ' dir.

$$I = 10,46313462 \gamma Z \quad ; \quad [\text{Andersen ve ark, 1977; ICRU 37, 1984}]$$

$$\gamma = \frac{99,6 \times 10^{-6}}{10,46313462 \times 7,13} = 1,33508 \times 10^{-6}$$

$$\alpha = \frac{7,13}{2(7,11861874)} [ (0,043979663)^2 (0,043979663 + 3(1,8648)) \ln(0,043979663) + 0,043979663(0,043979663 + 1,8648)1,8648 + 0,043979663(\ln 6 - 2)3(1,8648)^2 + (1,8648)^3 \left( \ln 6 - \frac{10}{3} \right) (3(0,043979663) + 1,8648)1,8648^2 \ln \frac{(1,8648)^2}{(0,043979663 + 1,8648)^4} (0,043979663 + 1,8648)^3 \ln(0,043979663 + 1,8648)] / (0,043979663 + 1,8648)^3$$

$$\alpha = -1,711411404$$

$$\exp(\alpha) = 0,1806166$$

$$I^* = 2 \times 13,6 \gamma Zc_0^{-\frac{3}{2}} \exp(\alpha) = 9,90128 \times 10^{-5}$$

Gönderilen Parçacığın Modifiye Atom Numarasının Hesaplanması için;

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200\beta^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1 - \exp(-2200(0,194985)^{1,78})$$

$$z^{*2} = 1$$

B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 'un modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitliği ile durdurma gücü ise ;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 0,307075 \frac{1}{21,83} 10,62540639 \left[ \ln \left( \frac{0,01}{9,90128 \times 10^{-5}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{0,019569}{2} \right) + \frac{2 \ln 2 - \left( \frac{0,194985}{12} \right) \left( 23 + \left( \frac{14}{(0,019569 + 2)} + \frac{10}{(0,019569 + 2)^2} + \frac{4}{(0,019569 + 2)^3} \right) \right)}{2} \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 20,07857308 \left( \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}} \right)$$

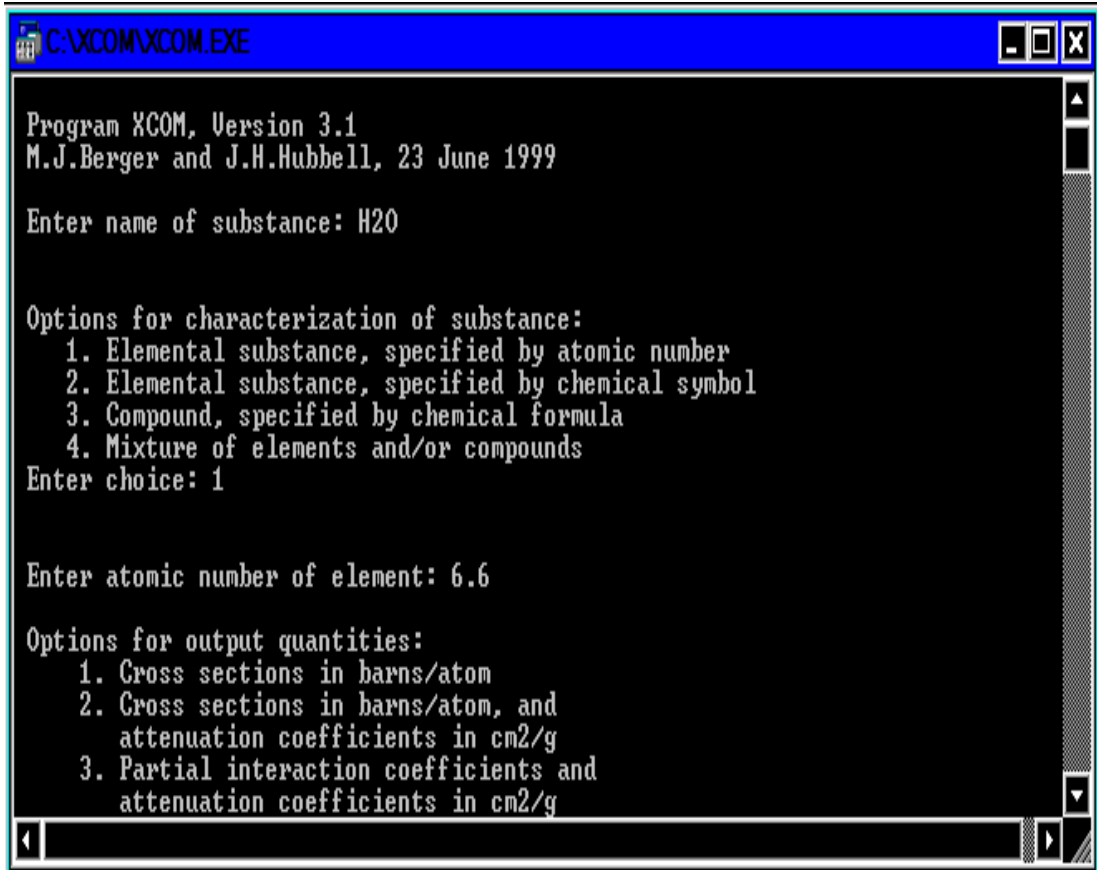
bulunur.

### 3.4. Kütle Azalma Katsayıları

Kütle azalma katsayılarını hesaplamak için XCOM [Berger ve Hubbell, 1999] programı kullanılmıştır.

XCOM hem standart enerjide hem de kullanıma bağlı olarak istenilen enerjide, azalma katsayılarını verir. Ayrıca fotoelektrik, koherent ile inkoherent saçılma ve çift oluşum gibi kısmi tesir kesitleri ve kısmi kütle azalma katsayılarının hesaplamalarını da içerir.

Çizelge 3.1. Hesaplamalarda kullanılan XCOM programı'nın bilgisayar ekranındaki görüntüsü



```
C:\XCOM\XCOM.EXE

Program XCOM, Version 3.1
M.J.Berger and J.H.Hubbell, 23 June 1999

Enter name of substance: H2O

Options for characterization of substance:
  1. Elemental substance, specified by atomic number
  2. Elemental substance, specified by chemical symbol
  3. Compound, specified by chemical formula
  4. Mixture of elements and/or compounds
Enter choice: 1

Enter atomic number of element: 6.6

Options for output quantities:
  1. Cross sections in barns/atom
  2. Cross sections in barns/atom, and
    attenuation coefficients in cm2/g
  3. Partial interaction coefficients and
    attenuation coefficients in cm2/g
```

## 4. SONUÇLAR

### 4.1. Kullanılan Materyallerin İçerikleri ve Özellikleri

Bu çalışmada hedef olarak kullanılan materyaller  $H_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BeO$  ve  $B_2O_3$  'dır. Bu materyallerin içerikleri, özellikleri ve nükleer durdurma gücü verileri hesaplanmıştır. Yoğunluk ve İyonizasyon potansiyeli değerleri NIST [Berger and Seltzer., 1982] programından alınmıştır.

Çizelge 4.1'de ortalama kütle numarası ( $A_{ort}$ ), etkin atom numarası ( $Z_{eff}$ ), yoğunluk ( $\rho$ ) ve İyonizasyon potansiyeli ( $I$ ) değerleri verilmiştir. Çizelge 4.2. hedef olarak kullanılan suyun içerik ve özellikleri, Çizelge 4.3  $Al_2O_3$  'un içerik ve özellikleri, Çizelge 4.4  $BeO$  nun içerik ve özellikleri ve Çizelge 4.5  $B_2O_3$  un içerik ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hedef olarak kullanılan materyaller için ortalama atom kütlesi ( $A_{ort}$ ), etkin atom numarası ( $Z_{eff}$ ), yoğunluk ( $\rho$ ) ve iyonizasyon potansiyeli ( $I$ ) değerleri

| Hedef     | $A_{ort}$ | $Z_{eff}$ | $\rho(g/cm^3)$ | $\langle I \rangle$ |
|-----------|-----------|-----------|----------------|---------------------|
| $H_2O$    | 14.321    | 6.6       | 1.0            | 75.0                |
| $Al_2O_3$ | 21.83     | 10.674    | 3.97           | 145.2               |
| $BeO$     | 13.477    | 6.665     | 3.01           | 93.2                |
| $B_2O_3$  | 14.45     | 7.13      | 1.812          | 99.6                |

Çalışmada Tsoulfanidis eşitliği [Tsoulfanidis, 1995] ve bu eşitlikteki bazı parametreleri modifiye edilerek 10 eV ile 10 keV enerji aralığında hedef materyaller olan  $H_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BeO$  ve  $B_2O_3$  için nükleer durdurma gücü hesabı yapılmıştır.

Tsoulfanidis(1995) 'in durdurma gücü eşitliğindeki A, Z, I, z parametreleri modifiye edilmiştir ve yukarıdaki bahsedilen hedef materyaller ve enerji aralığı için nükleer durdurma gücü hesaplanmıştır [Gümüş, 2008 ; Rohlich, 1954].

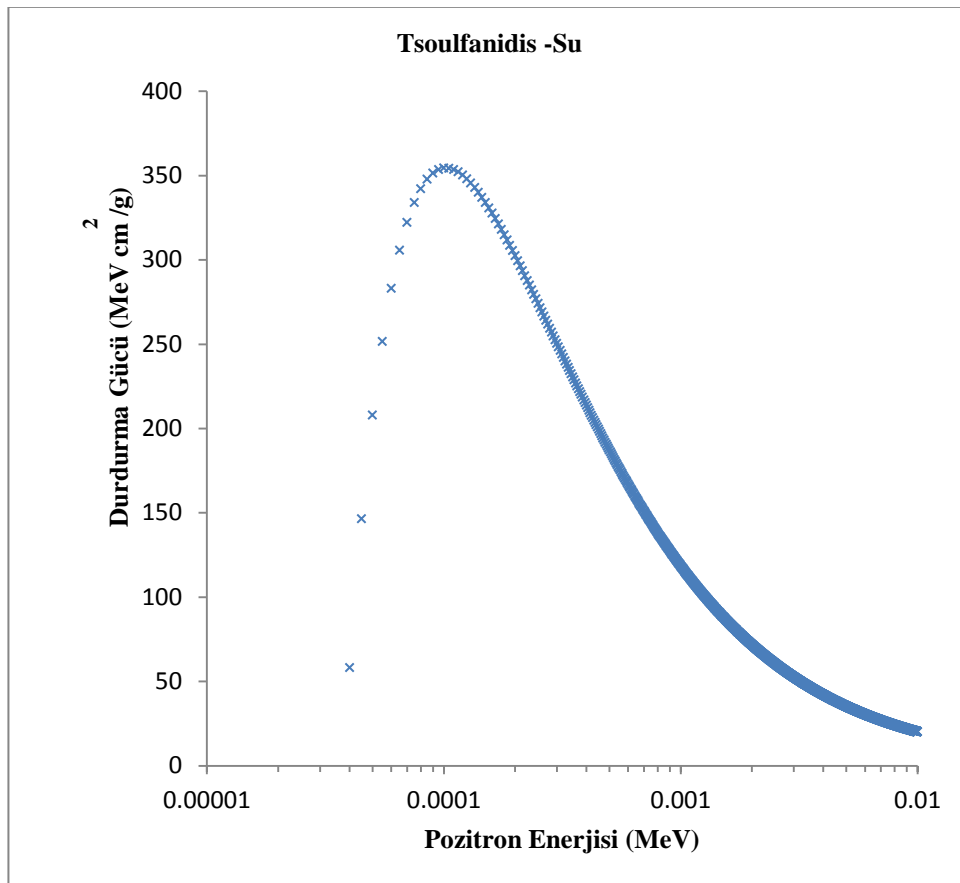
10 eV ile 10 keV Enerji aralığında hedef materyaller olan  $H_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BeO$  ve  $B_2O_3$  için Tsoulfanidis (1995) eşitliği ve Modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitliğinden [Gümüş, 2008; Rohlich, 1954] elde edilen sonuçların enerjiye bağlı değişim grafikler çizilmiş ve kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada farklı materyaller (Su,  $Al_2O_3$ ,  $BeO$ ,  $B_2O_3$ ) kullanılarak çeşitli enerjilerde, kütle azalma katsayıları Berger ve Hubbell tarafından (1999) geliştirilen XCOM bilgisayar programı ile hesaplanmış ve grafikleri çizilmiştir. Kütle azalma katsayıları kullanarak pozitronlar ve x-ışınları için maksimum enerji değerlerinde doz hesabı yapılmış ve kıyaslanmıştır. Hesaplamalar (10 eV-10keV) enerji aralığında yapılmıştır.

