



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**ELEKTRON VE POZİTRONLARIN FARKLI ORTAMLARDA  
ENERJİ KAYBI VE DOZ HESAPLAMALARI YAPAN PAKET  
PROGRAM GELİŞTİRİLMESİ**

Doktora Tezi

**Hıkmət OSMAN**

Danışman  
**Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ**

SAMSUN  
2022

**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**



**ELEKTRON VE POZİTRONLARIN FARKLI ORTAMLARDA  
ENERJİ KAYBI VE DOZ HESAPLAMALRI YAPAN PAKET  
PROGRAM GELİŞTİRİLMESİ**

Doktora Tezi

**Hıkmət OSMAN**

Danışman  
**Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ**

SAMSUN  
2022

## TEZ KABUL VE ONAYI

**Hıkmət OSMAN** tarafından, **Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ** danışmanlığında hazırlanan “**ELEKTRON VE POZİTRONLARIN FARKLI ORTAMLARDA ENERJİ KAYBI VE DOZ HESAPLAMALARI YAPAN PAKET PROGRAM GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 9.9.2022 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

|                          | Unvanı Adı Soyadı<br>Üniversitesi<br>Ana Bilim/Ana Sanat Dalı                                      | İmza | Sonuç                             |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------|
| <b>Başkan</b>            | Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ<br>Ondokuz Mayıs Üniversitesi<br>Atom ve Mol. Fiziki Anabilim Dalı        |      | <input type="checkbox"/><br>Kabul |
|                          |                                                                                                    |      | <input type="checkbox"/><br>Ret   |
| <b>Üye</b><br>(Danışman) | Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ<br>Ondokuz Mayıs Üniversitesi<br>Nükleer Fizik Anabilim Dalı                 |      | <input type="checkbox"/><br>Kabul |
|                          |                                                                                                    |      | <input type="checkbox"/><br>Ret   |
| <b>Üye</b>               | Prof. Dr. Mustafa Çağatay TUFAN<br>Ondokuz Mayıs Üniversitesi<br>Radyolojik Bilimler Anabilim Dalı |      | <input type="checkbox"/><br>Kabul |
|                          |                                                                                                    |      | <input type="checkbox"/><br>Ret   |
| <b>Üye</b>               | Prof. Dr. Recep KESER<br>Samsun Üniversitesi<br>Müh. Fakültesi Temel Bilimler Bölümü               |      | <input type="checkbox"/><br>Kabul |
|                          |                                                                                                    |      | <input type="checkbox"/><br>Ret   |
| <b>Üye</b>               | Dr. Öğr. Üyesi Alpaslan KOÇ<br>Samsun Üniversitesi<br>Müh. Fakültesi Biyomedikal Müh.              |      | <input type="checkbox"/><br>Kabul |
|                          |                                                                                                    |      | <input type="checkbox"/><br>Ret   |

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Dönem Projesi tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

İmza

09 /09 / 2022

Hikmat OSMAN

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** ELEKTRON VE POZİTRONLARIN FARKLI ORTAMLARDA ENERJİ KAYBI VE DOZ HESAPLAMALARI YAPAN PAKET PROGRAM GELİŞTİRİLMESİ.

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 20.05.2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 4

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

İmza

09 /09/ 2022

Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ

## ÖZET

### ELEKTRON VE POZİTRONLARIN FARKLI ORTAMLARDA ENERJİ KAYBI VE DOZ HESAPLAMALARI YAPAN PAKET PROGRAM GELİŞTİRİLMESİ

Hıkmət OSMAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Ana Bilim Dalı

Doktora, Eylül/2022

Danışman: Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ

Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, farklı ortamlarda elektron ve pozitronlar gibi hafif yüklü parçacıkların taşınmasını gerçekleştiren MEPSAR isimli bir paket program geliştirildi. MEPSAR ile farklı ortamlarda (element veya bileşik) geniş bir enerji aralığında ( 20 eV – 1 GeV) elektron ve pozitronların durdurma gücü, CSDA menzili, radyasyon verimi ve soğrulan doz gibi birçok parametrelerin hesaplamaları pratik bir şekilde gerçekleştirilebilir ve grafikleri de çizilebilmektedir. Hesaplamalar, programın kendi veritabanında bulunan 99 element ve 180 bileşik için yapılabilir. Ayrıca, element bileşimi ile yoğunluğu dikkate alarak, element bileşimi 14'e kadar olan, ve programın kendi veritabanında bulunmayan herhangi bir bileşik için de yapılabilir. Paket programında, elektronların ve pozitronların çarpışma durdurma gücü hesaplamaları için Sugiyama tarafından önerilen etkin yük kavramı dikkate alındı. Yüksek enerjilerde, yoğunluk etkisi düzeltmesi ( $\delta$ ) için Fano'nun asimptotik formülü kullanıldı. Radyatif durma gücü için, Bhabha'nın çarpışma durdurma gücü ile radyatif durma gücü arasındaki orana dayalı analitik ifadesi kullanıldı. Menzili ve radyasyon verimi için, sürekli yavaşlanma yaklaşımı (CSDA) dikkate alındı. Menzili ve radyasyon verimi hesaplamaları için Simpson sayısal integral yöntemi kullanarak gerçekleştirildi. MEPSAR ile elde edilen sonuçlar, ESTAR ve PENELOPE sonuçları ile karşılaştırıldı. Hesaplanan ile referans sonuçlar, orta ve yüksek enerji aralığında iyi bir uyum içinde olduğu görüldü. Çalışmanın ikinci aşamasında, radyoterapide, radyasyon dozimetresi olarak kullanılan MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT bazı polimer jellerin bazı radyolojik özellikleri araştırıldı. Bu amaç için, EGSnc ve PENELOPE Monte Carlo simülasyon programları kullanıldı. Bahsi geçen simülasyon programları kullanarak elektron, pozitron ve fotonların ilgili polimer jellerdeki taşınması gerçekleştirildi. Burada, 10 keV-30 MeV enerji aralığında, ilgili polimer jellerin kütle azalma katsayıları, kütle durdurma gücü, CSDA menzili, etkileşme tesir kesitleri ve derinlik-doz dağılımı hesaplandı. Elde edilen sonuçlara göre, yumuşak dokunun toplam kütle azalma katsayısı, etkileşme tesir kesiti, toplam kütle durdurma gücü ve CSDA menzili sonuçları, 10 keV-30 MeV enerji aralığında, polimer jellerin sonuçlarına çok yakın (% 0.05 - 0.1 fark ile) bulundu. Ayrıca, 0.05-20 cm derinlik aralığında, 6 MeV'li elektron ve fotonlar için, yumuşak doku ve ilgili polimer jellerin derinlik-doz eğrileri arasındaki farkın yaklaşık %1 ve daha az olduğu bulundu. Dolayısıyla, ilgili tüm polimer jellerin yumuşak dokunun radyolojik eşdeğeri kabul edilebileceği sonuca varıldı.

**Anahtar Sözcükler:** Elektron; Pozitron; Foton; polimer jeller; jel dosimetresi; radyolojik özellikler; doku eşdeğeri; durdurma gücü; CSDA menzili; MEPSAR.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF A PACKAGE PROGRAM FOR ENERGY LOSS AND DOSE CALCULATIONS OF ELECTRONS AND POSITRONS IN DIFFERENT MATERIALS

Hikmat OSMAN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Physics

Ph.D., Eylül/2022

Supervisor: Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ

This study was consisted of two phases. In the first phase, a package program named MEPSAR for light-charged particles (electrons and positrons) transport in different target materials was developed. With MEPSAR, calculations of many parameters, such as stopping power, CSDA range, radiation yield and absorbed dose of electrons and positrons in a wide energy range (20 eV - 1 GeV) in different target materials (element or compound) can be performed practically and, the graphs of the results can be drawn. Calculations can be made for 99 elements and 180 compounds in the program's database. Further, taking into account the element composition and density, the calculations can also be made for any compound not in the program's database and have elemental composition up to 14. In the Package program, the effective charge concept proposed by Sugiyama was taken into account for the collision stopping power calculations of electrons and positrons. At high energies, Fano's asymptotic formula was used for density effect correction ( $\delta$ ). For radiative stopping power calculations, Bhabha's analytical expression based on the ratio between collision and radiative stopping power was used. For the range and radiation yield, the continuous slowing down approximation (CSDA) was taken into account. The integration of the range and radiation yield were performed using Simpson numerical integral method. The results obtained using MEPSAR were compared with those of ESTAR and PENELOPE. The calculated and reference results were in good agreement in the medium and high energy range. In the second phase of this study, some radiological properties of MAGIC, MAGAS, MAGAT and PAGAT polymer gel dosimeters for use in radiotherapy dosimetry have been investigated. For this purpose, EGSnrc and PENELOPE Monte Carlo modellings were selected and radiation transport have been achieved using electron and photon beams. Here, mass attenuation coefficients, mass stopping power, CSDA range, interaction cross sections (interaction probability) and depth-dose distribution of interested polymer gels over the 10 keV-30 MeV energy range were calculated and compared with each other and with soft tissue. The total mass attenuation coefficient, interaction probability, the total mass stopping power and CSDA range results of soft tissue was found to be very close (0.05-0.1% difference) to those of polymer gels over the 10 keV-30 MeV energy range. Furthermore, the difference between the depth-dose curves of soft tissue and interested polymer gels for 6 MeV electron and photon beams over the 0.05-20 cm depth range was found to be about 1% and less. Therefore, it was concluded that all related polymer gels can be considered as the radiological equivalent of soft tissue.

**Keywords:** Electron; Positron; Photon; polymer gels; gel dosimetry; radiological properties; tissue equivalent; stopping power; CSDA range; MEPSAR.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora çalışmalarım sırasında, yardımlarını, zamanını ve hoşgörüsünü hiçbir zaman eksik etmeyen, çalışmalarımın her aşamasında değerli önerileri ile beni yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ'e teşekkür ederim.

Çok değerli önerileri ile çalışmalarına yön veren tez izleme komitemdeki değerli hocalarım Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ ve Prof. Dr. Mustafa Çağtay TUFAN'a katkılarından dolayı şükranlarımı sunarım.

Doktora dersleri aldığım OMÜ fen edebiyat fakültes fizik bölümünün öğretim üyesi Prof. Dr. Fahri ÇELİK ve AÜ fizik mühendisliği bölümünün öğretim üyesi Prof. Dr. Turan OLĞAR'a teşekkür ederim.

Beni yetiştiren annem ve babama, çalışmalarım süresince hep yanımda olan sevgili eşime ve çoğu zaman yalnız bıraktığım çocuklarıma çok teşekkür ederim.