Durdurma gücü ortamda birim uzunluk başına enerji kaybıdır. Doz ise ortamın kg'ı başına depo edilen enerjidir. Yani bu iki nicelik doğrudan ilişkilidir. Soğurucunun belli bölgesinde depo edilen enerjiyi yani dozu hesaplamak istiyorsak o bölge boyunca birim uzunluk başına bırakılan enerjilerin belirlenmesi gerekir.

Çizelge 4.2.Hedef olarak kullanılan suyun içerik ve özellikleri

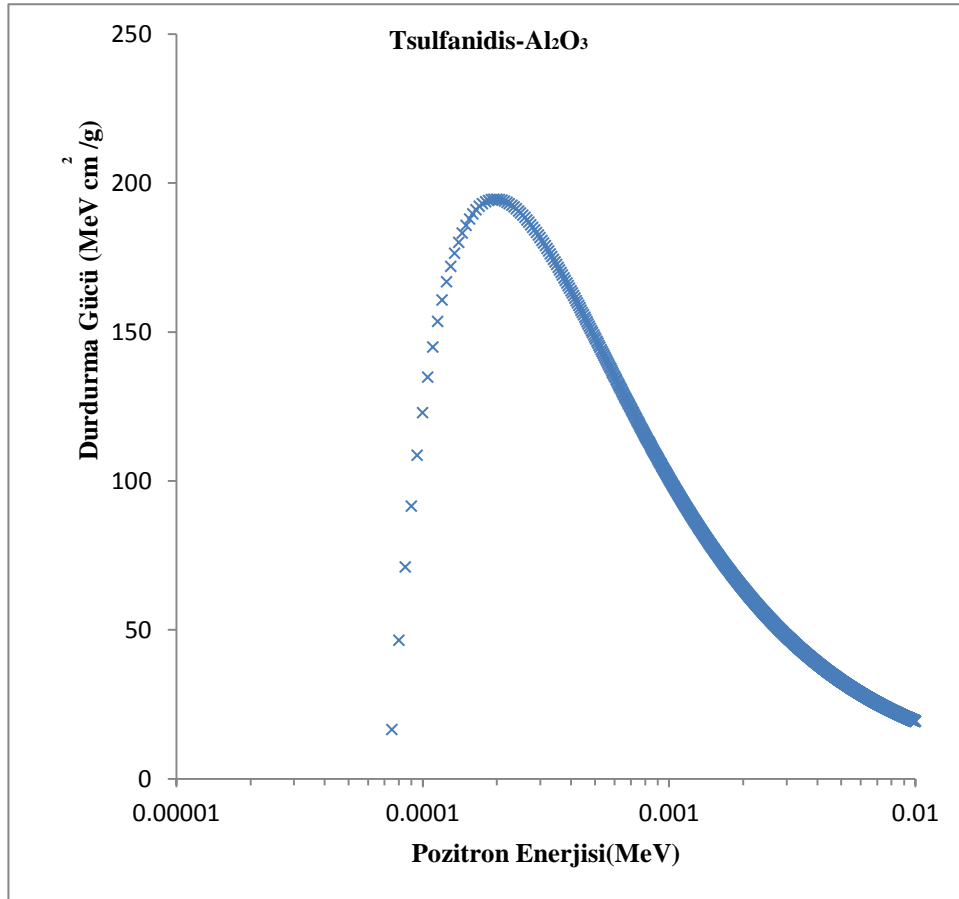
|                          |                     |          |
|--------------------------|---------------------|----------|
| Yoğunluk ( $g/cm^3$ )    | 1.00000E+00         |          |
| Ortalama Uyarma Enerjisi | 75.000000 eV        |          |
| Bileşimi                 |                     |          |
| Atom Numarası            | Yüzde Ağırlık Oranı |          |
| H                        | 1                   | 0.111894 |
| O                        | 8                   | 0.888106 |



Şekil 4.1. Su için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi. Maksimum durdurma gücü 354,389747 MeVcm<sup>2</sup>/g dir.

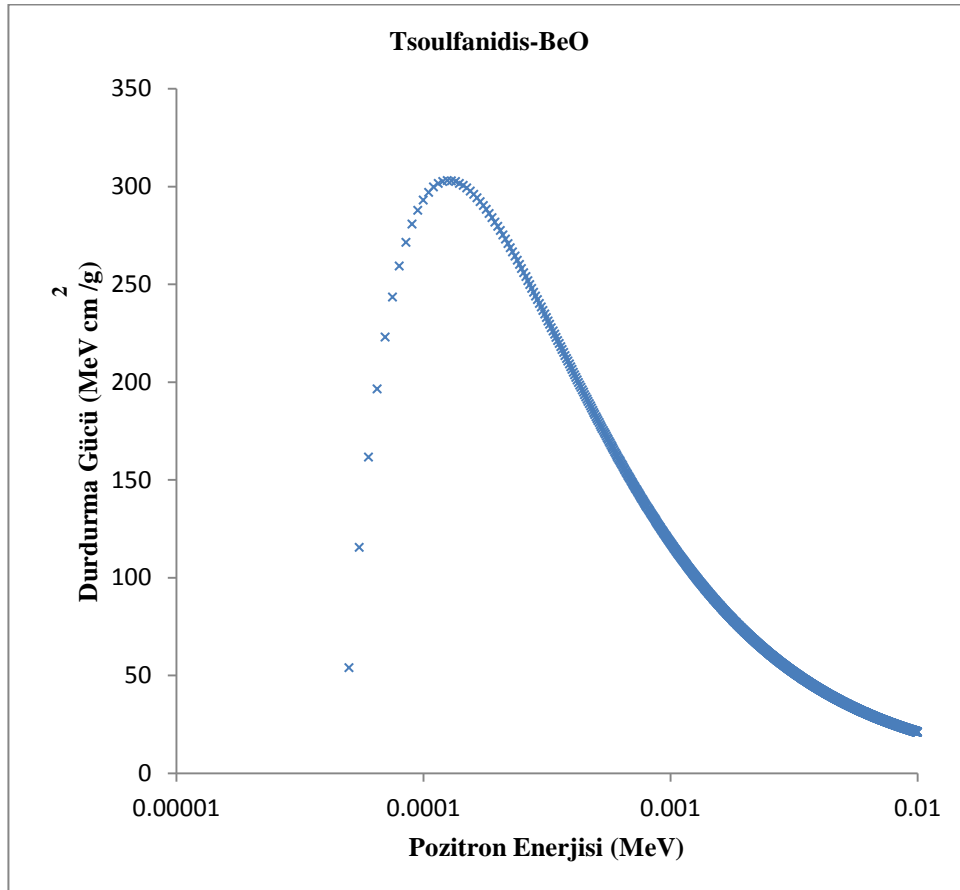
Çizelge 4.3. Hedef olarak kullanılan  $Al_2O_3$  nin içerik ve özellikleri

|                          |                     |          |
|--------------------------|---------------------|----------|
| Yoğunluk ( $g/cm^3$ )    | 3.97000E+00         |          |
| Ortalama Uyarma Enerjisi | 145.200000 eV       |          |
| Bileşimi                 |                     |          |
| Atom Numarası            | Yüzde Ağırlık Oranı |          |
| Al                       | 13                  | 0.529251 |
| O                        | 8                   | 0.470749 |

Şekil 4.2.  $Al_2O_3$  için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi. Maksimum durdurma gücü 192,92631  $MeVcm^2/g$  dir.

Çizelge 4.4. Hedef olarak kullanılan BeO nin içerik ve özellikleri

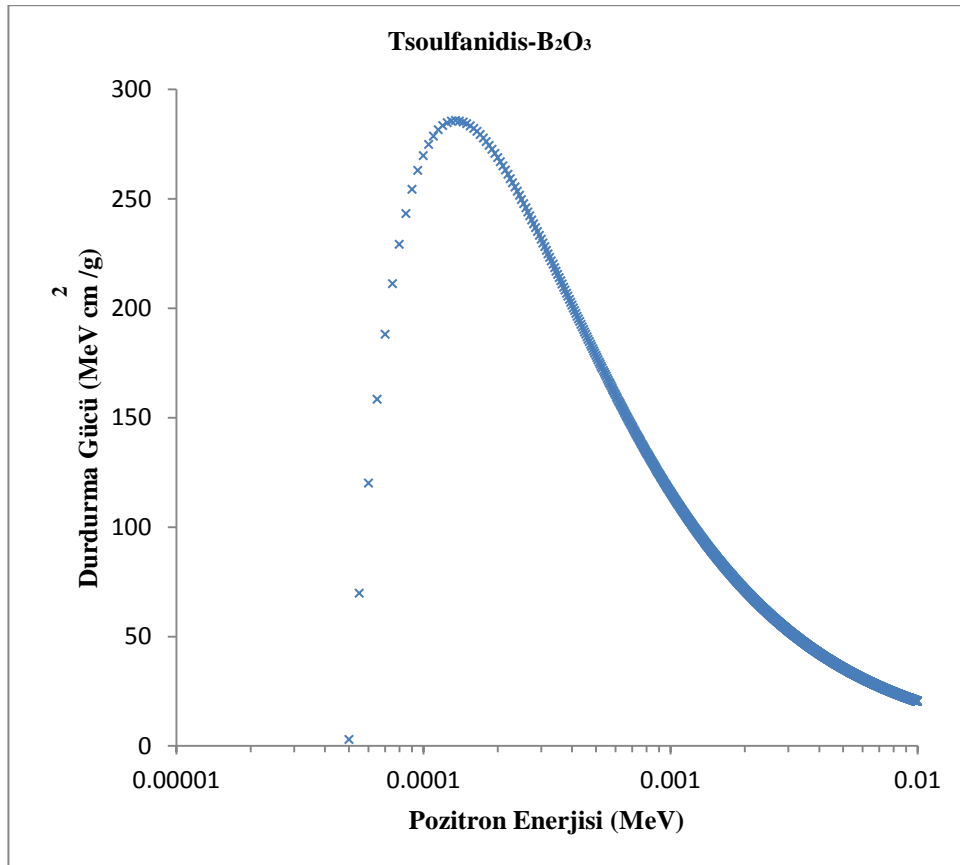
|                          |                     |          |
|--------------------------|---------------------|----------|
| Yoğunluk ( $g/cm^3$ )    | 3.01000E+00         |          |
| Ortalama Uyarma Enerjisi | 93.200000 eV        |          |
| Bileşimi                 |                     |          |
| Atom Numarası            | Yüzde Ağırlık Oranı |          |
| Be                       | 4                   | 0.360320 |
| O                        | 8                   | 0.639680 |



Şekil 4.3. BeO için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi. Maksimum durdurma gücü 306,0569348  $MeVcm^2/g$  dir.