Hıkmət OSMAN

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                       |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| TEZ KABUL VE ONAYI .....                                                              | i    |
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI .....                                                  | ii   |
| TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI .....                                            | ii   |
| ÖZET .....                                                                            | iii  |
| ABSTRACT .....                                                                        | iv   |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....                                                               | v    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                     | vi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                         | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                 | xi   |
| TABLolar DİZİNİ .....                                                                 | xiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                                        | 1    |
| 2. GENEL BİLGİLER.....                                                                | 4    |
| 2.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşmesi .....                                  | 4    |
| 2.2. Yüklü Parçacıktan Ortama Enerji Transferi.....                                   | 4    |
| 2.2.1. Işımalı Çarpışma .....                                                         | 6    |
| 2.2.2. Sert (yakın) Çarpışma .....                                                    | 6    |
| 2.2.3. Yumuşak (uzak) Çarpışma.....                                                   | 6    |
| 2.3. Durdurma Gücü .....                                                              | 7    |
| 2.3.1. Çarpışma Durdurma Gücü .....                                                   | 7    |
| 2.3.2. Radyatif Durdurma Gücü.....                                                    | 8    |
| 2.4. Ağır Yüklü Parçacıktan Yörünge Elektronlarına Momentum ve Enerji Transferi ..... | 8    |
| 2.4.1. Olası Minimum Enerji Transferi - $\Delta E_{\min}$ .....                       | 11   |
| 2.4.2. Olası Maksimum Enerji Transferi - $\Delta E_{\max}$ .....                      | 12   |
| 2.4.3. Minimum Enerji Transferi ve Ortalama Uyarma Enerjisi (I) .....                 | 12   |
| 2.4.4. Maksimum Enerji Transferi - $\Delta E_{\max}$ .....                            | 13   |
| 2.5. Bohr Çarpışma Durdurma Gücü .....                                                | 14   |
| 2.6. Bethe Çarpışma Durdurma Gücü.....                                                | 17   |
| 2.6.1. Bethe Kütle Çarpışma Durdurma Gücü Grafiği.....                                | 20   |
| 2.6.2. Bethe Çarpışma Durdurma Gücünün Bağımlılığı.....                               | 21   |
| 2.6.3. Bethe Çarpışma Durdurma Gücü İfadesine Bazı Düzeltmeler .....                  | 22   |
| 2.6.3.1. Kabuk Düzeltmesi (C/Z).....                                                  | 22   |
| 2.6.3.2. Yoğunluk Etkisi Düzeltmesi ( $\delta$ ).....                                 | 23   |
| 2.7. Ağır Yüklü Parçacıkların Çarpışma Durdurma Gücü Denklemleri .....                | 25   |
| 2.8. Hafif Yüklü Parçacıkların Çarpışma Durdurma Gücü.....                            | 25   |
| 2.9. Radyatif Durdurma Gücü.....                                                      | 27   |
| 2.9.1. Bremsstrahlung Tesir Kesiti ile Radyatif Durdurma Gücü .....                   | 28   |
| 2.9.2. Radyasyon Uzunluğu ile Radyatif Durdurma Gücü .....                            | 30   |
| 2.9.3. Çarpışma Durdurma Gücü ile Radyatif Durdurma Gücü Oranı .....                  | 31   |
| 2.10. Toplam Kütle Durdurma Gücü .....                                                | 32   |
| 2.11. Ortalama Uyarma Enerjisi-I.....                                                 | 33   |
| 2.12. Bileşikler için Durdurma Gücü ile İlgili Parametreler .....                     | 34   |
| 2.13. Radyasyon Verimi-Y .....                                                        | 35   |
| 2.14. Yüklü Parçacıkların Menzili-R.....                                              | 36   |
| 2.14.1. CSDA Menzil ( $R_{\text{CSDA}}$ ) .....                                       | 37   |
| 2.14.2. Maksimum Penetrasyon Derinliği .....                                          | 38   |
| 2.15. Ortalama Çarpışma Durdurma Gücü .....                                           | 38   |
| 2.16. Sürekli Yavaşlanma Yaklaşımında Soğrulan Doz .....                              | 40   |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....                                                            | 41   |
| 3.1. MEPSAR.....                                                                      | 41   |
| 3.1.1. Toplam Kütle Durdurma Gücü- $S_{\text{tot}}$ .....                             | 41   |
| 3.1.2. Kütle Çarpışma Durdurma Gücü- $S_{\text{col}}$ .....                           | 41   |
| 3.1.2.1. Düşük Enerji Aralığında Kütle Çarpışma Durdurma Gücü .....                   | 41   |

|                                                                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.2.2. Orta ve Yüksek Enerji Aralığında Kütle Çarpışma Durdurma Gücü.....                                                                                        | 42        |
| 3.1.3. Hedef Materyalin Etkin Yüğü Belirlenmesi- $Z^*$ .....                                                                                                       | 42        |
| 3.1.4. Hedef Materyalin Etkin Uyarma Enerjisinin Belirlenmesi- $I^*$ .....                                                                                         | 43        |
| 3.1.5. Gelen Parçacığın Etkin Yüğü Belirlenmesi- $z^*$ .....                                                                                                       | 43        |
| 3.1.6. Bileşiklerin Atom Numarası ( $Z_{\text{bileşik}}$ ), Kütle Kumarası ( $A_{\text{bileşik}}$ ) ve Uyarma Enerjisi ( $I_{\text{bileşik}}$ ) Belirlenmesi ..... | 44        |
| 3.1.7. Yoğunluk Etkisi Düzeltmesi- $\delta$ .....                                                                                                                  | 44        |
| 3.1.8. Kütle Radyatif Durdurma Gücü- $S_{\text{rad}}$ .....                                                                                                        | 44        |
| 3.1.9. CSDA Menzili-R.....                                                                                                                                         | 45        |
| 3.1.10. CSDA Radyasyon Verimi-Y .....                                                                                                                              | 45        |
| 3.1.11. Soğrulan Doz-D .....                                                                                                                                       | 45        |
| 3.1.12. Simpson Bileşik Yöntemi .....                                                                                                                              | 46        |
| 3.2. PENELOPE.....                                                                                                                                                 | 46        |
| 3.3. EGSnrc .....                                                                                                                                                  | 47        |
| <b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>                                                                                                                                | <b>48</b> |
| 4.1. MEPSAR Paket Programın Sonuçları.....                                                                                                                         | 48        |
| 4.1.1. Hedef Materyal için $Z^*$ ve $I^*$ Belirlenmesi .....                                                                                                       | 48        |
| 4.1.2. Kütle Çarpışma Durdurma Gücü .....                                                                                                                          | 51        |
| 4.1.3. Kütle Radyatif Durdurma Gücü .....                                                                                                                          | 52        |
| 4.1.4. Toplam Kütle Durdurma Gücü .....                                                                                                                            | 57        |
| 4.1.5. Radyasyon Verimi .....                                                                                                                                      | 57        |
| 4.1.6. CSDA Menzili.....                                                                                                                                           | 58        |
| 4.1.7. Elektronlar ve Pozitronlar .....                                                                                                                            | 60        |
| 4.2. PENELOPE ve EGSnrc Simülasyon Sonuçları .....                                                                                                                 | 60        |
| 4.2.1. Foton Kütle Azalım Katsayısı.....                                                                                                                           | 61        |
| 4.2.2. Kütle Durdurma Gücü ve CSDA Menzili .....                                                                                                                   | 62        |
| 4.2.3. Etkileşme Tesir Kesitleri.....                                                                                                                              | 63        |
| 4.2.4. Yüzde Derin-Doz .....                                                                                                                                       | 65        |
| <b>5. SONUÇ .....</b>                                                                                                                                              | <b>68</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                                                                             | <b>69</b> |
| <b>EKLER .....</b>                                                                                                                                                 | <b>72</b> |
| EK 1. Monte Carlo Modellemesi (PENELOPE – EGSnrc).....                                                                                                             | 72        |
| EK 2. MEPSAR .....                                                                                                                                                 | 84        |
| <b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>                                                                                                                                              | <b>89</b> |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

|                  |                                                        |
|------------------|--------------------------------------------------------|
| $A$              | : Hedef malzeme kütle numarası                         |
| $a$              | : Atom yarı çapı                                       |
| $b$              | : Çarpışma parametresi                                 |
| $e$              | : Elektron yükü                                        |
| $\sigma$         | : Etkileşme tesir kesiti                               |
| $\rho$           | : Hedef malzeme yoğunluğu                              |
| $\Delta E$       | : Ortalama enerji kaybı (Ortalama enerji transferi)    |
| $S_{col}$        | : Çarpışma durdurma gücü                               |
| $S_{col}^{soft}$ | : Yumuşak çarpışma durdurma gücü                       |
| $S_{col}^{hard}$ | : Sert çarpışma durdurma gücü                          |
| $\Delta p$       | : Momentum transferi                                   |
| $M$              | : Ağır yüklü parçacık kütlesi                          |
| $m_e$            | : Elektronun durgun kütlesi                            |
| $Ze$             | : Ağır yüklü parçacığın yükü                           |
| $F_{coul}$       | : Coulomb kuvveti                                      |
| $v$              | : Yüklü parçacığın hızı                                |
| $c$              | : Işık hızı                                            |
| $\sigma_{col}$   | : Çarpışma tesir kesiti                                |
| $N_e$            | : Hedef malzemenin elektron yoğunluğu                  |
| $N_A$            | : Avogadro sayısı                                      |
| $Z$              | : Hedef malzemenin atom numarası                       |
| $b_{min}$        | : Minimum çarpışma parametresi                         |
| $b_{max}$        | : Maksimum çarpışma parametresi                        |
| $\Delta E_{min}$ | : Minimum enerji kaybı (Minimum enerji transferi)      |
| $\Delta E_{max}$ | : Maksimum enerji kaybı (Maksimum enerji transferi)    |
| $E_k$            | : Yüklü parçacığın kinetik enerjisi                    |
| $I$              | : Hedef malzemenin ortalama uyarma enerjisi            |
| $\beta$          | : Yüklü parçacığın hızının ışık hızına oranı ( $v/c$ ) |
| $\gamma$         | : Lorentz faktörü                                      |
| $\eta$           | : Yumuşak ile sert çarpışmalar arasında enerji sınırı  |
| $C_0$            | : Çarpışma durdurma gücü sabiti                        |