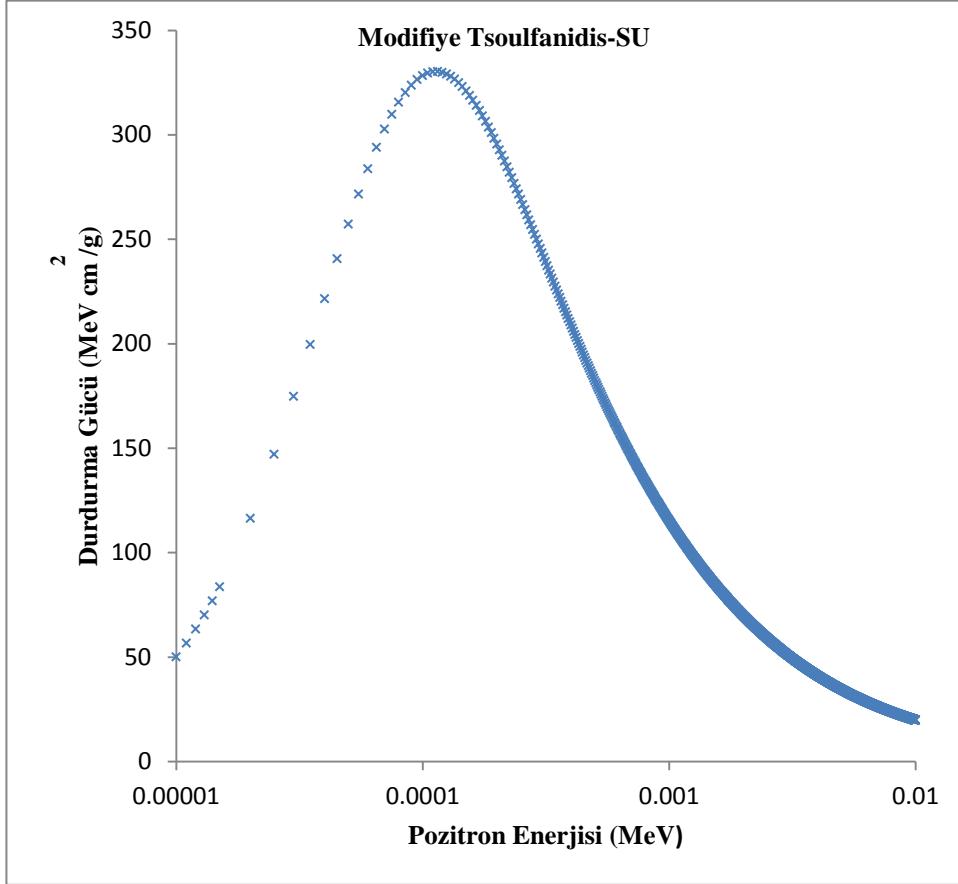
Çizelge 4.5. Hedef olarak kullanılan  $B_2O_3$  nin içerik ve özellikleri

|                          |   |                     |
|--------------------------|---|---------------------|
| Yoğunluk ( $g/cm^3$ )    |   | 1.81200E+00         |
| Ortalama Uyarma Enerjisi |   | 99.600000 eV        |
| Bileşimi                 |   |                     |
| Atom Numarası            |   | Yüzde Ağırlık Oranı |
| B                        | 5 | 0.310551            |
| O                        | 8 | 0.689449            |



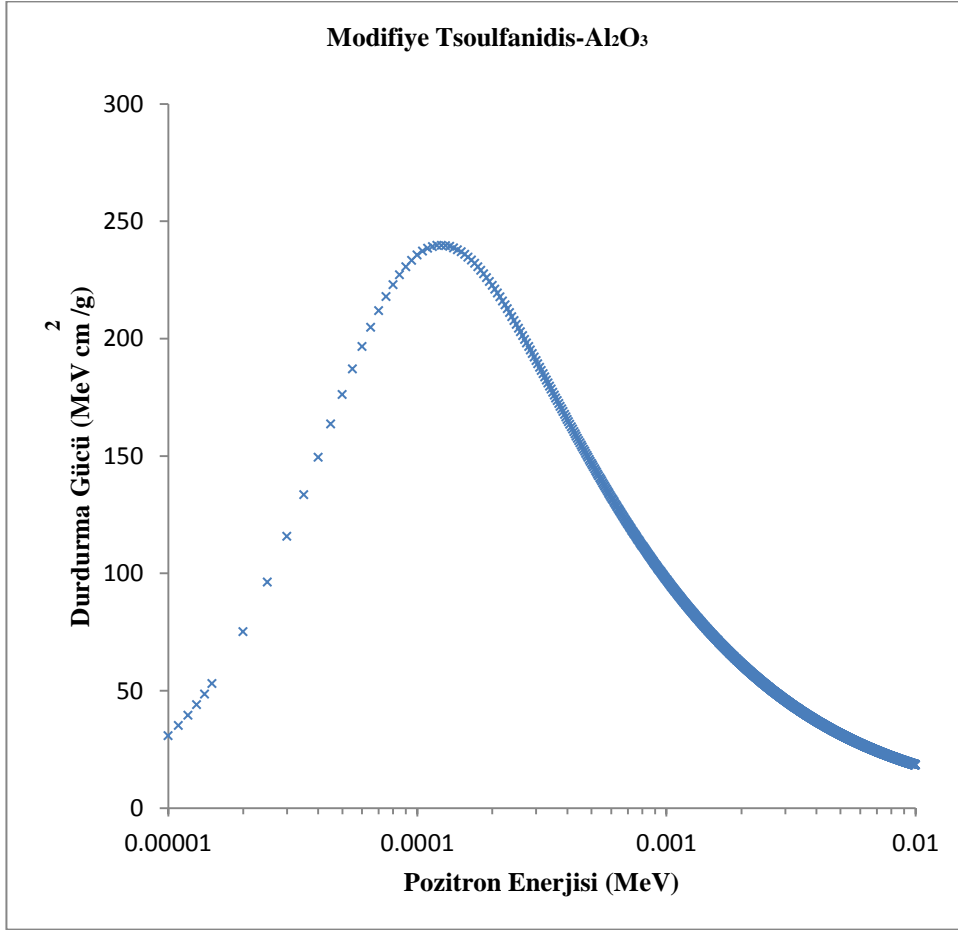
Şekil 4.4.  $B_2O_3$  için durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında pozitron enerjisine bağlı değişimi. Maksimum durdurma gücü 285,7057718  $MeVcm^2/g$  dir.

Hedef olarak kullanılan suyun pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis durdurma Gücü ;



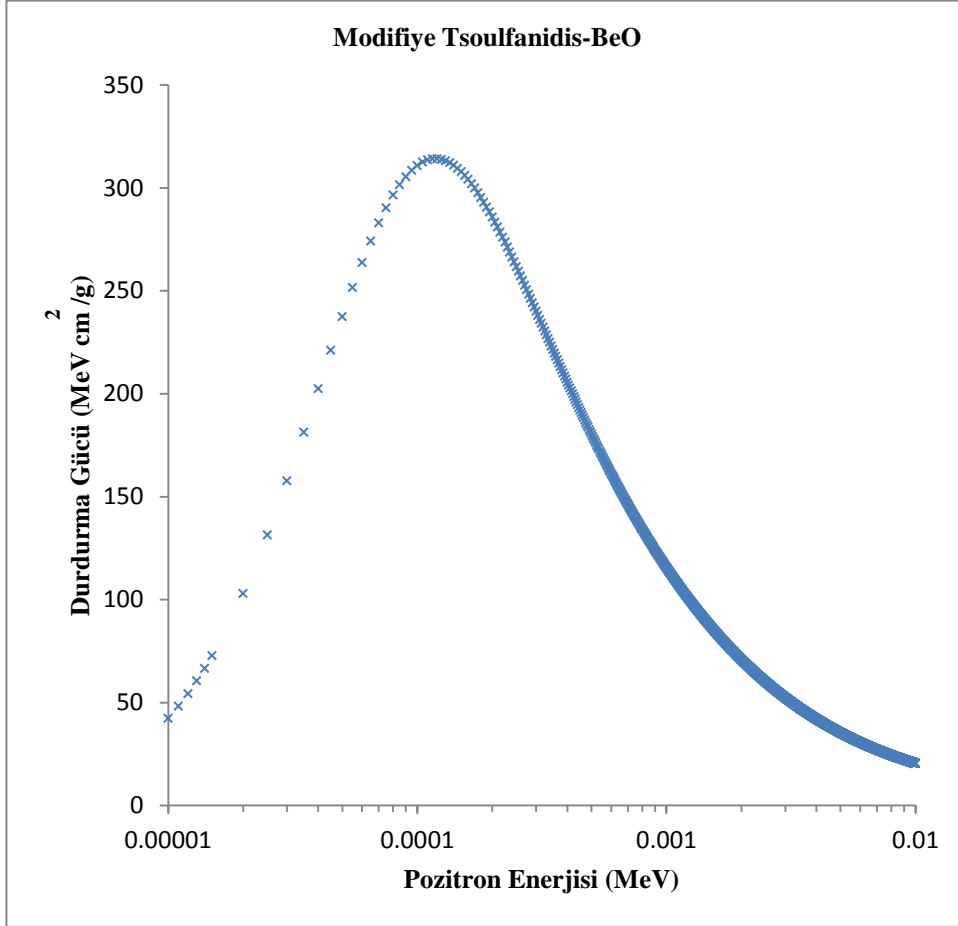
Şekil 4.5. Su için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi. Maksimum durdurma gücü 330,175377 MeVcm<sup>2</sup>/g dir.

Hedef olarak kullanılan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  un pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis durdurma Gücü ;



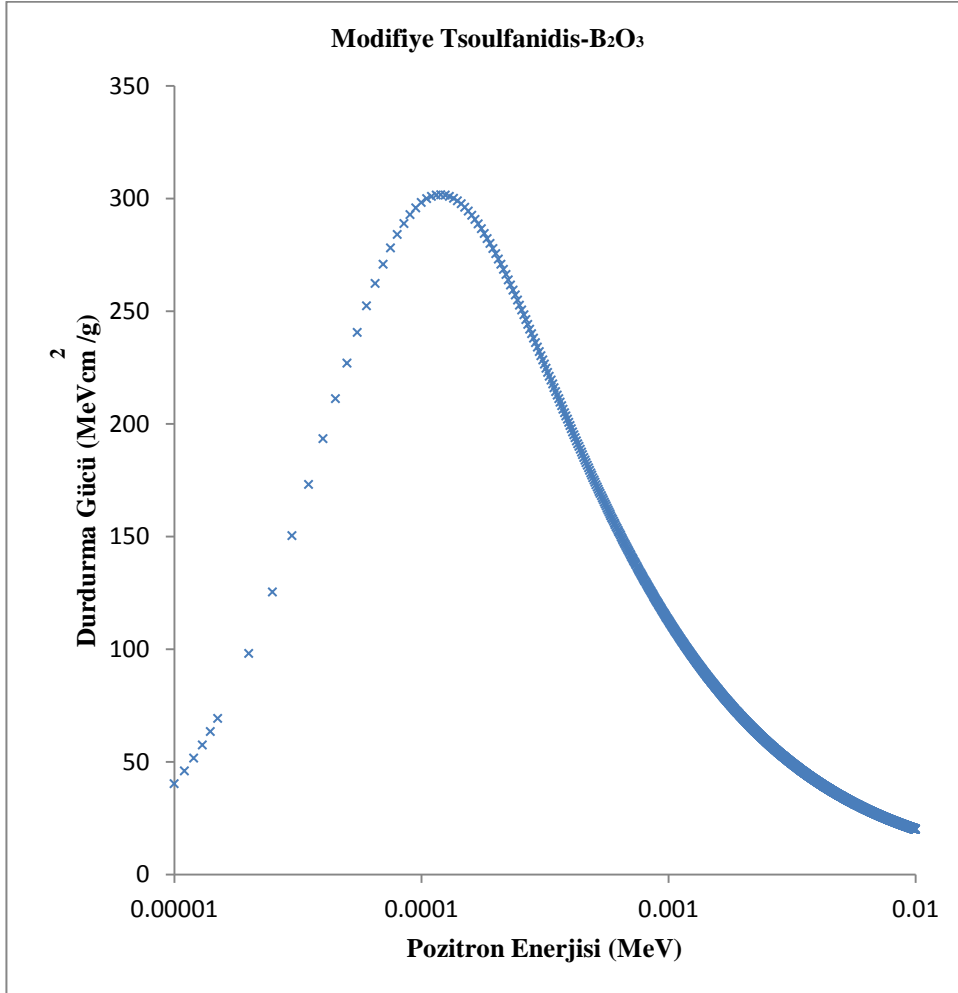
Şekil 4.6.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi. Maksimum durdurma gücü  $239,8238 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$  dir.