|                 |                                                                 |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|
| $r_e$           | : Klasik elektron yarıçapı                                      |
| $C/Z$           | : Kabuk düzeltme terimi                                         |
| HWF             | : Hidrojenik dalga fonksiyonu                                   |
| LDA             | : Lokal yoğunluk yaklaşımı                                      |
| $\delta$        | : Yoğunluk etkisi düzeltme terimi                               |
| $h\nu_p$        | : Plazma enerjisi                                               |
| $B_{col}$       | : Durdurma gücü sayısı                                          |
| $Q$             | : Enerji transferi                                              |
| $Q_{max}$       | : Maksimum enerji transferi                                     |
| $\alpha$        | : İnce yapı sabiti                                              |
| $p$             | : Bremsstrahlung yoğunluğu                                      |
| $S_{rad}$       | : Radyatif durdurma gücü                                        |
| $N_a$           | : Birim kütle başına atom sayısı                                |
| $\sigma_{rad}$  | : Bremsstrahlung tesir kesiti                                   |
| $m_e c^2$       | : Elektron veya pozitronun durgun kütle enerjisi                |
| $B_{rad}$       | : Radyatif durdurma sayısı                                      |
| $E$             | : Yüklü parçacığın enerjisi                                     |
| $X_0$           | : Radyasyon uzunluğu                                            |
| $dE/dx$         | : Birim mesafede (x) enerji kaybı                               |
| $S_{tot}$       | : Toplam durdurma gücü                                          |
| LPA             | : Lokal plazma yaklaşımı                                        |
| $\omega_0$      | : Plazma frekansı                                               |
| $\hbar\omega_p$ | : Plazma enerjisi                                               |
| $w$             | : Element ağırlık kesri                                         |
| $Y$             | : Radyasyon verimi                                              |
| $E_{col}$       | : Çarpışma ile enerji kaybı                                     |
| $R$             | : Menzil                                                        |
| CSDA            | : Sürekli yavaşlanma yaklaşımı                                  |
| $D(r)$          | : Soğrulan doz                                                  |
| $Z^*$           | : Hedef malzemenin etkin yükü (etkin atom numarası)             |
| $z^*$           | : Yüklü parçacığın etkin yükü                                   |
| $I^*$           | : Hedef malzemenin etkin ortalama uyarma enerjisi               |
| MAGIC           | : Methacrylic and Ascorbic acid in Gelatine Initiated by Copper |
| MAGAS           | : Methacrylic Acid Gelatin with AScorbic acid                   |

MAGAT : Methacrylic Acid Gelatine And Tetrakis  
PAGAT : PolyAcrylamide Gelatine And Tetrakis  
NIST : National Intitute of Standarts and Technology

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Soğurucu atomun yarıçapına a ve çarpışma parametresine b bağlı olarak yüklü parçacığın ile soğurucu atom arasındaki olası çarpışmalar .....       | 5  |
| Şekil 2.2. M kütleyle sahip pozitif yüklü ağır parçacık ile me kütleyle sahip orbital elektron arasındaki çarpışmanın şematik diyagramı.....                 | 9  |
| Şekil 2.3. Hedef maddenin atom numarasına (Z) karşı ortalama uyarma enerjisi I.....                                                                          | 13 |
| Şekil 2.4. Alüminyum için protonların kütle çarpışma durdurma gücü.....                                                                                      | 16 |
| Şekil 2.5. Kurşun için protonların kütle çarpışma durdurma gücü .....                                                                                        | 17 |
| Şekil 2.6. Alüminyum için protonların kütle çarpışma durdurma gücü.....                                                                                      | 19 |
| Şekil 2.7. Yüklü parçacığın kinetik enerjisinin bir fonksiyonu olarak çarpışma durdurma gücünün grafiği.....                                                 | 21 |
| Şekil 2.8. Soğurucu ortamdaki yüklü parçacıkların takip ettiği yol (üst : ağır yüklü parçacıklar, alt: hafif yüklü parçacıklar) .....                        | 37 |
| Şekil 4.1. Hedef materyalin etkin ortalama uyarma enerjisi (a) ve etkin atom numarasının (b) elektron ve pozitronların enerjisi ile değişmesi .....          | 52 |
| Şekil 4.2. MAGIC gel’de, elektronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi .....                    | 53 |
| Şekil 4.3. MAGIC gel’de, elektronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi. ....                                        | 53 |
| Şekil 4.4. MAGAS gel’de, elektronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi .....                    | 54 |
| Şekil 4.5. MAGAS gel’de, elektronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi .....                                        | 54 |
| Şekil 4.6. MAGIC gel’de, pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi .....                    | 55 |
| Şekil 4.7. MAGIC gel’de, pozitronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi .....                                        | 55 |
| Şekil 4.8. MAGAS gel’de, pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi .....                    | 56 |
| Şekil 4.9. MAGAS gel’de, pozitronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi .....                                        | 56 |
| Şekil 4.10. Elektronların radyasyon veriminin enerji ile değişmesi, MAGIC gel (a), MAGAS gel (b) .....                                                       | 57 |
| Şekil 4.11. Pozitronların radyasyon veriminin enerji ile değişmesi, MAGIC gel (a), MAGAS gel (b) .....                                                       | 58 |
| Şekil 4.12. MAGIC jel’de elektron ve pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücü (b) açısından karşılaştırılması .....    | 59 |
| Şekil 4.13. MAGIC jel’de elektron ve pozitronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzil (b) açısından karşılaştırılması .....                       | 59 |
| Şekil 4.14. Bazı polimer jellerin foton kütle azalım katsayısı oranı (MACR), fotoelektrik kütle azalım katsayısı (a), Compton kütle zalım katsayısı (b)..... | 60 |
| Şekil 4.15. Bazı polimer jellerin foton kütle azalım katsayısı oranı (MACR), çift oluşumu kütle azalım katsayısı (a), toplam kütle zalım katsayısı (b).....  | 61 |

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.16. Bazı polimer jellerin elektron kütle durdurma gücü oranı (MSPR), kütle çarpışma durdurma gücü (a), kütle radyatif durdurma gücü (b)..... | 62 |
| Şekil 4.17. Bazı polimer jellerin elektron kütle durdurma gücü (MSPR) ve menzil oranı, toplam kütle durdurma gücü (a), CSDA menzil (b) .....         | 63 |
| Şekil 4.18. Bazı polimer jeller için foton tesir kesitinin oranı (CSR), fotoelektrik tesir kesiti (a), Compton tesir kesiti (b).....                 | 64 |
| Şekil 4.19. Bazı polimer jeller için foton tesir kesitinin oranı (CSR), çift oluşumu tesir kesiti (a), toplam tesir kesiti (b) .....                 | 64 |
| Şekil 4.20. Bazı polimer jeller için 6 MeV enerjili elektronların Derin-Doz eğrileri .....                                                           | 65 |
| Şekil 4.21. Bazı polimer jeller için 6 MeV enerjili fotonların Derin-Doz eğrileri.....                                                               | 66 |
| Şekil 4.22. MAGIC jel ve yumuşak doku için 6 MeV enerjili elektronların PENELOPE ve EGSnrc Derin-Doz eğrileri.....                                   | 66 |
| Şekil 4.23. MAGIC jel ve yumuşak doku için 6 MeV enerjili fotonların PENELOPE ve EGSnrc Derin-Doz eğrileri.....                                      | 67 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1. Ağır yüklü parçacıkların değişik teori ve enerji aralığına göre atom durdurma sayısının ( $B_{col}$ ) değişik ifadeleri..... | 25 |
| Tablo 2.2. Elektron ve pozitronların değişik kinetik enerji aralığı için $\sigma_{rad}$ ve $B_{rad}$ değerleri.....                     | 29 |
| Tablo 2.3. Hafif yüklü parçacıkların değişik enerjilerine göre $B_{rad}$ değerleri.....                                                 | 30 |
| Tablo 2.4. Hedef maddenin atom numarasına göre $L_{rad}$ ve $L_{rad}'$ değerleri.....                                                   | 31 |
| Tablo 3.1. Yumuşak doku ile bazı polimer jellerin kütle yoğunluğu ile element bileşimi ....                                             | 47 |
| Tablo 4.1. MAGIC jel’de elektronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzili sonuçları .....                                   | 48 |
| Tablo 4.2. MAGAS jel’de elektronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzili sonuçları .....                                   | 49 |
| Tablo 4.3. MAGIC jel’de pozitronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzili sonuçları .....                                   | 50 |
| Tablo 4.4. MAGAS jel’de pozitronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzili sonuçları.....                                    | 51 |

## 1. GİRİŞ

Radyasyon fiziği, kimya, biyoloji ve tıpta, yüklü parçacıklar için çeşitli ortamların durdurma gücü hakkında doğru bilgiye sahip olmak genellikle önemlidir. Yüklü parçacıkların madde içerisinde yollar boyunca kaybettikleri ortalama enerji; durdurma gücü olarak ifade edilir. Elektron ve pozitronların toplam durdurma gücü; genellikle iki bileşene ayrılır. Bunlar; çarpışma durdurma gücü ve radyatif durdurma gücüdür. Çarpışma durdurma gücü; elektron ve pozitronların, ortamın bağlı atomik elektronları ile etkileşerek uyarma ve iyonlaşma nedeniyle birim yol uzunluğu başına ortalama enerji kaybı olarak ifade edilir. Radyatif durdurma gücü ise; elektron ve pozitronların, atom çekirdeğinin ve atomik elektronların elektrik alanları ile etkileşerek, bremsstrahlung emisyonu nedeniyle birim yol uzunluğu başına ortalama enerji kaybı olarak ifade edilir.

Bugüne kadar, hafif yüklü parçacıkların (elektronlar ve pozitronlar) durdurma gücü ve menzil hesaplamaları, ilgili bazı parametreleri birçok araştırmacı tarafından ele alınıp ve bununla ilgili birçok bilgisayar kod sistemi geliştirilmiştir. Yeni bir bilgisayar kod sistemi geliştirerek, değişik hedef materyalleri için, elektron ile pozitronların durdurma gücü ile menzili hesaplanmıştır (Saadi et al, 2020). Değişik bilgisayar kod sistemleri (LaRC Code, Hubert Code, Janni Code) kullanılarak değişik hedef materyaller için, proton ve alfa parçacıklarının durdurma gücü ile menzil hesaplamaları gerçekleştirilmiştir (Tai et al, 1997). Bazı biyomedikal materyallerde, 20 keV - 50 MeV enerji aralığında, elektronların CSDA menzili hesaplanmıştır (Saxena et al, 2011). Bazı biyolojik bileşiklerde, 100 eV – 1GeV enerji aralığında, elektron ve pozitronların durdurma gücü ile CSDA menzil hesaplanmıştır (Tufan et al, 2013). Temel 37 katı için, 200 eV – 30 keV enerji aralığında, elektronların durdurma gücü için yeni formül geliştirilmiştir (Jablonski et al, 2008). Bazı biyolojik bileşiklerde, düşük ve orta enerji aralığında, elektronların durdurma gücü hesaplanmıştır (Akar et al, 2005). Modifiye Bethe-Bloch durdurma gücü ifadesi ve etkin yük kavramı dikkate alınarak, bazı insan vücut dokuları için, 5 eV – 10 MeV enerji aralığında, elektronların durdurma gücü ile menzili hesaplanmıştır (Gümüş, 2018). Değişik hedef materyallerde, 30 keV – 1 MeV Enerji aralığında, elektronların CSDA menzili hesaplanmıştır (Hemlata et al, 2013).