Hedef olarak kullanılan BeO nun pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis durdurma Gücü;



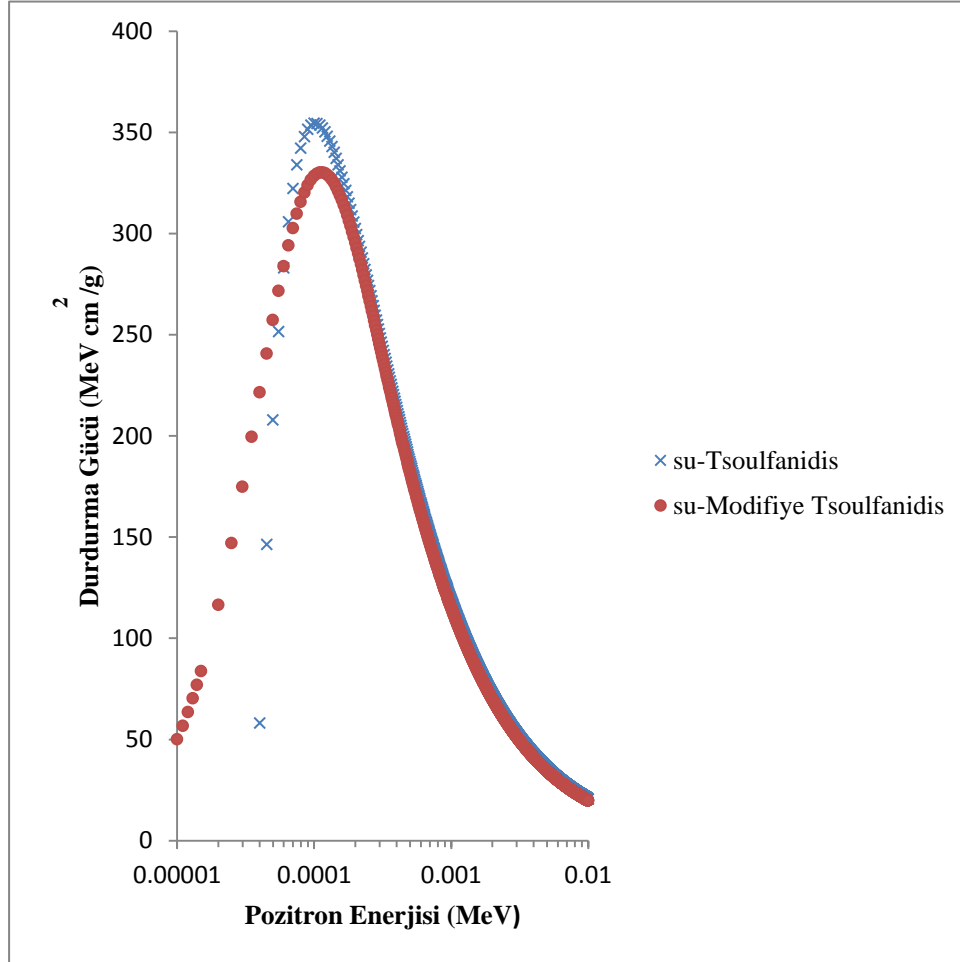
Şekil 4.7. BeO için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi. Maksimum durdurma gücü 314,0275374 MeVcm<sup>2</sup>/g dir.

Hedef olarak kullanılan  $B_2O_3$  un pozitronlar için modifiye edilmiş Z, z, I değerlerini kullanarak Tsoulfanidis durdurma Gücü;



Şekil 4.8.  $B_2O_3$  için durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi. Maksimum durdurma gücü 301,7246402  $MeVcm^2/g$  dir.

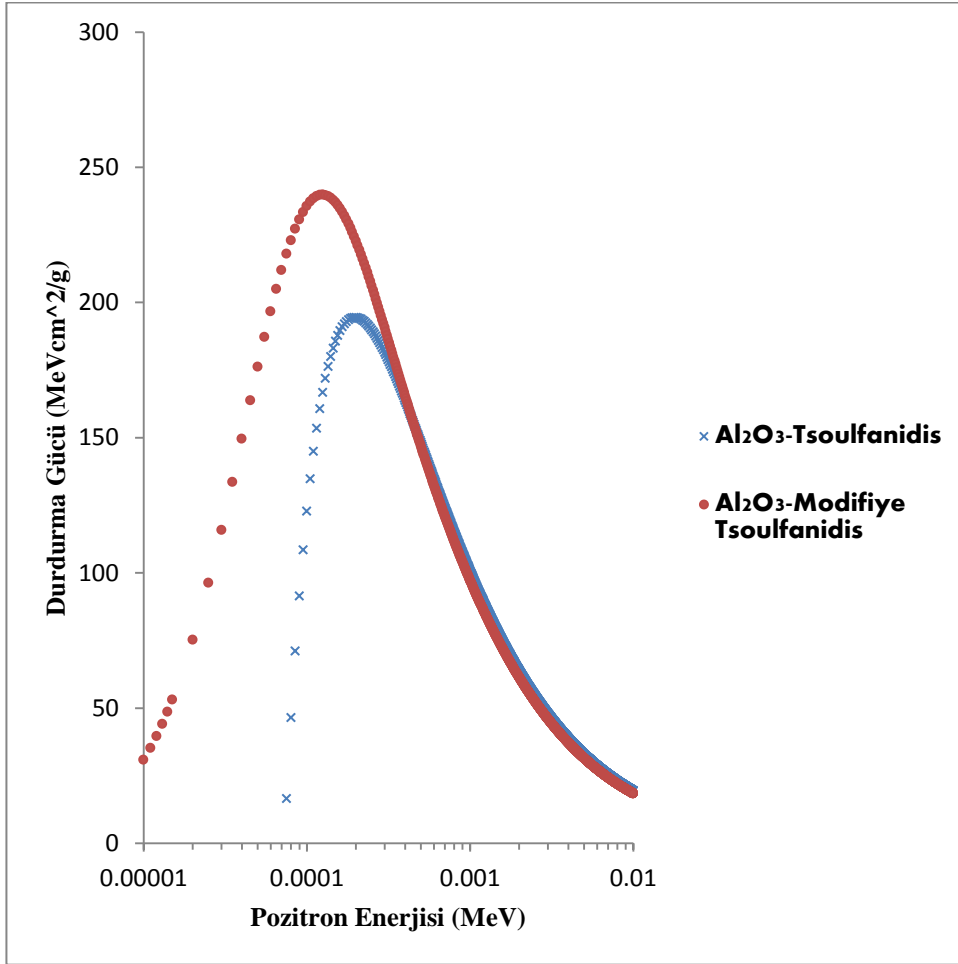
#### 4.2. Tsoulfanidis ve Modifiye Edilmiş Eşitliğin Kıyaslamaları



Şekil 4.9. Su için Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis durdurma gücünün pozitron enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.

Etkin atom numarası ( $Z_{ef}$ ) ve Ortalama uyarma enerjisi ( $I$ )'den Modifiye Atom numarası ( $Z^*$ ) ve Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ ) arasındaki fark şekilde Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis durdurma gücünün arasındaki farkı verir.

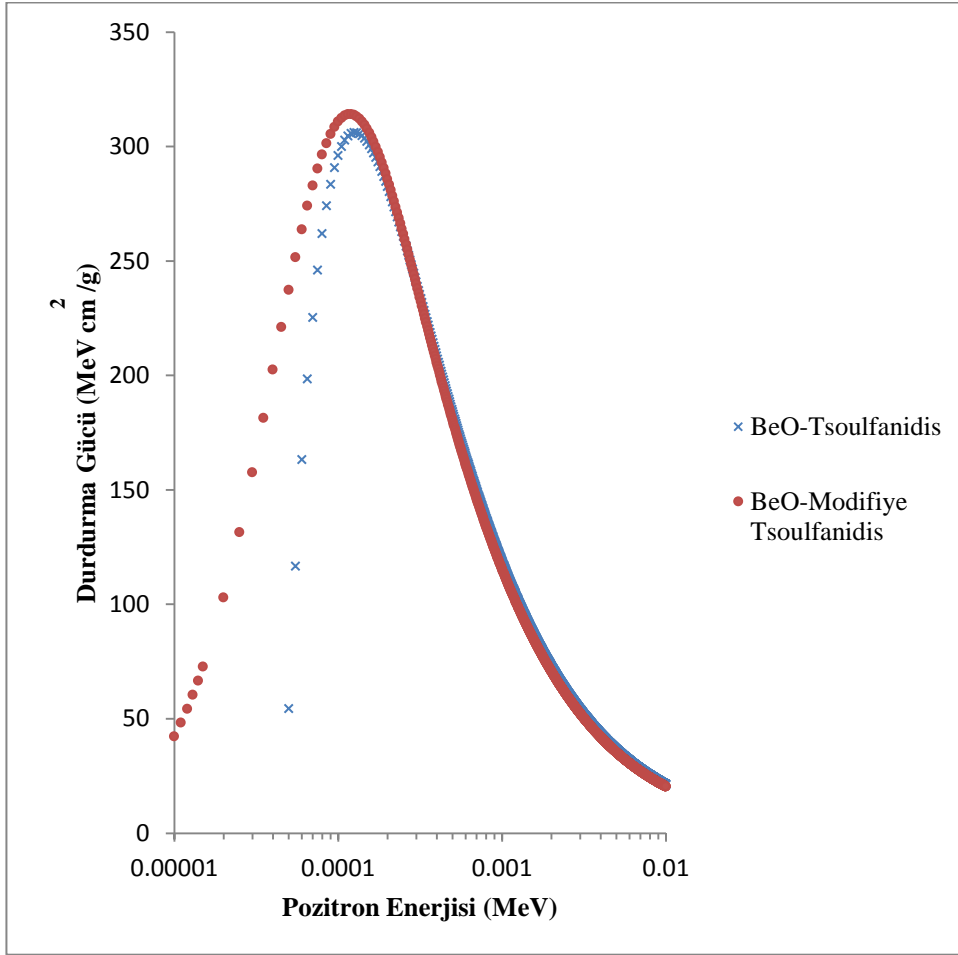
Suyun Tsoulfanidis'in maksimum durdurma gücü 0,0001 MeV de 354,3897 ( $MeV.cm^2/g$ ) ve modifiye değerler kullanarak durdurma gücü 0,000115 MeV de 330,175377 ( $MeV.cm^2/g$ ) olur. Aralarında % 6,83268 fark görülmektedir.



Şekil 4.10. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.

Etkin atom numarası ( $Z_{ef}$ ) ve Ortalama uyarma enerjisi ( $I$ ) 'nen Modifiye Atom numarası ( $Z^*$ ) ve Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ ) arasındaki fark şekilde Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis durdurma gücünün arasındaki farkı verir.

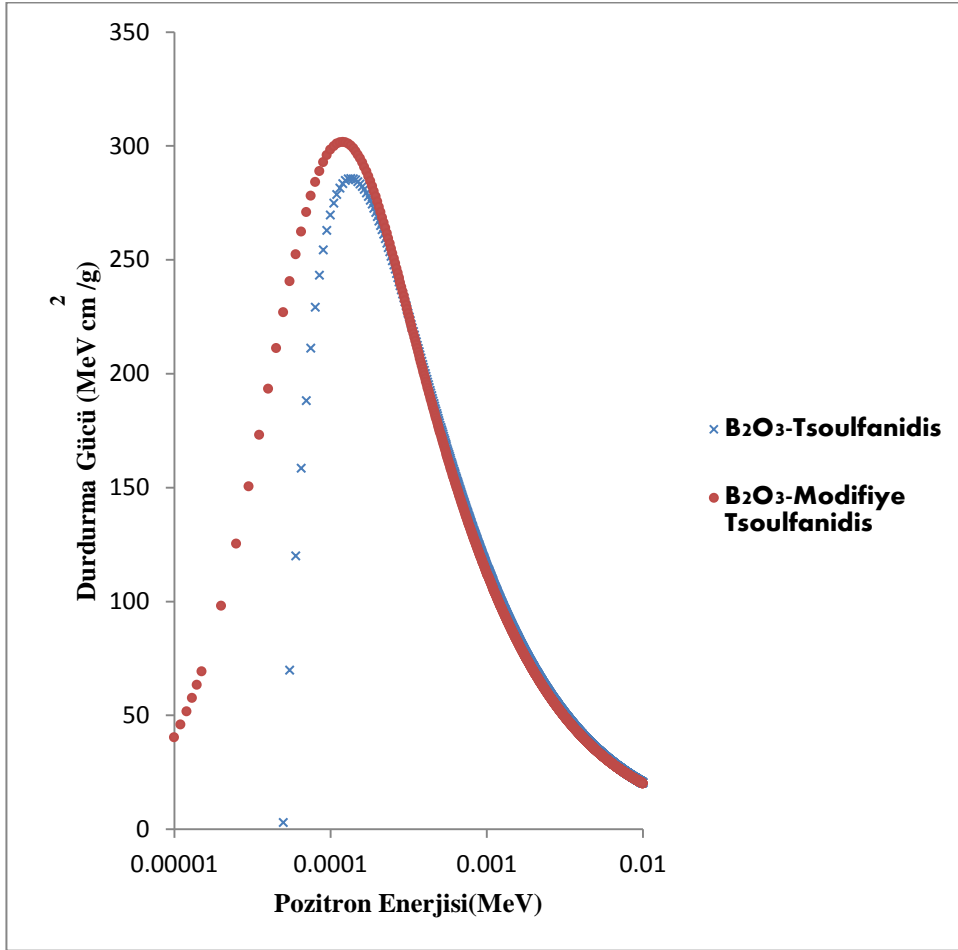
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tsoulfanidis'in maksimum durdurma gücü 0,000195 MeV de 194,4473 ( $MeV.cm^2/g$ ) ve modifiye değerler kullanarak durdurma gücü 0,000125 MeV de 239,8238 ( $MeV.cm^2/g$ ) olur. Aralarında % 18,9207 fark görülmektedir.