3D konformal radyoterpi (3D-CRT), radyoterpinin en önemli tekniklerinden biridir. Bu teknikte, bilgisayarlı tomografi sisteminin (CT) vasıtasıyla, verilen

radasyon dozu, tümör şekline göre ayarlanmaktadır. Böylece, tümöre verilen radyasyon dozu daha hassas bir şekilde bilirlenmiş olup tümörü çevreleyen sağlıklı dokuya verilen doz en aza indirilmiş olur. Ancak, iyon odaları, film dozimetreler ve termoluminesan dozimetreler (TLD) gibi geleneksel radyasyon dozimetreleri kullanarak üç boyutlu doz hesaplamaları oldukça zordur. Çünkü, iyon odaları ile termoluminesans dozimetreler (TLD) sadece tek noktada mutlak dozu ölçerken, film dozimetreleri ise iki boyutlu bir düzlemde radyasyon dozu ölçebilmektedir. Dolayısıyla, radyasyon doz dağılımının tam üç boyutlu (3D) ölçülmesini sağlayan bir dozimetri tekniğine duyulan ihtiyaç, jel dozimetrisinin geliştirilmesine yol açmıştır. İyonlaştırıcı radyasyonun, bazı sulu çözeltilerde ürettiği kimyasal değişiklikler, ve bu değişikliklerin radyasyon dozimetresinde kullanılabilmesi ile ilgili ilk çalışma 1950’de Day ve Stein tarafından yapılmıştır (Day and Stein, 1950). Daha sonra, iyonlaştırıcı radyasyonun bir jel üzerinde indüklediği polimerizasyona dayanarak, yüksek enerjiler için bir radyasyon dozimetresi çalışması, 1958’de Hoecker ve Watkins tarafından yapılmıştır (Hoecker and Watkins, 1958).

Jel dozimetreler, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında, gerçekleşen polimerizasyon nedeniyle renk değişimine uğrayan polimer jellerdir. Jel dozimetreler, radyasyona duyarlı materyallerle aşılınmış bir jelden oluşmaktadır. Işınlama üzerine, suyun jel içindeki radyolizi sırasında salınan serbest radikaller, monomerlerin polimerizasyonu ve çapraz bağlanmasına neden olmaktadır. Ortaya çıkan serbest radikallerin miktarı, jel tarafından soğrulan radyasyon dozu ile orantılıdır. Oksijen, serbest radikallerin etkili bir temizleyicisi olduğu için ışınlamadan önce polimer jel dozimetrelerden mutlaka çıkarılmalıdır. Aksi takdirde; polimerizasyon işlemi engellenecektir. Bu nedenle, oksijen varlığı, polimer jel dozimetreler için bir dezavantajdır. Oksijenin, polimer jel karışımına nüfuzunu önlenmesi ancak özel ekipmanlar vasıtasıyla gerçekleşebilir. Bu nedenle, normal koşullar altında üretilen, özel ekipmanlar gerektirmeyen polimer jellere duyulan ihtiyaç, normoksik polimer jellerin geliştirilmesine yol açmıştır. Jel gibi, kimyasal bir maddenin, radyasyon dozimetresi olarak kullanılabilmesi için suya veya canlı dokuya eşdeğer radyolojik özelliklere sahip olmalıdır. Bir başka ifade ile, jelin etkin atom numarası, gram başına elektron sayısı, kütle yoğunluğu ve elektron yoğunluğu gibi özellikler, su veya canlı doku ile birbirine yakın olmalıdır (Aljamal et al, 2013).

Günümüzde, radyasyona duyarlı jeller üzerinde birçok araştırma yapılmış olup farklı formülasyonları geliştirilmiştir. İyonlaştırıcı radyasyon tarafından üretilen üç boyutlu doz dağılımları, manyetik rezonans görüntüleme sisteminin yardımıyla elde edilerek yeni bir yumuşak doku eşdeğeri olan jel tipi geliştirilmiştir (Maryanski et al, 1994). Stereotaktik radyocerrahi ve yüksek doz hızlı brakiterapi için, MRI ve tedavi planları kullanarak, bir polimer jel dozimetre çalışması gerçekleştirilmiştir (Maryanski et al, 1996). Kimyasal bileşenleri değiştirilerek, etkin bir MAGAT polimer jel dozimetresi üretilmiş olup, jel bileşenleri ile doz yanıtı arasındaki ilişki araştırılmıştır (Razzak et al, 2016). Klinik radyoterapide kullanılabilmesi için, MAGAS normoksik polimer jel dozimetresi araştırılmıştır (Venning et al, 2005). MAGIC normoksik polimer jelin, 6 MV’li x-ışın fotonları için, Monte Carlo simülasyonu kullanılarak, radyolojik özellikleri araştırılmıştır (Aljamal et al, 2013). PAGAT normoksik polimer jel dozimetresinin iyonlaştırıcı radyasyona olan tepkisi, MRI sistemi kullanılarak araştırılmıştır (Venning et al, 2005). PRESAGE ve PAGAT polimer jel dozimetrelerinin, Monte Carlo modellemesi kullanılarak, radyoterapide kullanılabilmeleri ile ilgili, radyolojik özellikleri ile su eşdeğerlikleri araştırılmıştır (Brown et al, 2008).

Bu çalışmanın temel iki amacı vardır. Birinci amacı, 20 eV –1 GeV enerji aralığında, elektron ve pozitronlar gibi hafif yüklü parçacıkların, farklı ortamlarda durdurma gücü, CSDA menzil, radyasyon verimi ve soğrulan doz hesaplamaları yapan yeni bir paket program geliştirmektir. Ayrıca, geliştirilen paket programı kullanarak elde edilen sonuçları, literatürde bulunan benzer programların sonuçları ile karşılaştırmaktır. İkinci amacı, PENELOPE ve EGSnrc gibi Monte Carlo modellemeleri kullanarak, MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT gibi bazı polimer jel dozimetrelerinin radyolojik doku eşdeğerliğini araştırmaktır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşmesi

Bu bölümde, yüklü parçacıkların madde ile etkileşmesi tartışılmaktadır. Yüklü bir parçacık, kendi Coulomb elektrik alanı ile çevrili olup maddeye nüfuz ederken karşılaştığı atomların hem yörünge elektronları hem de çekirdekleri ile etkileşmektedir. Yüklü parçacıkların etkileşimleri, soğurucunun yörünge elektronları ile çarpışma ile enerji kaybı, çekirdekleriyle ise radyasyon ile enerji kaybına neden olur. Yüklü parçacıktan etkileşme başına ortama enerji aktarımı genellikle küçüktür. Bu nedenle, parçacığın kinetik enerjisi tükenmeden önce çok sayıda etkileşme gerçekleşmektedir. Yüklü parçacıkların madde içerisinde yollar boyunca kaybettikleri ortalama enerji, durdurma gücü olarak ifade edilir. Durdurma gücü, radyasyon dozimetresinde önemli bir rol oynamaktadır. Durdurma gücü, yüklü parçacığın kütlesi, yükü, hızı ve enerjisi, soğurucu ortamın ise yoğunluğu ve atom numarasına bağlıdır. Durdurma gücüne ek olarak, menzil, enerji transferi, ortalama iyonlaşma enerjisi ve radyasyon verimi gibi birçok parametre bu bölümde tartışılmaktadır.

### 2.2. Yüklü Parçacıktan Ortama Enerji Transferi

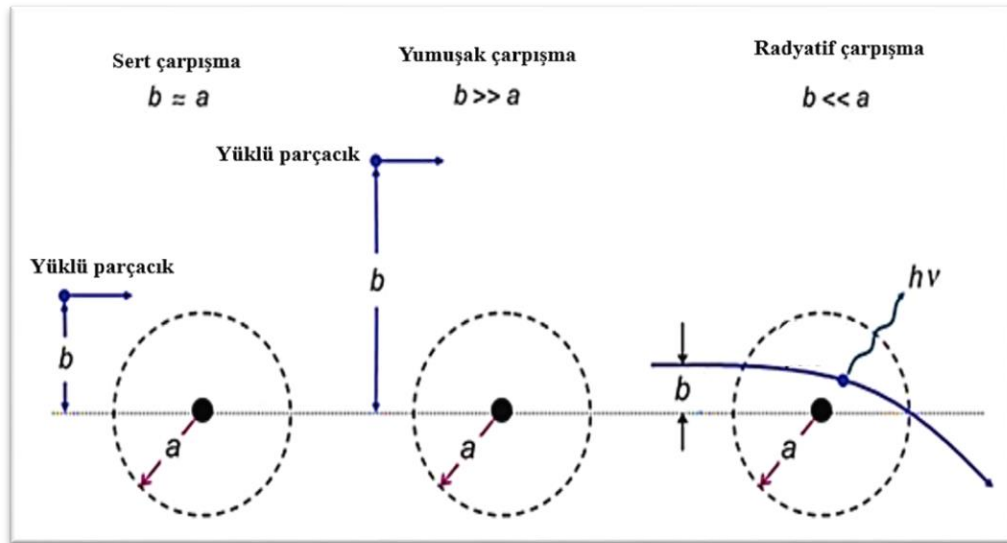
1896 yılında radyoaktif malzemelerden enerjik yüklü parçacıkların emisyonunun keşfi, yalnızca yayılan parçacıkların menşei değil; aynı zamanda maddeyi geçerken nasıl yavaşladıklarına da ilgi uyandırdı. 1908 yılında Hans Geiger, Ernest Marsden ve Ernest Rutherford'un  $\alpha$  parçacıkların saçılma çalışmaları ve Niels Bohr tarafından 1913 yılında geliştirilen klasik durdurma gücü teorisi birçok atomik ve nükleer modellerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Durdurma gücü teorisi 1930 yılında Hans Bethe tarafından önerildi. 1960 yılında kuantum ve göreceli mekaniği dikkate alarak Ugo Fano tarafından rafine edildi. Daha sonra, teorik durdurma gücü ifadelerinin doğruluğunu yükseltmek için değişik düzeltme faktörleri getirildi. Ancak; onlarca yıl önce ifade edilen temel teorik bilgiler bugün hala geçerli olduğunu kanıtlamıştır (Podgoršak, 2015).

Yüklü bir parçacık, soğurucu bir ortamdan geçerken, soğurucu atomların çekirdeği ve yörünge elektronları ile Coulomb etkileşimleri yaşar. Bu etkileşimler, şekil 2.1'de gösterildiği gibi, soğurucu atomun klasik atom yarıçapına  $a$  ve yüklü parçacığın klasik yörünge çarpışma parametresi  $b$ 'ye bağlı olarak üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar:

**1) Işımalı çarpışma ( $b \ll a$ ):** Burada, yüklü parçacık, genel olarak çekirdek ile etkileşme yapar ve muhtemelen hareket yönündeki bir değişiklikle birlikte esnek veya esnek olmayan saçılmaya maruz kalır. Bu etkileşmelerin büyük çoğunluğu esneklerdir. Böylece, parçacık çekirdek tarafından saçılır, ancak momentumun korunumu gereksinimini karşılamak için kinetik enerjisinin yalnızca önemsiz bir miktarını kaybeder. Bununla birlikte, saçılma etkileşmelerinin küçük bir yüzdesi esnek değildir ve x-ışını fotonlarının emisyonu (Bremsstrahlung) ile birlikte yüklü parçacık için önemli enerji kaybına neden olabilir.

**2) Sert çarpışma ( $b \approx a$ ):** Burada, yüklü parçacık, atomun yörünge elektronları ile doğrudan Coulomb etkileşmesi yapabilir ve onlara önemli miktarda enerji aktarabilir. Bu etkileşme, sert veya yakın çarpışma denir. Etkileşme sonucunda, yörünge elektronları, atomu bir  $\delta$ -ışını olarak terk eder ve diğer soğurucu atomlarla Coulomb etkileşmelerine girecek kadar yeterli enerjiye sahiptir.

**3) Yumuşak çarpışma ( $b \gg a$ ):** Burada, yüklü parçacık, atom ve bağlı elektronları ile bir bütün olarak etkileşme yapabilir. Bu etkileşme yumuşak veya uzak çarpışma denir. Burada, yüklü parçacıktan belirli bir bağlı elektrona enerji transferi çok küçüktür; ancak, bu etkileşmelerin sayısı büyüktür. Böylece, yüklü parçacık tarafından enerji kaybının yaklaşık %50'si, bir değerlik elektronunun çıkarılması yoluyla atomik polarizasyona, uyarılmaya veya iyonlaşmaya neden olabilir.



Şekil 2.1. Soğurucu atomun yarıçapına  $a$  ve çarpışma parametresine  $b$  bağlı olarak yüklü parçacığın ile soğurucu atomun arasındaki olası çarpışmalar

### 2.2.1. Işımalı Çarpışma

Yüklü bir parçacığın çarpışma parametresi  $b$ , soğurucu atomun yarıçapından  $a$  çok daha küçük olduğunda ( $b \ll a$ ), yüklü parçacık genel olarak çekirdekle etkileşime yapar ve muhtemelen hareket yönündeki bir değişiklikle birlikte esnek veya esnek olmayan saçılmaya da uğrar. Bu etkileşmelerin büyük çoğunluğu elastiktir, böylece parçacık çekirdek tarafından dağılır ve momentumun korunumu sağlamak için kinetik enerjisinin önemsiz bir miktarı kaybeder. Bununla birlikte, saçılma etkileşmelerinin küçük bir yüzdesi esnek değildir ve x-ışını fotonları yayınlayarak yüklü parçacık için önemli enerji kaybına neden olabilir. Bu etkileşme, Bremsstrahlung çarpışması olarak adlandırılır. Belirli bir ivmeye sahip olan yüklü bir parçacık için, bu tür etkileşmenin olasılığı, yüklü parçacığın kütlesinin karesiyle ters orantılıdır bu nedenle elektronlar ve pozitronlar dışındaki yüklü parçacıkların bremsstrahlung ile enerji kaybı ihmal edilebilir.

### 2.2.2. Sert (yakın) Çarpışma

Yüklü bir parçacığın çarpışma parametresi  $b$ , soğurucu atomun yarıçapı  $a$  ile aynı mertebede olduğunda ( $b \approx a$ ), yüklü parçacık tek bir atomun yörünge elektronları ile doğrudan bir Coulomb etkileşmesine girebilir ve ona önemli miktarda enerji aktarabilir. Bu tür etkileşmeye sert veya yakın çarpışma denir. Bir soğurucu ortamın içinde hareket eden yüklü bir parçacığın maruz kaldığı sert çarpışmaların sayısı genellikle azdır. Ancak; sert çarpışmalarla ilişkili enerji transferleri nispeten büyüktür. Böylece, parçacık sert çarpışmalar nedeniyle kinetik enerjisinin yaklaşık % 50'sini kaybeder. Sert çarpışmalar ile ilgili teoriler büyük ölçüde yüklü parçacıkların özelliklerine bağlıdır. Yüklü parçacıktan kendisine aktarılan kinetik enerji nedeniyle sert bir çarpışma yoluyla salınan yörünge elektronlarının ( $\delta$ -ışını) etkileşimden önce ve sonra serbest olduğunu varsayılır.

### 2.2.3. Yumuşak (uzak) Çarpışma

Yüklü parçacığın çarpışma parametresi  $b$ , soğurucu atomun yarıçapından  $a$  çok daha büyük olduğunda ( $b \gg a$ ), yüklü parçacık tüm atom ve bağlı elektronları ile etkileşime yapar. Bu tür etkileşmeye yumuşak veya uzak çarpışma denir. Yüklü parçacıktan atomun bağlı elektronlarına enerji transferi çok küçüktür. Ancak; bu etkileşmelerin sayısı büyüktür, bu nedenle yüklü bir parçacık tarafından enerji kaybının yaklaşık % 50'si, valans elektronların koparılması, atomda polarizasyon, uyarılma veya iyonizasyon gibi olaylar meydana gelebilir.

## 2.3. Durdurma Gücü

Yüklü bir parçacığın soğurucu bir ortamdaki hareketi sırasında, kinetik enerjisi tükenmeden önce çok sayıda etkileşme yapar. Her etkileşimde, yüklü parçacığın yolu değişebilir (elastik veya inelastik saçılma) ve kinetik enerjisinin bir kısmı ortama (çarpışma ile enerji kaybı) veya fotonlara (radyasyon ile enerji kaybı) aktararak kaybedebilir. Yüklü parçacık ile yörünge elektronları veya soğurucu atomların çekirdeği arasındaki bu olası etkileşmelerin her biri, etkileşme tesir kesiti  $\sigma$  ile karakterize edilir. Bir soğurucu ortamın boyunca yayılan yüklü parçacığın enerji kaybı, soğurucu ortama kadar parçacığın özelliklerine de bağlıdır.

Yüklü parçacığın soğurucu ortam birim uzunluğu başına kayıp ettiği enerji miktarı, doğrusal durdurma gücü  $(-dE/dl)$  olarak adlandırılır. Doğrusal durdurma gücünün, soğurucu ortam yoğunluğuna  $\rho$  bölünerek kütle durdurma gücü  $S$  elde edilir. Durdurma gücü, yüklü bir parçacığın geçtiği ortamın bir özelliğidir.

Genel olarak, yüklü parçacığın birim yol uzunluğu başına ortalama enerji kaybı olan  $(-dE/dl)$ , belirli bir enerji kaybı tesir kesiti  $\sigma_{ni}$ , ortalama enerji kaybı  $\Delta E_{ni}$  ile çarpılarak ve tüm olası bireysel çarpışmalar  $i$  üzerinde toplanarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$-\frac{dE}{dl} = \sum_i N_i \sum_n \Delta E_{ni} \sigma_{ni} \quad (2.1)$$

Burada,  $N_i$ ,  $i$ 'nci atomun yoğunluğu olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

**1) Birim hacim başına atom sayısı:** Bu durumda elde edilen durdurma gücü doğrusal durdurma gücü  $(-dE/dl)$  olarak ifade edilir ve birimi (MeV /cm) veya daha az yaygın olan (keV / $\mu$ m)'dir.

**2) Birim kütle başına atom sayısı:** Bu durumda elde edilen durdurma gücü kütle durdurma gücü  $S$  olarak ifade edilir ve birimi (MeV.cm<sup>2</sup>/g)'dir.

Yüklü parçacıkların toplam durdurma gücü genellikle iki bileşene ayrılır; bunlar çarpışma durdurma gücü ve radyatif durdurma gücüdür.

### 2.3.1. Çarpışma Durdurma Gücü

Çarpışma veya elektronik durdurma gücü, yüklü parçacığın ortamın bağlı atomik elektronları ile inelastik Coulomb çarpışmaları nedeniyle birim yol uzunluğu başına ortalama enerji kaybı olarak ifade edilir. Hem ağır hem de hafif yüklü parçacıklardan soğurucu atomun yörünge elektronlarına enerji aktarımı, bu atomun iyonlaşmasına ve

uyarılmasına neden olabilir. Ayrıca, çarpışma durdurma gücü, yumuşak çarpışma durdurma gücü  $S_{col}^{soft}$  ve sert çarpışma durdurma gücü  $S_{col}^{hard}$  olmak üzere aşağıdaki gibi iki bileşenin toplamı ile verilir.

$$S_{col} = S_{col}^{soft} + S_{col}^{hard} \quad (2.2)$$

### 2.3.2. Radyatif Durdurma Gücü

Radyatif veya nükleer durdurma gücü, yüklü parçacığın atom çekirdeğinin ve atomik elektronların elektrik alanları ile etkileşerek Bremsstrahlung emisyonu nedeniyle birim yol uzunluğu başına ortalama enerji kaybı olarak ifade edilir. Hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar), genellikle Bremsstrahlung emisyonu olarak adlandırılan bu etkileşmeler yoluyla kayda değer enerji kaybı yaşarlar. Fakat; ağır yüklü parçacıklar (protonlar,  $\alpha$  parçacıkları vb.) için bremsstrahlung emisyonu ile enerji kaybı, çarpışma kaybına kıyasla oldukça küçüktür ve genelde ihmal edilir.