Şekil 4.11. BeO için Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.

Etkin atom numarası ( $Z_{ef}$ ) ve Ortalama uyarma enerjisi ( $I$ ) 'nen Modifiye Atom numarası ( $Z^*$ ) ve Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ ) arasındaki fark şekilde Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis durdurma gücünün arasındaki farkı verir.

BeO Tsoulfanidis'in maksimum durdurma gücü 0,000125 MeV de 306,0569 ( $MeV.cm^2/g$ ) ve modifiye değerler kullanarak durdurma gücü 0,000115 MeV de 314,02753 ( $MeV.cm^2/g$ ) olur. Aralarında % 2,5381 fark görülmektedir.

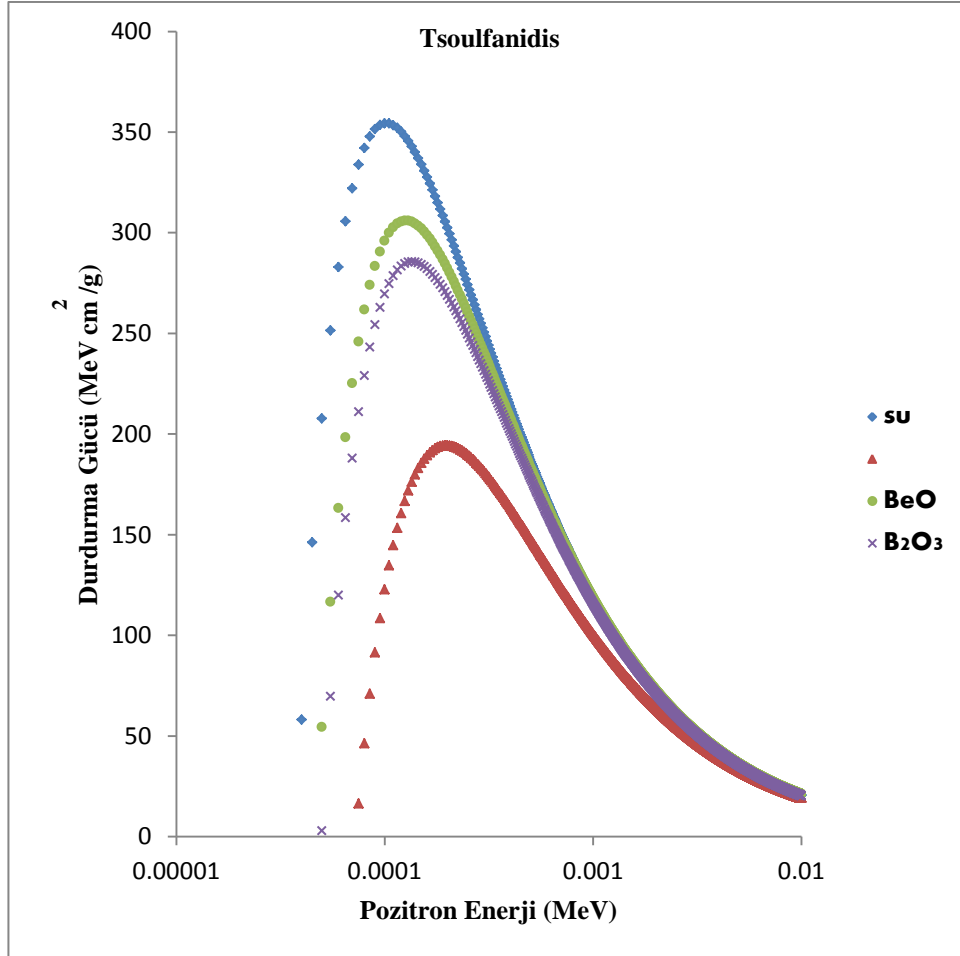


Şekil 4.12. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimi.

Etkin atom numarası ( $Z_{ef}$ ) ve Ortalama uyarma enerjisi (I) 'nen Modifiye Atom numarası ( $Z^*$ ) ve Modifiye uyarma enerjisi ( $I^*$ ) arasındaki fark şekilde Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanidis durdurma gücünün arasındaki farkı verir.

B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tsoulfanidis'in maksimum durdurma gücü 0,000135 MeV de 285,7058 ( $MeV.cm^2/g$ ) ve modifiye değerler kullanarak durdurma gücü 0,000125 MeV de 301,7246 ( $MeV.cm^2/g$ ) olur. Aralarında % 2,6042 fark görülmektedir.

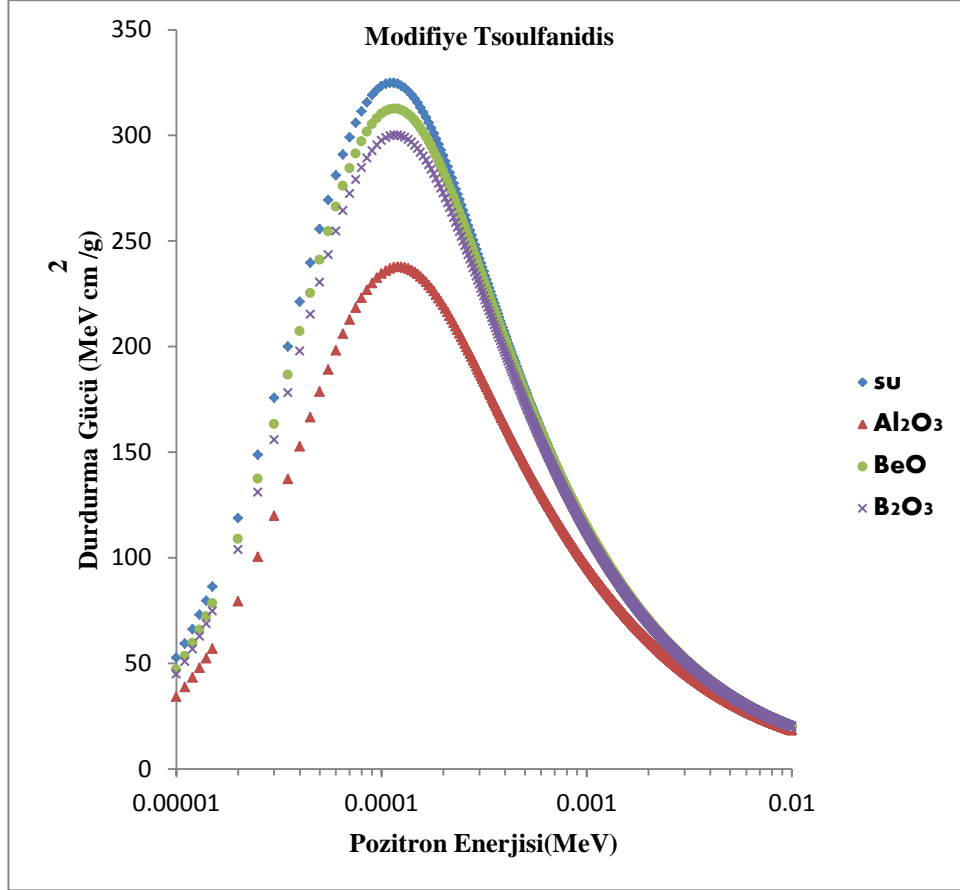
Hedef olarak Su,  $Al_2O_3$  , BeO ve  $B_2O_3$  için Tsoulfanidis eşitlikten durdurma gücü



Şekil 4.13. Su,  $Al_2O_3$  , BeO ve  $B_2O_3$  için Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimleri.

Şekil 4.13'te su en yüksek maksimum durdurma gücüne sahiptir. Grafiklerde, her hedef için 10 eV-1 keV enerji aralığında durdurma gücünde sapmalar gözlenir ama 1keV-10 keV enerji aralığında uyumun daha iyi olduğu gözlenmektedir.

Hedef olarak Su,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,  $\text{BeO}$  ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  için modifiye Tsoulfanidis eşitlikten, durdurma gücü;



Şekil 4.14. Su,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,  $\text{BeO}$  ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  için Modifiye edilmiş Tsoulfanidis pozitron enerjisine bağlı durdurma gücünün 10eV-10keV enerji aralığında değişimleri.

Şekil 4.14'te su en yüksek maksimum durdurma gücüne sahiptir. Grafiklerde, her hedef için 10 eV-1 keV enerji aralığında durdurma gücünde sapmalar gözlenirler ama 1 keV- 10 keV enerji aralığında uyumun daha iyi olduğu gözlenmektedir.

### Tsoulfanidis eşitliğinin maksimum durdurma gücü değerleri

Çizelge 4.6. Hedef olarak Su, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO ve B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için Tsoulfanidis eşitliğinin 10eV-10keV enerji aralığında pozitron enerjisine bağlı maksimum durdurma Gücü

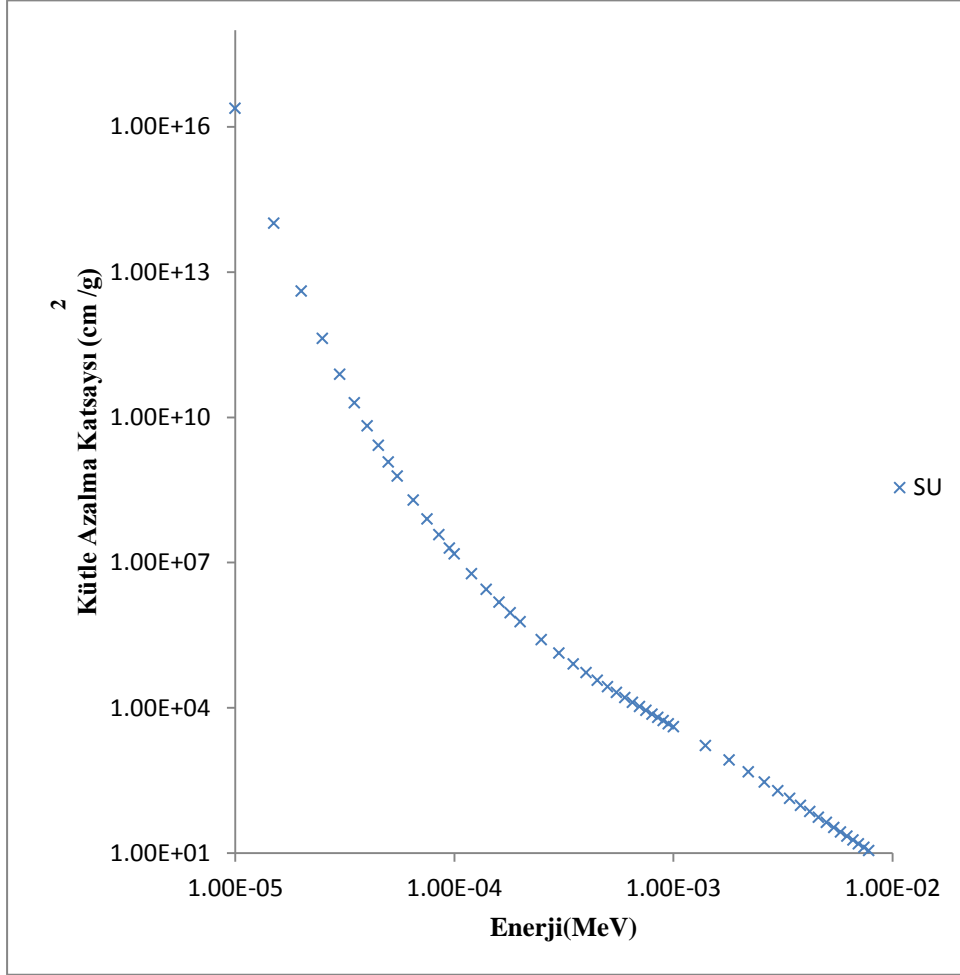
|                                    | Durdurma Gücünün maksimum olduğu pozitron enerjisi (MeV) | Durdurma Gücünün maksimum değeri (MeV.cm <sup>2</sup> /g) |
|------------------------------------|--|---|
| <b>Su</b>                          | $1 \times 10^{-4}$                                       | 354.3897  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | $1.95 \times 10^{-4}$                                    | 194.4473  |
| <b>BeO</b>                         | $1.25 \times 10^{-4}$                                    | 306.0569  |
| <b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>  | $1.35 \times 10^{-4}$                                    | 285.7058  |

### Modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitliğinin maksimum durdurma gücü Değerleri

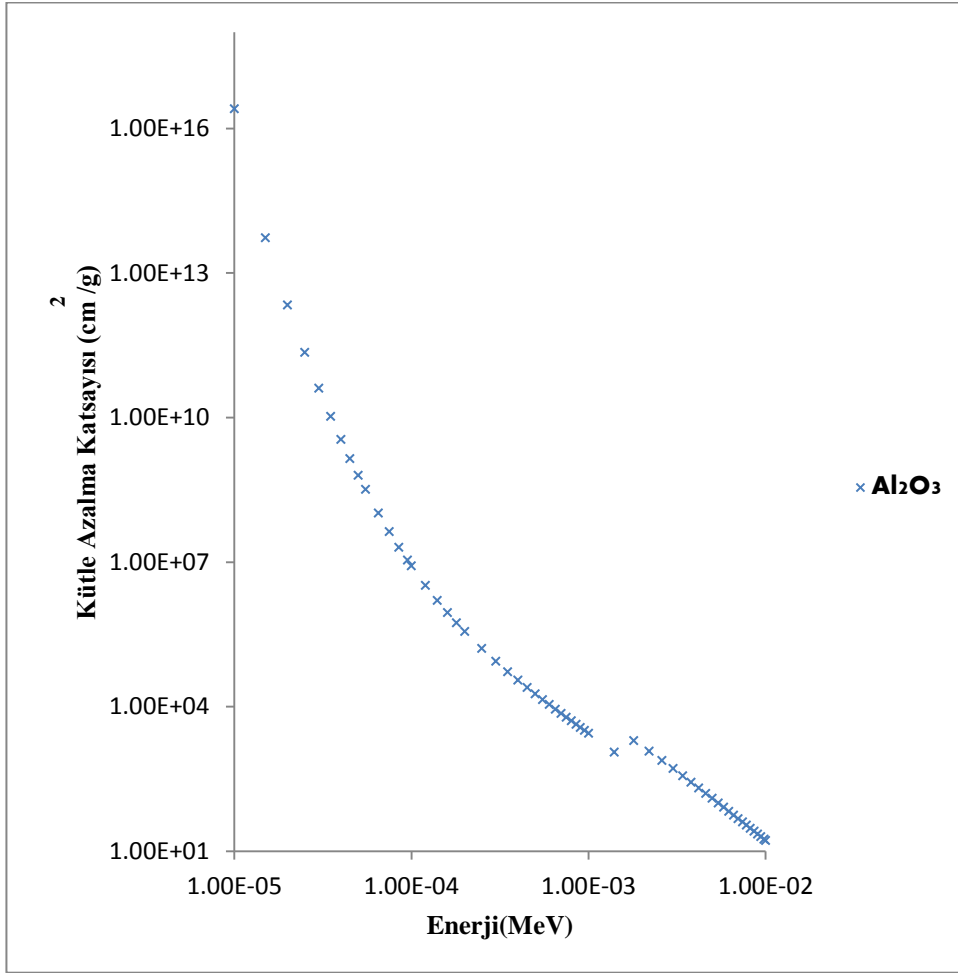
Çizelge 4.7. Hedef olarak Su, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO ve B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için Modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitliğinin 10eV-10keV enerji aralığında pozitron enerjisine bağlı maksimum durdurma Gücü

|                                    | Durdurma Gücünün maksimum olduğu pozitron enerjisi (MeV) | Durdurma Gücünün maksimum değeri (MeV.cm <sup>2</sup> /g) |
|------------------------------------|--|---|
| <b>Su</b>                          | $1.10 \times 10^{-4}$                                    | 324.8190  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | $1.20 \times 10^{-4}$                                    | 237.7613  |
| <b>BeO</b>                         | $1.15 \times 10^{-4}$                                    | 312.6177  |
| <b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>  | $1.15 \times 10^{-4}$                                    | 300.1866  |

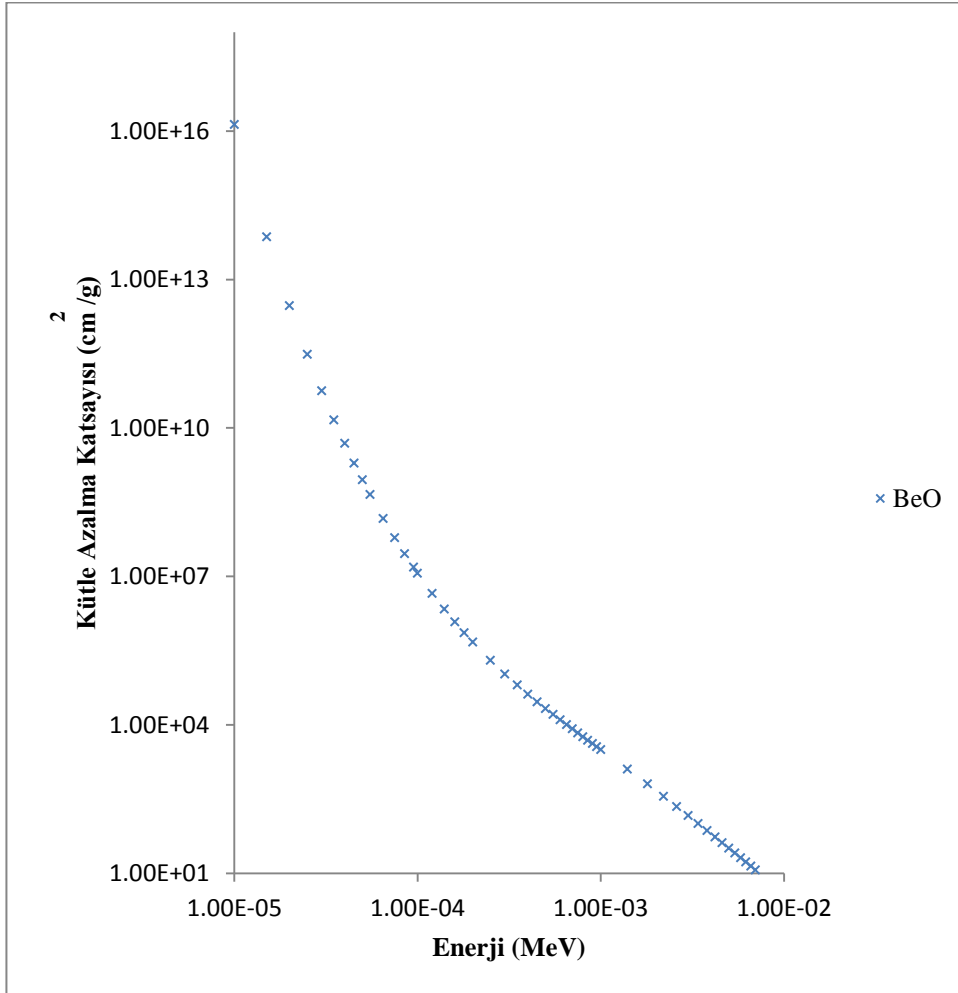
### 4.3. X- Işınları İçin Su, $Al_2O_3$ , BeO ve $B_2O_3$ un Kütle Azalma Katsayıları



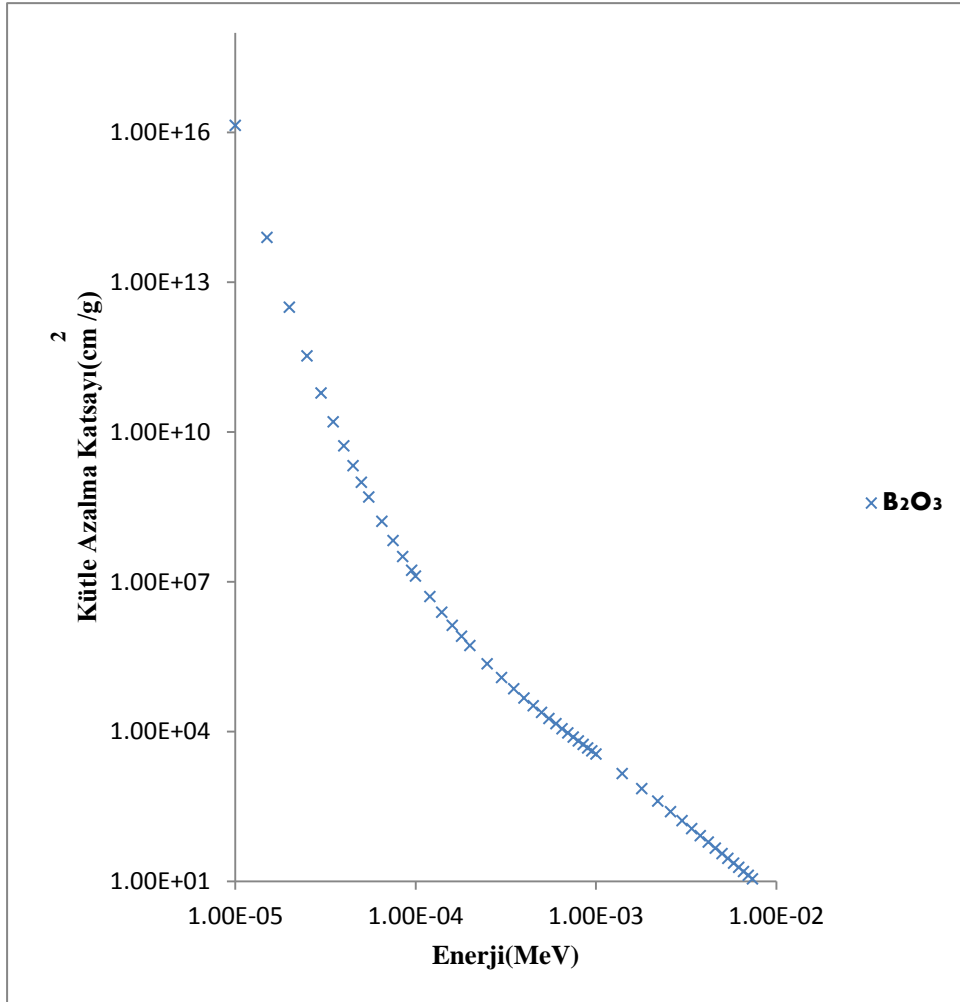
Şekil 4.15. Su için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında azalma katsayıları.