### 2.4. Ağır Yüklü Parçacıktan Yörünge Elektronlarına Momentum ve Enerji Transferi

Ağır yüklü parçacıkların soğurucu bir ortamdaki enerji kaybı tanımlayan teori ilk 1931 yılında Niels Bohr tarafından önerildi (Podgoršak, 2015). Bohr'un proton gibi ağır yüklü parçacıkların kütle çarpışma durdurma gücünün klasik türevi, yörünge elektronları ile yüklü parçacıkların Coulomb etkileşimi sonucunda yüklü parçacığın momentum transferine  $\Delta p$  dayanmaktadır. Kütle  $M$  ve yükü  $ze$  olan ağır yüklü parçacık ile kütle  $m_e$  ve yükü  $e$  olan yörünge elektronu arasındaki Coulomb etkileşimi, şematik olarak Şekil 2.2'te gösterilmektedir. Burada,  $M$  pozitif yüklü parçacık olup ve  $M \gg m_e$  olduğu varsayılır.  $\Delta p$ 'nin büyüklüğü, Rutherford saçılmasına benzer olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta p = \int F_{\Delta p} dt = \int_{-\infty}^{\infty} F_{Coul} \cos \phi dt \quad (2.3)$$

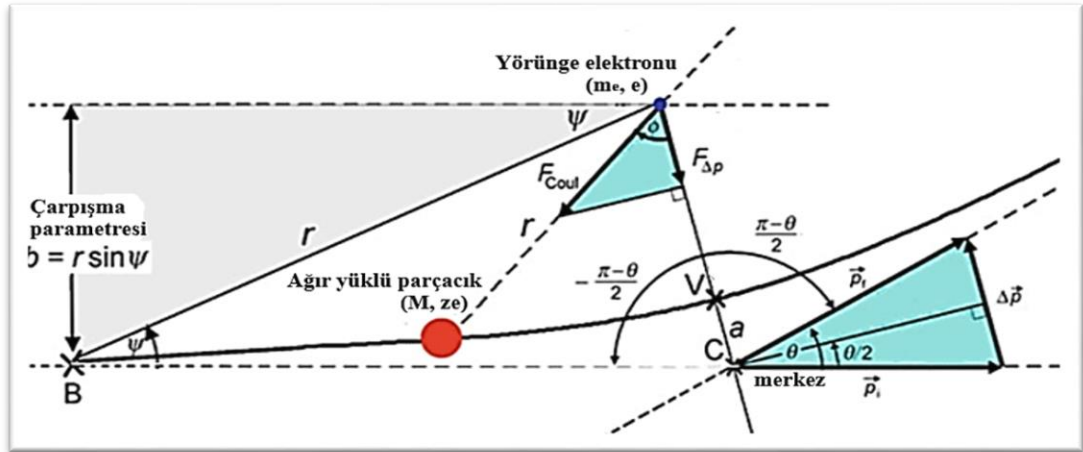
Ağır yüklü parçacık ( $ze$ ) ile yörüngesel elektron ( $-e$ ) arasındaki Coulomb kuvvetinin  $F_{coul}$  büyüklüğü aşağıdaki gibi verilir.

$$F_{coul} = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4, 2.3'deki yerine yerleştirilirse, momentum transferi  $\Delta p$  aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta p = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{\frac{\pi-\theta}{2}} \frac{\cos \phi}{r^2} \frac{dt}{d\phi} d\phi = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{\frac{\pi-\theta}{2}} \frac{\cos \phi}{r^2 w} d\phi \quad (2.5)$$

Burada  $\phi$ , Şekil 2.2'te gösterildiği gibi hiperbolün yarıçap vektörü  $r$  ile açıortay (eksen) arasındaki açıdır ve  $w$ ,  $w = \frac{d\phi}{dt} = \frac{v}{r}$  ile tanımlanan yüklü parçacığın açısal frekansıdır.



Şekil 2.2. M kütleye sahip pozitif yüklü ağır parçacık ile me kütleye sahip orbital elektron arasındaki çarpışmanın şematik diyagramı

Ağır yüklü parçacık ile yörünge elektronu arasındaki elastik çarpışma sonucunda açısal momentum  $L$ , genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$L = |\mathbf{L}| |\mathbf{r} \times \mathbf{M}\mathbf{v}| = r M v \sin \psi = M r^2 w \sin \psi \quad (2.6)$$

Burada,  $v$  ve  $\mathbf{v}$ , sırasıyla yüklü parçacığın hızı ve hız vektörü,  $\psi$  ise yarıçap vektörü  $\mathbf{r}$  ile hız vektörü  $\mathbf{v}$  arasındaki açıdır. Momentumun korunumu dikkate alarak,

hiperbolün üzerinde B ve V özel noktalar için 2.5 nolu ifadenin  $wr^2$  terimi çarpışma parametresi olan  $b$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$1) \text{ B noktası için } b = r \sin \psi \quad \Rightarrow \quad L_B = rMv \sin \psi = Mvb \quad (2.7)$$

$$2) \text{ V noktası için } b = r \sin \psi \quad \psi = 90^\circ \quad \sin(90^\circ) = 1 \\ \Rightarrow \quad L_V = rMv = Mwr^2$$

$$\text{Ancak momentum korunumundan, } L_B = L_V = L \quad \Rightarrow \quad Mvb = Mwr^2 \\ \Rightarrow \quad vb = wr^2 \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8, 2.5'deki yerine yerleştirilirse momentum transferi için aşağıdaki gibi bir ifade elde edilir.

$$\Delta p = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{\frac{\pi-\theta}{2}} \frac{\cos \phi}{r^2 w} d\phi = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{vb} \int_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{\frac{\pi-\theta}{2}} \cos \phi d\phi = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{vb} [\sin(\phi)]_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{\frac{\pi-\theta}{2}} = 2 \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{vb} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9,  $\Delta p$  için Rutherford ifadesiyle aynıdır. Bununla birlikte, durgun bir yörünge elektronu ile etkileşme yapan ağır yüklü parçacık, saçılma açısı  $\theta \approx 0$  için ( $\cos \frac{\theta}{2} \approx 1$ ) aşağıdaki gibi  $\Delta p$  için basit bir ifade elde edilir.

$$\Delta p = 2 \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{vb} \quad (2.10)$$

çarpışma parametresi  $b$  olan ağır yüklü parçacıktan tek bir etkileşimde yörünge elektronuna aktarılan enerji miktarı  $\Delta E(b)$  aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta E(b) = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = 2 \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2 b^2} \quad (2.11)$$

Burada,  $m_e$  elektronun durgun kütlesi ve  $v$  ağır yüklü parçacığın hızıdır. Yukarıda gösterilen 2.10 ve 2.11 nolu eşitliklerden, çarpışma parametresi  $b$  aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$b = 2 \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{z}{v \Delta p} = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{z}{v [\Delta E(b)]^{1/2}} \quad (2.12)$$

Yukarıdaki 2.1 eşitliği dikkate alarak, ağır yüklü parçacıklar için olası tüm çarpışmalar dahil edilerek kütle çarpışma durdurma gücü ( $S_{col}$ ) için aşağıdaki gibi bir ifade elde edilebilir.

$$\begin{aligned} S_{col} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = N_e \int \Delta E(b) d\sigma_{col} = N_e \int \Delta E(b) \frac{d\sigma_{col}}{db} db \\ &= N_e \int \Delta E(b) \frac{d\sigma_{col}}{d(\Delta E)} d(\Delta E) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Burada,  $N_e$  soğurucunun elektron yoğunluğu ( $N_e = \frac{ZN_A}{A}$ ),  $\frac{d\sigma_{col}}{db}$  ve  $\frac{d\sigma_{col}}{d(\Delta E)}$  çarpışma diferansiyel tesir kesitidir. Kütle çarpışma durdurma gücü  $S_{col}$ ,  $b_{min}$ 'den  $b_{max}$ 'a kadar değişen çarpışma parametresi  $b$  üzerinden, veya  $\Delta E_{min}$ 'den  $\Delta E_{max}$ 'a kadar değişen enerji transferi  $\Delta E(b)$  üzerinden, 2.13 nolu ifadenin integrasyonu ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$S_{col} = N_e \int_{b_{min}}^{b_{max}} \Delta E(b) \frac{d\sigma_{col}}{db} db \quad (2.14)$$

$$S_{col} = N_e \int_{\Delta E_{min}}^{\Delta E_{max}} \Delta E(b) \frac{d\sigma_{col}}{d(\Delta E)} d(\Delta E) \quad (2.15)$$

Daha önce 2.13'te gösterilen entegral, 0'dan  $\infty$ 'a kadar tüm olası çarpışma parametreleri üzerinden, veya 0'dan gelen yüklü parçacığın kinetik enerjisine ( $E_K$ ) kadar tüm olası enerji transferleri  $\Delta E$  üzerinden yapılabilir. Dolayısıyla, ağır yüklü parçacıktan atom çekirdeğine bağlı yörünge elektronlarına enerji transferini etkileyen iki fiziksel sınırlama hesaba katılmalıdır. Bunlar:

#### 2.4.1. Olası Minimum Enerji Transferi - $\Delta E_{min}$

Olası minimum enerji transferi, soğurucu atomların yörünge elektronlarının iyonlaşma ve uyarılma potansiyeli tarafından kontrol edilir. Enerji transferi  $\Delta E$  ile çarpışma parametresi  $b$  ters orantılı olduğundan (denk. 2.11), minimum enerji transferi

$\Delta E_{\min}$  maksimum çarpışma parametresi  $b_{\max}$  'a karşılık gelir.

#### 2.4.2. Olası Maksimum Enerji Transferi $\Delta E_{\max}$

Olası maksimum enerji transferi, ağır yüklü parçacık ile yörünge elektronları arasındaki kafa kafaya çarpışmalarda, etkileşen iki parçacığın kütleleri tarafından kontrol edilir. Ayrıca, transfer edilen enerji miktarı gelen parçacığın kinetik enerjisinden ( $E_K$ ) önemli ölçüde daha düşüktür.

#### 2.4.3. Minimum Enerji Transferi ve Ortalama Uyarma Enerjisi (I)

Çarpışma parametresinin  $b$  büyük değerleri için, 2.11 nolu ifadeden hesaplanan enerji transferi  $\Delta E(b)$  yörünge elektronunun bağlanma ve minimum uyarma enerjisinden daha küçük olabilir. Bu nedenle,  $b > b_{\max}$  durumlar için enerji transferi mümkün değildir. Burada,  $b_{\max}$  minimum enerji transferine  $\Delta E_{\min}$  karşılık gelir ve soğurucu atomun ortalama uyarma enerjisi  $I$  olarak ifade edilir. Ortalama uyarma enerjisi  $I$ , yüklü bir parçacık ile orbital elektronların arasındaki Coulomb etkileşmesinde ortalama olarak atoma transfer edilebilen minimum enerji miktarına karşılık gelir ve 2.11 nolu ifade dikkate alınarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta E_{\min} = 2\left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{Z^2}{m_e v^2 b_{\max}^2} = I \quad (2.16)$$

Yukarıda 2.16 nolu eşitlikte görüldüğü gibi, enerji transferi ile çarpışma parametresi birbirleri ile ters orantılıdır.

$$\Delta E_{\min} \propto \frac{1}{b_{\max}^2} \quad \text{veya} \quad b_{\max} \propto \frac{1}{\sqrt{\Delta E_{\min}}} = \frac{1}{\sqrt{I}}$$

Genel olarak, ortalama uyarma enerjisi  $I$ , atom teorisinden hesaplanamaz. Ancak, uygun bir durdurma gücü formülü kullanarak hesaplanan durdurma gücü verilerin, deneysel olarak ölçülen verilerle kıyaslanarak belirlenebilir. ICRU ve NIST tarafından kullanılması önerilen  $I$  değerleri atom numarasının bir fonksiyonu olarak şekil 2.3'te çizilmiştir. Şekil 2.3'te artan atom numarası  $Z$  ile  $I$  'nın artması görülmektedir. Ayrıca, soğurucunun atom numarasına göre, ortalama uyarma enerjisi hesaplamalarında kullanılabilecek aşağıdaki gibi üç ampirik denklem de

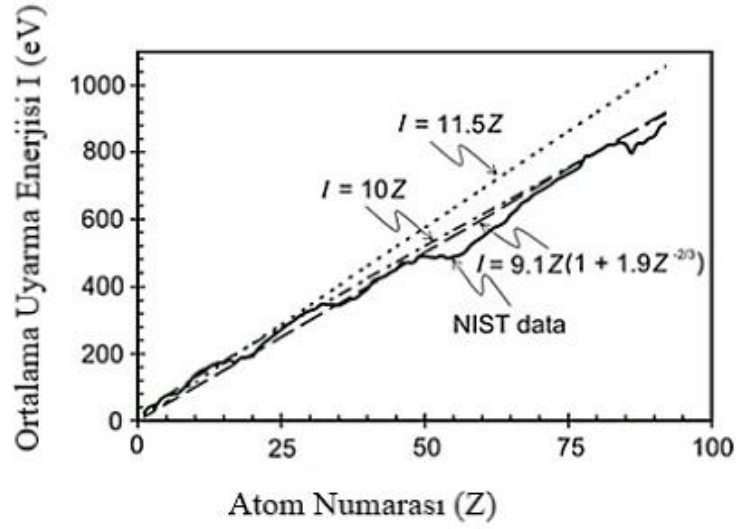
gösterilmektedir.

$$I(\text{eV}) = 11.5Z \quad Z < 15 \quad (2.17)$$

$$I(\text{eV}) = 10Z \quad Z > 15 \quad (2.18)$$

$$I(\text{eV}) = 9.1Z(1 + 1.9Z^{-2/3}) \quad (2.19)$$

Ortalama uyarma enerjisinin  $I$ , yalnızca soğurucu ortama bağlı olduğu, ancak soğurucu ortamla etkileşme yapan yüklü parçacığın tipine bağlı olmadığı 2.17, 2.18 ve 2.19 nolu ifadelerde görülmektedir.



Şekil 2.3. Hedef maddenin atom numarasına ( $Z$ ) karşı ortalama uyarma enerjisi  $I$

#### 2.4.4. Maksimum Enerji Transferi - $\Delta E_{\max}$

Çarpışma parametresinin  $b$  küçük değerleri için, tek bir kafa kafaya çarpışmada transfer edilebilen maksimum enerji  $\Delta E_{\max}$  klasik olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir. Kütlesi  $M$  ve kinetik enerjisi ( $E_K = \frac{1}{2}Mv^2$ ) olan ağır yüklü parçacığın, orbital elektronu ( $m_e$ ) ile arasındaki kafa kafaya çarpışmada,  $m_e \ll M$  olduğu varsayılarak, transfer edilebilen maksimum enerji  $\Delta E_{\max}$  aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta E_{\max} = \frac{4m_e M}{(m_e + M)^2} E_K \approx 4 \frac{m_e}{M} E_K = 4 \frac{m_e}{M} \frac{Mv^2}{2} = 2m_e v^2 \quad (2.20)$$

Yukarıda 2.20 eşitlik, tek bir çarpışmada ağır yüklü parçacığın kinetik enerjisinin yalnızca çok küçük bir miktarı ( $4\frac{m_e}{M}$ ) yörünge elektronuna aktarılabilceği göstermektedir. Daha önce 2.16 nolu ifadede gösterildiği gibi, çarpışma parametresi ile enerji transferi arasındaki bağlantı dikkate alarak, maksimum enerji transferi (denk. 2.20) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta E_{\max} = 2\left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2 b_{\min}^2} = 2m_e v^2 \quad (2.21)$$

Yukarıda 2.21 eşitlikten,  $\Delta E_{\max} \propto \frac{1}{b_{\min}^2}$  veya  $b_{\min} \propto \frac{1}{\sqrt{\Delta E_{\max}}}$  olduğu anlaşılmaktadır.

Ayrıca, rölativistik mekanikte, maksimum enerji transferi  $\Delta E_{\max}$ , durgun kütlesi  $M$  olan ağır yüklü bir parçacıktan, durgun kütlesi  $m_e$  olan yörünge elektronuna transfer edilen maksimum enerji aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta E_{\max} = 2m_e c^2 (\gamma^2 - 1) \frac{1}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2} \approx 2m_e c^2 \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \quad (2.22)$$

Burada,  $\beta$  ve  $\gamma$  aşağıdaki gibi verilir:

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \gamma^2 - 1 = \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \quad (2.23)$$

## 2.5. Bohr Çarpışma Durdurma Gücü

Daha önce 2.13 eşitliğinde verilen kütle çarpışma durdurma gücünün genel ifadesinin, çarpışma parametresi  $b$  veya enerji transferi  $\Delta E(b)$  üzerindeki entegrasyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S_{col} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = N_e \int \Delta E(b) d\sigma_{col} = 2\pi N_e \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \Delta E(b) b db \quad (2.24)$$

$$S_{col} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = N_e \int \Delta E(b) d\sigma_{col} = 2\pi N_e \int_{\Delta E_{\min}}^{\Delta E_{\max}} \Delta E(b) \frac{bdb}{d[\Delta E(b)]} d[\Delta E(b)] \quad (2.25)$$

Burada,  $N_e$  soğurucu ortamın elektron yoğunluğu ( $N_e = \frac{ZN_A}{A}$ ),  $Z$  ve  $A$  sırayla soğurucunun atom numarası ve kütle numarasıdır,  $d\sigma_{col}$  çarpışma ile enerji kaybının diferansiyel tesir kesitidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$d\sigma_{col} = 2\pi b db = 2\pi b \frac{db}{d[\Delta E(b)]} d[\Delta E(b)] \quad (2.26)$$

Yukarıda 2.12'de verilen  $b$ 'nin  $\Delta E(b)$ 'ye göre türevi alarak 2.26'deki yerine yerleştirilirse, çarpışma ile enerji kaybının diferansiyel tesir kesiti için aşağıdaki gibi bir ifade elde edilebilir.

$$\frac{db}{d[\Delta E(b)]} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{m_e}} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{z}{v} [\Delta E(b)]^{-3/2} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} d\sigma_{col} &= 2\pi b db = 2\pi b \frac{db}{d[\Delta E(b)]} d[\Delta E(b)] \\ &= 2\pi \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{z^2}{m_e v^2} \frac{d[\Delta E(b)]}{[\Delta E(b)]^2} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Yukarıdaki 2.11 ve 2.27 ifadeler, 2.24 nolu ifadeye dahil edilerek, kütle çarpışma durdurma gücü aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$S_{col} = 4\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \int_{b_{min}}^{b_{max}} \frac{db}{b} = 4\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \quad (2.29)$$

Benzer şekilde, 2.28 nolu ifadeyi, 2.25 nolu ifadeye dahil ederek, kütle çarpışma durdurma gücü için aşağıdaki gibi ikinci bir ifade elde edilebilir.

$$S_{col} = 2\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \int_{\Delta E_{min}}^{\Delta E_{max}} \frac{d[\Delta E(b)]}{[\Delta E(b)]} = 2\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \ln \frac{\Delta E_{max}}{\Delta E_{min}} \quad (2.30)$$

Dolayısıyla, 2.11 ile 2.12 ifadelerden,  $\frac{b_{\max}}{b_{\min}} = \sqrt{\frac{\Delta E_{\max}}{\Delta E_{\min}}}$  olduğu açıkça yazabiliriz.

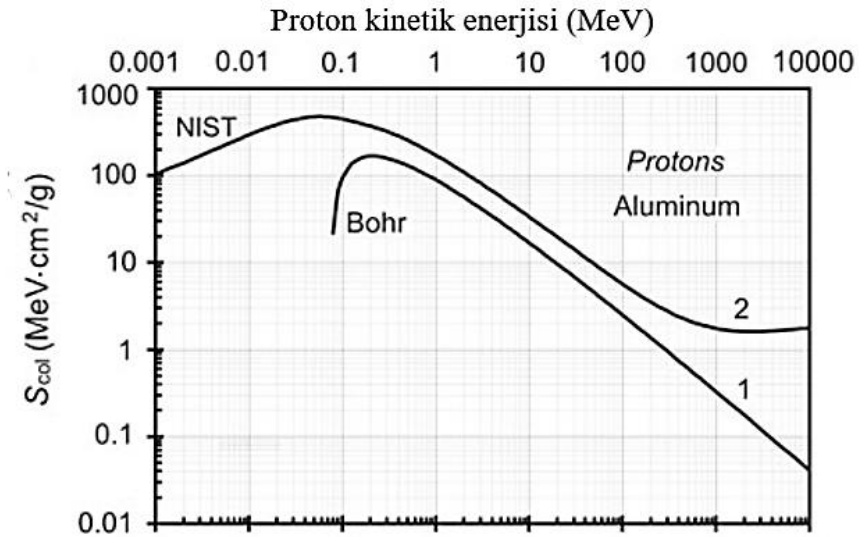
Yukarıdaki orantı dikkate alınarak, 2.29 nolu çarpışma durdurma gücü ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S_{col} = 4\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} = 4\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \ln \sqrt{\frac{\Delta E_{\max}}{\Delta E_{\min}}} \quad (2.31)$$

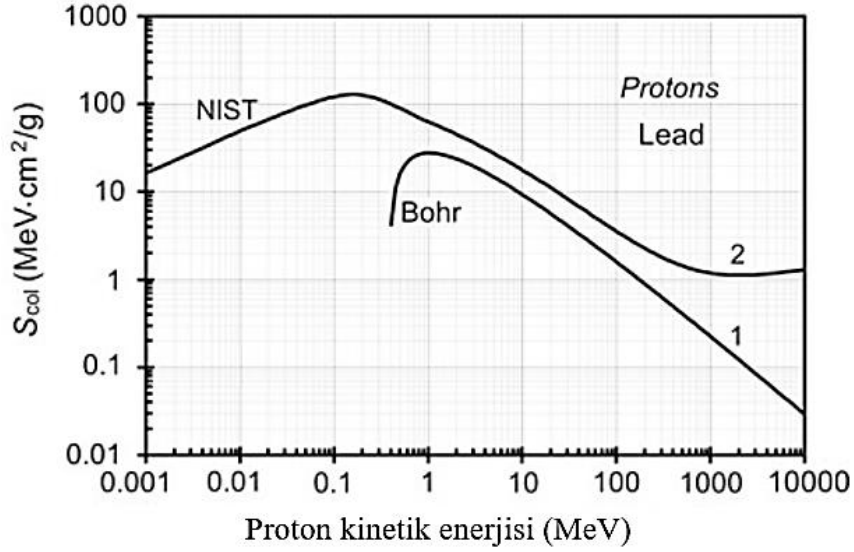
Daha önce gösterilen 2.16 ve 2.20 nolu ifadeler, 2.31 nolu ifadeye dahil edilerek, Niels Bohr tarafından 1913 yılında türetilen kütle çarpışma durdurma gücünün klasik ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$S_{col} = 2\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \ln \frac{2m_e v^2}{I} \quad (2.32)$$

Alüminyum ve kurşun için  $10^{-3}$  MeV ile  $10^4$  MeV kinetik enerji aralığında protonların kütle çarpışma durdurma gücü *Bohr'un* klasik ifadesi (denk. 2.32) kullanılarak elde edilen sonuçlar, NIST tarafından tablo haline getirilmiş olan veriler ile kıyaslanmıştır (şekil 2.4 ve 2.5).