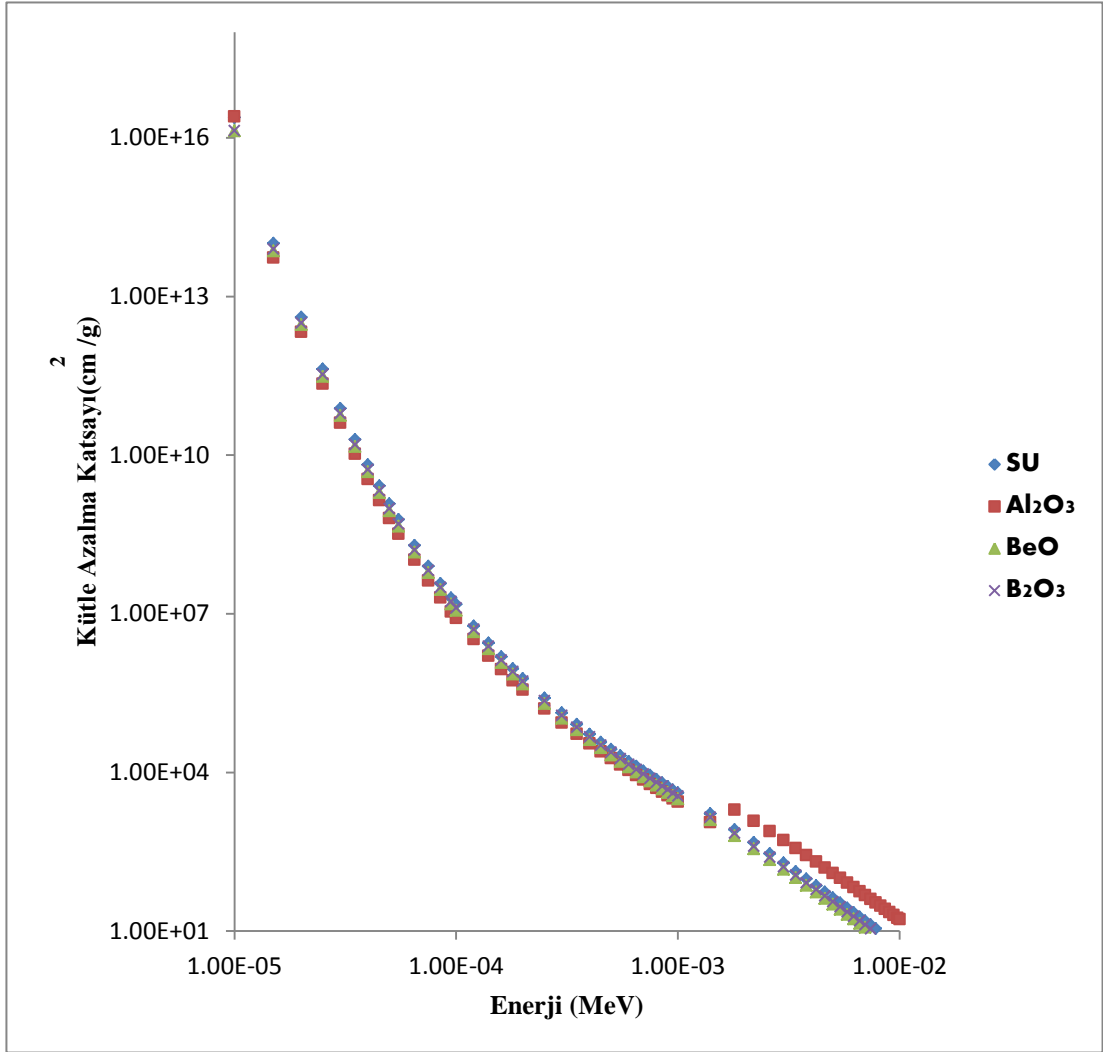
Şekil 4.16. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında azalma katsayıları.



Şekil 4.17. BeO için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında azalma katsayıları.



Şekil 4.18. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında azalma katsayıları.



Şekil 4.19. Su, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO ve B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için x-ışını enerjisine bağlı 10eV-10keV enerji aralığında azalma katsayı kıyaslaması.

Grafiklerden, her hedef için 1 keV-10 keV enerji aralığında azalma katsayılarında sapmalar gözlenir ama 10 eV- 1keV enerji aralığında uyumun daha iyi olduğu gözlenmektedir.

### Doz Hesapları :

Pozitronlar için durdurma gücü ve x-ışınları için azalma katsayıları hesapladıktan sonra pozitron ve x-ışını için doz hesabı yapılabilir.

Pozitronların Dozu için ; [Martin, 2006]

$$D_{\beta} \text{ (rad/h)} = 5,768 \times 10^{-5} \phi_{\beta} \bar{E} \times \mu_{\beta}$$

Eşitliği ile hesaplanabilir.

Bu eşitliklerdeki ifadeler ;

$D_{\beta}$  : Beta radyasyonun doz hızı ,birimi (rad/h) dir.

$\phi_{\beta}$ : Akı

$\bar{E}$ : Beta parçacıkları için ortalama enerji ( $\bar{E} = \frac{1}{3} E_{\beta\max}$ )

$\mu_{\beta}$ : Kütle azalma katsayısı ( $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$ ) dir ve

$$\mu_{\beta} = 17 (E_{\beta\max})^{-1,14}$$

şeklinde tanımlanmaktadır [Martin, 2006].

X-ışınları için doz ;

$$D_{\text{med}} = \phi \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \bar{E}_{\text{ab}} \times 1,6022 \times 10^{-6}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Burada,

$\phi$ : Akı

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ : Kütle azalma katsayısı birimi  $\left(\frac{cm^2}{g}\right)$  XCOM [Berger ve Hubbell, 1999] programı kullanılmıştır.

$\bar{E}_{ab}$  : soğurulan enerji

şeklinde tanımlanmaktadır [Martin, 2006].

Örnek olarak ,Su 'yun Pozitronlar ve x-ışınları için doz hesabı aşağıda verilmiştir ; çalışmada maksimum enerji 10 keV olarak kullanılmıştır ve akı değeri sabit olarak ( $\emptyset$ ) alınmıştır.

**Pozitronlar için doz hesaplama eşitliği [Martin, 2006],**

$$D_{\beta} \text{ (rad/h)} = 5,768 \times 10^{-5} \emptyset_{\beta} \bar{E} \times \mu_{\beta}$$

dir. Bu ifadede ,

$\emptyset_{\beta}$ , sabit bir değer farz edilmiş.

Ortalama enerji için :

$$\bar{E} = \frac{1}{3} E_{\beta\max}$$

$$\bar{E} = \frac{1}{3} \times 0,01 = 3,33 \times 10^{-3} \text{ MeV}$$

bulunur.

Birim kütle başına enerji birikimi kesiri hesaplamak için :

$$\mu_{\beta} = 17 (E_{\beta\max})^{-1,14}$$

$$\mu_{\beta} = 17 (0.01)^{-1,14} = 3239,28 \left(\frac{cm^2}{g}\right)$$

Pozitronların Su için doz hesabı ise:

$$D_{\beta} \text{ (rad/h)} = 5,768 \times 10^{-5} \phi_{\beta} \bar{E} \times \mu_{\beta}$$

$$D_{\beta} = 5,768 \times 10^{-5} \times \phi_{\beta} \times 3,33 \times 10^{-3} \times 3239,28$$

$$D_{\beta} = 6,2218 \times 10^{-4} \times \phi \quad \left( \frac{\text{rad}}{\text{h}} \right)$$

bulunur.

**X-ışınları için doz hesaplama eşitliği [Martin, 2006],**

$$D_{med} = \phi \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \bar{E}_{ab} \times 1,6022 \times 10^{-6}$$

dir. Bu ifadede ,

$\phi_{\beta}$ , sabit bir değer farz edilmiş.

soğurulan enerji için

$$\bar{E}_{ab} = E_{max} = 0,01 \text{ MeV}$$

$$\text{Azalma katsayısı} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) = 5,33 \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \quad [\text{Bereger ve Hubbell, 1999}]$$

X-ışınların Su için doz hesabı ise:

$$D_{med} = \phi \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \bar{E}_{ab} \times 1,6022 \times 10^{-6}$$

$$D_{med} = \phi \times 5,33 \times 0,01 \times 1,6022 \times 10^{-6}$$

$$D_{med} = 8,5397 \times 10^{-8} \times \phi \quad (\text{rad})$$

bulunur.

Çizelge 4.8. Hedef olarak Suyun Pozitronlar ve x-ışınlarında , Maksimum enerji ve sabit akı için Doz hesabı

|          | $E_{max}$<br>(MeV) | Doz<br>(rad)                             |
|----------|--------------------|--|
| Pozitron | 0,01               | $6,2218 \times 10^{-4} \times \emptyset$ |
| X-ışını  | 0,01               | $8,5397 \times 10^{-8} \times \emptyset$ |

Çizelgede pozitron ve x-ışınları aynı enerji ve aynı akı için doz değerlerinin farklı oldukları görülmektedir. Pozitronlar için doz değerleri daha büyük bulunur.

## 5.TARTIŞMA

Pozitronların  $H_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BeO$  ve  $B_2O_3$  hedefleri için durdurma gücü iki farklı yöntemle hesaplanmıştır. Tsoulfanidis (1995) eşitliği ve bu eşitlikteki bazı parametreleri modifiye ederek elde edilen eşitlik [Gümüş, 2008; Rohlich, 1954] kullanılarak, 10 eV ile 10 keV enerji aralığında  $H_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BeO$  ve  $B_2O_3$  hedefleri için nükleer durdurma gücü hesabı yapılmıştır. Elde edilen sonuçların enerjiye bağlı grafikleri çizilerek kıyaslama yapılmıştır.

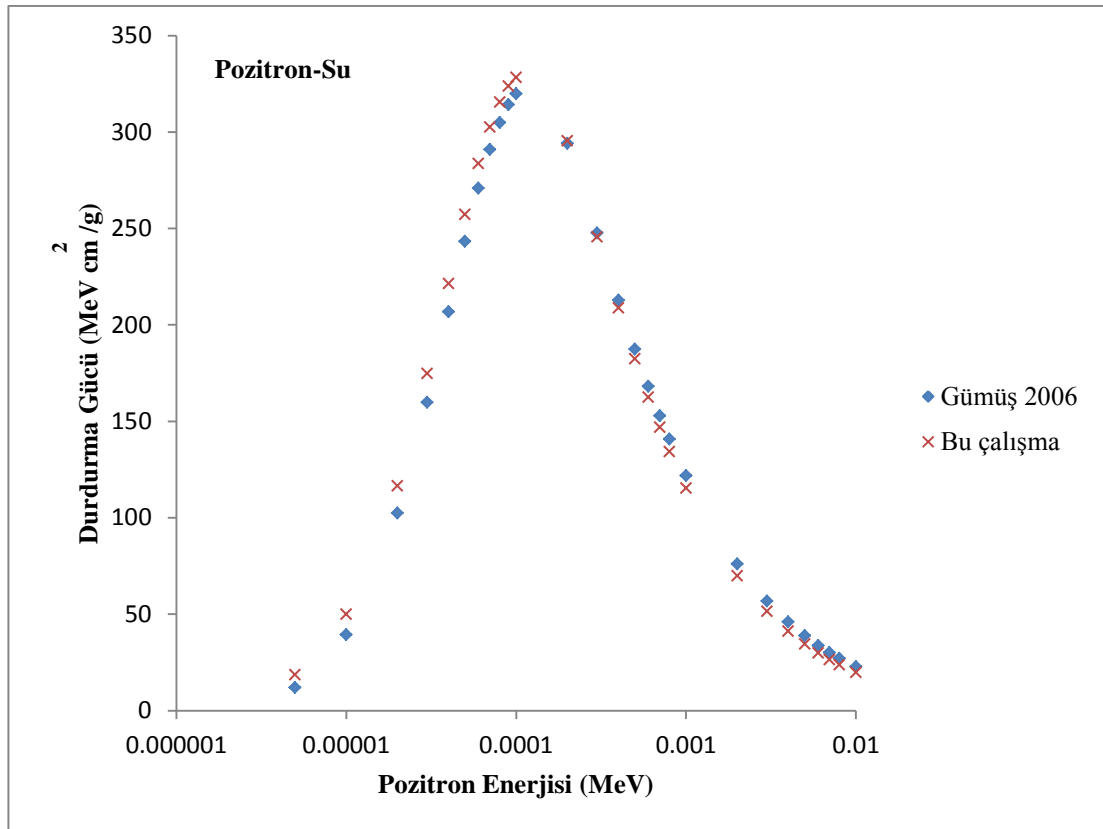
Tsoulfanidis (1995) tarafından önerilen denklemler kullanıldığında su için Şekil 4.1'de görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 100 eV enerjisinde,  $Al_2O_3$  için Şekil 4.2'de görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 195 eV enerjisinde,  $BeO$  için Şekil 4.3'te görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 125 eV enerjisinde ve  $B_2O_3$  için Şekil 4.4'de görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 135 eV enerjisinde, maksimum değerine ulaştığı görülmüştür.

Tsoulfanidis (1995) eşitliği kullanarak düşük enerji değerlerinde durdurma gücü sonuçları elde edebilmemiz önemlidir. Şekil 4.13'te durdurma gücünün maksimum olduğu yer 100 eV ve 200 eV enerji aralığındadır. Su için maksimum durdurma gücü 354,3897 ( $MeV.cm^2/g$ ),  $Al_2O_3$  için 194,4473 ( $MeV.cm^2/g$ ),  $BeO$  için 306,0569 ( $MeV.cm^2/g$ ) ve  $B_2O_3$  için 285,7058 ( $MeV.cm^2/g$ ) olarak bulunmuştur.

Gümüş (2008) tarafından önerilen denklemler kullanıldığında su için Şekil 4.5'de görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 110 eV enerjisinde,  $Al_2O_3$  için Şekil 4.6'da görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 120 eV enerjisinde,  $BeO$  için Şekil 4.7'de görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 115 eV enerjisinde ve  $B_2O_3$  için Şekil 4.8'de görüldüğü gibi durdurma gücünün yaklaşık 115 eV enerjisinde maksimum değerine ulaştığı görülmüştür.

Modifiye edilmiş eşitlik kullanılarak, Şekil 4.14'te durdurma gücünün maksimum olduğu yer 100 eV ve 120 eV enerji aralığındadır. Su için maksimum durdurma gücü 324,8190 MeV.  $cm^2/g$ ,  $Al_2O_3$  için 237,7613 MeV.  $cm^2/g$ , BeO için 312,6177 MeV.  $cm^2/g$  ve  $B_2O_3$  için 300,1866 MeV.  $cm^2/g$  bulunmuştur. Durdurma gücü ile analitik hesap yapan tek bir yöntemin olmaması bu konuda boşlukların olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada su için maksimum durdurma gücüne bakıldığında, modifiye edilmiş Tsoulfanidis denkleminden elde ettiğimiz değer ile literatürden (Gümüş, 2006) aldığımız değer arasında % 2,6 kadar bir fark ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.1. Su için durdurma gücü kıyaslaması

Bu çalışmada kullanılan iki farklı yöntemle hesaplanmış durdurma gücü sonuçlarını kıyasladığımızda ve kullandığımız (10 eV-10 keV) enerji aralığında, modifiye

edilmiş Tsoulfanidis eşitliği [Gümüş, 2008] küçük enerjilerde sonuç elde etmemizi sağlarken, Tsoulfanidis (1995) eşitliği sonuç vermemektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi Tsoulfanidis ve modifiye edilmiş Tsoulfanidis eşitlikleri kullanarak hesaplanan durdurma gücü değerlerinde, küçük enerji değerlerinde sapmalar görünmektedir ama maksimum değerden sonra ve enerji büyüdükçe durdurma gücünün hemen hemen aynı olur. Grafiklerden de görüldüğü gibi pozitronlar için durdurma gücü enerji değeri arttıkça artmaktadır ve maksimum değere ulaştıktan sonra enerji arttıkça azalmaktadır.

Pozitronlar için nükleer durdurma gücü hesabında hedef materyaller olan;  $H_2O$ ,  $Al_2O_3$ , BeO ve  $B_2O_3$ 'ün maksimum durdurma güçleri kıyaslandığında birbirlerine yakın değerler olduğunu görmekteyiz ama suyun maksimum durdurma gücü diğerlerine göre daha yüksektir. Çünkü maddelerin durdurma gücü, gelen parçacığın atom numarasına, atom kütlesine ve iyonizasyon potansiyeline bağlıdır ve durdurma gücü yoğunluktan bağımsız olarak hesaplanır. Durdurma gücü iyonizasyon potansiyeli ile ters orantılı olduğu gözlenir ve iyonizasyon potansiyeli arttıkça maksimum durdurma gücü azalır.

Bu çalışmada farklı materyaller (Su,  $Al_2O_3$ , BeO,  $B_2O_3$ ) kullanılarak çeşitli enerjilerde kütle azaltma katsayıları, Berger ve Hubbell (1999) tarafından geliştirilen XCOM bilgisayar programı ile hesaplanmış ve grafikleri çizilmiştir. Kütle azalma katsayıları kullanılarak pozitronlar ve x-ışınları için maksimum enerji değerlerinde doz hesabı yapılmış ve kıyaslanmıştır. Pozitron ve X-ışınları için, aynı enerji ve aynı akıda doz değerlerinin farklı oldukları görülmektedir. Pozitronlar için doz değerleri beklendiği gibi daha büyük bulunur.

Bir ortam içerisinde parçacıkların ortama bıraktıkları enerji, radyasyon hasarı, radyasyon dozimetresi, radyoloji, sağlık fiziği gibi bir çok alanda önemlidir. Örneğin radyoterapide amaç hastalıklı dokuyu, tümör kontrolünü sağlamaya yetecek kadar bir radyasyon dozu ile ışınlarken, sağlıklı dokuları da maksimum düzeyde korumaktır.

Bu nedenle parçacıkların kaybettiği enerji ve bu esnada aldıkları yol çok önemlidir. Sonuç olarak yapılan çalışmalar doğrultusunda hesaplanmış değerler'den sağlık fiziği uygulamalarında doz hesaplamalarında yararlanılabilir.

## KAYNAKLAR

Akar, A., "Bazı biyolojik materyallerden enerji transferi ve durdurma gücü", Doktora Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Samsun, (2005).

Andersen, H. H., Simonsen, H., Sorensen, H., "An experimental investigation of charge-dependent deviations from the Bethe stopping power Formula", *Nuclear Physics A*, 125(1): 171-175 (1977).

Arya, A.P., "Çekirdek Fiziğin Esasları" Yusuf ŞAHİN., *Aktif Yayınevi*, Erzurum, (1999).

Baykal, G., "Monte carlo yöntemi ile pozitronların altın ortamda menzil dağılımlarının incelenmesi" Yüksek lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2011).

Berger, M.J. and Hubbell, J.H., "XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer," NBSIR 87-3597, *National Bureau of Standards* (former name of NIST), Gaithersburg, MD (1999).

Berger, M. J., Seltzer, S. M., Stopping powers and ranges of electrons and positrons, (National Bureau of Standards Report, NBSIR 82-2550 A, 1982).

Bethe, H.A., Ashkin, J., "Experimental Nuclear Physics, Segré, E.", *J. Wiley*, New York, 253 (1953).

Bethe, H.A., "Handbook of Physics. Flugge, 24th", *Flugge, S., Elsevier, Berlin*, 273 (1933).

Bethe, H., "Zur Theorie des durchgangs schneller korpuskularstrahler durch materie" *Ann. Physik*, 5, 325-400, (1930).

Bohr, N., "On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter", *Phil. Mag.*, 25: 10-31, (1913).

Cabrera, R.T., Cruz, S.A., Oddreshede, J., Sabin, J.R., "Bethe theory of stopping incorporating electronic excitations of partially stripped projectiles", *Phys. Rev. A* 55, 2864 (1997).

Demir, B., "Pozitron emisyon tomografi (PET) detektörlerinin insan vücut fantomunda duyarlılık analizi", Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2007).

Demir, H., “ Farklı iki lineer hızlandırıcı cihazının elektron dozimetrik parameterlerinin karşılaştırılması ”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 21-27 (2008).

E’lannunziata, M., “Nuclear Radiation ,Its Interaction With Matter and Radioisotope Decay”, second edition, “Handbook of Radioactivity Analysis” *Elsevier Science The Montgue Group, Technical Services, California, USA.*,84- 90, (2003).

Evans, R.D., The Atomic Nucleus, *Mc-Graw-Hill*, 567 (1955).

Gümüş, H., “Simple stopping power formula for low and intermediate energy electrons”, *Radiat. Phys. Chem.*, 72, 7-12 (2005).

Gümüş, H., “New stopping power formula for intermediate energy electrons”, *Radiation and Isotopes*, 66, 1886-1890 (2008).

Gümüş, H., “Calculation of stopping power for intermediate energy positrons”, *Chinese Journal Of Physics* ., 44, (4): 290-296 (2006).

ICRU Report 37, “Stopping powers for Electrons and Positrons”, *ICRU*, Bethesda, MD, (1984).

ICRU Report 49, “Stopping powers and ranges for protons and alpha particles”, *ICRU*, Bethesda, MD, (1993).

İnternet: NIST Physics Laboratory home page, “Estar, 2003: Stopping Power And Range Tables for Electron” (2009).

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>

İnternet : NIST Physic Labrotary “Composition of Adipose Tissue (ICRP)” (2009).

<http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?refer=ap&matno=103>

İnternet : [http://home.uludag.edu.tr/users/kaynak/images/tesir\\_kesiti.pdf](http://home.uludag.edu.tr/users/kaynak/images/tesir_kesiti.pdf) (Son erişim tarihi 27.06.2011).

Krane, K.S., “Nükleer Fizik 1”, Çeviri Editörü: Şarer, B., *Palme Yayıncılık*, Ankara, 196-326 (2001).

Keleş.S., “Monte carlo yöntemi kullanarak nükleer radyasyonun dozimetrik hedeflerde doz hesabı” , Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2011).

Khan, F. M., “The Physics of Radiation Therapy 3rd ed”, *Williams and Wilkins*, USA, 467-480, 42-47, 59-77 (2003).

Levin,C.,and Hoffman,E., “ Calculation of positron range and its effect on the fundamental limit of positron emission tomography system spatial resolution” *Phys. Med. Biol.* 44 (1999).

Martin, James,E., “Physics for Radiation Protection” *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KgaA* 262-265 (2006).

Mott,N.F., and Massey,H.S.W., “The Theory of Atomic collisions” 3rd Edition *Oxford Univ. Press*, London (1965).

Pimblott, S.M., Siebbeles, L.D.A., *Nucl. Instrum. Methods B* 194 237–250, (2002).

Pimblott, S. M., La Verne, J. A., Alba Garcia, A., and Siebbeles, L. D. A., *J. Phys. Chems.* B104(41), 9607 (2000).

Powsner, R.E., "Essential Nuclear Medicine Physics,2nd Ed.", *Blackwell Publishing*, Massachusetts, 1-44 , 1-28 (2008).

Rohlich,F., and Carlson, B.C., “Positron-Electron Differences in Energy Loss and Multiple Scattering ” *Phys.Rev.*93,38 (1954).

Seltzer, S. M. and Berger, M. J., “ Evaluation of the Collision Stopping Power of Elements and Compounds for Electrons and Positrons” *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 33,1189-1218 (1982).

Sugiyama, H., “Stopping power formula for intermediate energy electrons” *Phys. Med. Biol.*, 30, 331-335 (1985).

Tsoufanidis, N., “Measurement and Detection of Radiation, 2nd ed.”, *Taylor and Francis*, Washington, DC, (1995).

Tubiana,M.,Dutereix,J., Wambers’e, A., “Introduction Radio biology”, *Taylor& Francis*, London,274-301 (1990).

Tufan.M., “Yüklü parçacıklar için bazı bileşiklerin durdurma gücü hesaplanmaları” , Doktora tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun (2007).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KAZEMIAFSHAR, Hanieh  
Uyruğu : Y.T. C.  
Doğum tarihi ve yeri : 25.03.1983, Urummiyeh  
Medeni Hali : Evli  
E-posta : h\_sh\_afshar@yahoo.com

### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                          | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|--|------------------|
| Yüksek Lisans | Gazi Üniversitesi / Fizik Anabilimdalı | --               |
| Lisans        | TebriZ Üniversitesi / Fizik Bölümü     | 2007             |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Deneyimler

| Yıl       | Yer           | Görev    |
|-----------|---------------|----------|
| 2008-2010 | Lise okulları | Öğretmen |