Şekil 2.4. Alüminyum için protonların kütle çarpışma durdurma gücü



Şekil 2.5. Kurşun için protonların kütle çarpışma durdurma gücü

Şekil 2.4 ile 2.5 ‘te görüldüğü gibi:

- 1) Orta enerji aralığında ( $\sim 300$  keV ile  $\sim 100$  MeV), teorik (Bohr) ile deneysel sonuçlar (NIST) aynı eğilimleri sergilemektedirler. Ancak; deneysel sonuçlar, teorik sonuçları tutarlı bir şekilde 2 kat aşmaktadır.
- 2) Düşük ( $E_K < 300$  keV) ve yüksek ( $E_K > 100$  MeV) enerji aralığında, deneysel (NIST) ile teorik (Bohr) sonuçların arasındaki tutarsızlık önemli ölçüde daha büyüktür ve Bohr’un soğurucu ortamda yüklü parçacıkların durdurma gücü için gerçekçi bir tanım sağlamadığı açıkça göstermektedir. Bunun nedenleri, Bohr teorisinin, kuantum mekaniği ve görelilik etkileri görmezden gelmesi ve elektronun bağlanma etkilerini, ortalama iyonlaşma enerjisi ( $I$ ) yoluyla çok ilkel bir şekilde ele almasıdır.

## 2.6. Bethe Çarpışma Durdurma Gücü

Kuantum mekaniğinin ve göreceli fiziğin ortaya çıkmasıyla birlikte, birçok bilim insanı, yeni kavramları yeni geliştirilen teorilere dahil ederek Bohr’un çarpışma durdurma gücü teorisini geliştirmeye çalıştı. Bunlardan en önemlisi, 1930 yıllarında, kuantum mekaniği ve görelilik kavramlarına dayanan yeni bir çarpışma durdurma gücü teorisi, Bohr’un klasik teorisinin aksine, teorik ve deneysel veriler arasında mükemmel bir uyum sağlayan Hans Bethe ve Felix Bloch tarafından geliştirildi (Podgoršak, 2015). 1931 yılında Hans Bethe, bir soğurucudan geçen ve atomik yörünge elektronlarıyla çarpışarak ağır yüklü bir parçacığın enerji kaybını, Born yaklaşımını kullanarak hesapladı ve bunula ilgili bir teori önerdi. Bethe, bir yörünge

elektronuna olası enerji transferi olan  $\Delta E$  'yi yumuşak (uzak) ve sert (yakın) olarak iki kategoriye ayırdı. Yumuşak ile sert çarpışmalar arasındaki enerji sınırı olan  $\eta$ , açıkça tanımlanmadı. Ancak; yumuşak çarpışmalar için enerji transferi olan  $\Delta E$ ,  $\eta$ 'dan küçük ve sert çarpışmalar için  $\eta$ 'dan daha büyük olacak şekilde seçildi. Böylece,  $\eta$  atomik elektronların bağlanma enerjilerine kıyasla büyük, ancak aynı zamanda tüm sert çarpışmalara izin verecek kadar küçüktü. Bethe, yumuşak ve sert çarpışmalar için ortalama enerji kayıpları ayrı ayrı değerlendirdi ve yumuşak ile sert kütle çarpışma durdurma gücü için aşağıdaki ifadeleri elde etti.

$$S_{col}^{soft} = \left( -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)_{\Delta E < \eta}^{soft} = 2\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e \beta^2 c^2} \left\{ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \eta}{(1-\beta^2)I^2} - \beta^2 \right\} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} S_{col}^{hard} &= \left( -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)_{\Delta E > \eta}^{hard} = 2\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e \beta^2 c^2} \left\{ \ln \frac{\Delta E_{max}}{\eta} - \beta^2 \right\} \\ &= 2\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e \beta^2 c^2} \left\{ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{(1-\beta^2)\eta} - \beta^2 \right\} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Yukarıda verilen yumuşak çarpışma durdurma gücü ifadesi 2.33, tüm yüklü parçacık türleri (ağır ile hafif) için geçerliken, 2.34'te verilen sert çarpışma durdurma gücü ifadesi ise yalnızca ağır yüklü parçacıklar için geçerlidir. Daha önce, kütle çarpışma durdurma gücü, yumuşak ve sert kütle çarpışma durdurma güçlerinin toplamı olarak denklem 2.2'de ifade edilmiştir. Dolayısıyla, 2.2, 2.33 ve 2.34 nolu ifadeleri dikkate alarak toplam çarpışma durdurma gücü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} S_{col} &= S_{col}^{soft} + S_{col}^{hard} = 2\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e \beta^2 c^2} \left\{ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \eta}{(1-\beta^2)I^2} + \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{(1-\beta^2)\eta} - 2\beta^2 \right\} \\ &= 4\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{c^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e e^2 \beta^2} \left\{ \ln \frac{2m_e c^2}{I} + \ln \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - \beta^2 \right\} \\ &= C_0 \frac{z^2}{A\beta^2} Z \left\{ \ln \frac{2m_e c^2}{I} + \ln \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - \beta^2 \right\} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Burada,  $C_0$  çarpışma durdurma gücü sabitidir,  $r_e$  klasik elektronun yarıçapı olarak tanımlanır.

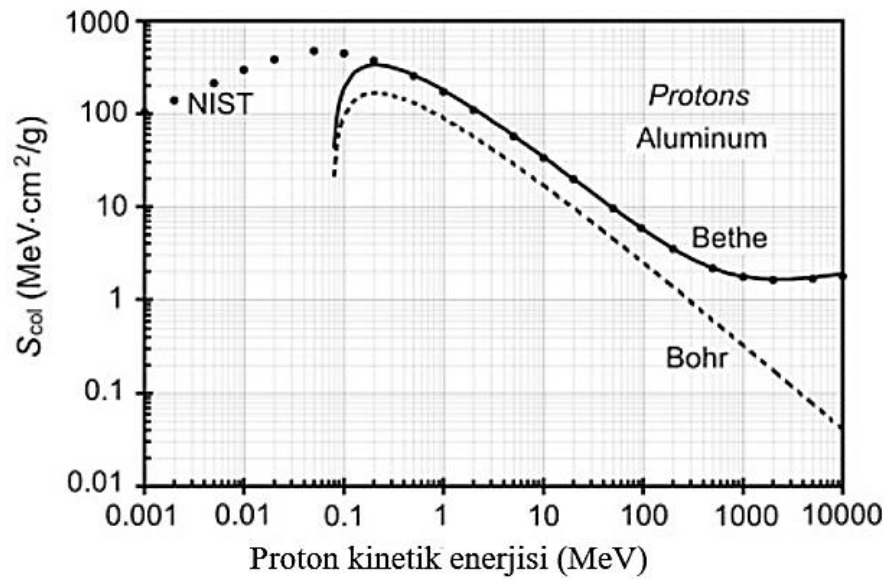
$$C_0 = 4\pi N_A \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{m_e c^2} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3071 \text{ MeV.cm}^2.\text{mol}^{-1}$$

$$r_e = \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \right) = 2.818 \text{ fm.}$$

Yukarıda gösterilen 2.35 eşitlik, Bethe kütle çarpışma durdurma gücü ifadesi olarak bilinir. Bu ifade, protonlar ve  $\alpha$ -parçacıkları gibi ağır yüklü parçacıklar için geçerli olup kuantum mekaniğinin yanı sıra görelilik etkileri de dikkate almaktadır. Klasik sınırdaki ( $v \ll c$ ) bu ifade aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} S_{col} &= 4\pi \frac{ZN_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v^2} \ln \frac{2m_e c^2}{I} \\ &= C_0 \frac{z^2 c^2}{Av^2} Z \ln \frac{2m_e c^2}{I} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Bohr (denk. 2.32) ile Bethe (denk. 2.35) ifadeleri kullanarak alüminyum için 1 keV ile 10 GeV enerji aralığında protonların kütle çarpışma durdurma gücü sonuçları, deneysel verilerle (NIST) karşılaştırılması şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Alüminyum için protonların kütle çarpışma durdurma gücü

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi, orta ve yüksek enerji aralığında, deney (NIST) ve Bethe teorisinin arasındaki uyum mükemmeldir. Ancak; düşük enerjilerde bu uyum kayıp olmuştur. Hem teori hem deneyselde, azalan enerjiyle durdurma gücünde bir tepe öngörür, ancak deneysel tepe daha yüksektir ve hesaplanan tepeden daha düşük kinetik enerjilerde görünmektedir. Açıktır ki, bu tutarsızlığa neden olan, hesaba katılmamış başka bir etki olmalıdır. Daha sonra tartışılacağı gibi, düşük kinetik enerjilerde bu tutarsızlığı açıklamak için Bethe teorisine iki düzeltme (kabuk düzeltmesi ile yoğunluk etkisi düzeltmesi) uygulanmaktadır. Düşük kinetik enerjilerdeki tutarsızlıktan bağımsız olarak, Bethe çarpışma durdurma gücü formülü, orta ve yüksek enerji bölgesinde deneysel verilerle uyumludur. Ayrıca, durdurma gücü eğrisinin şeklini açıkça öngörür ve bu eğriyi etkileyen, yüklü parçacık ve soğurucu ortamdır.

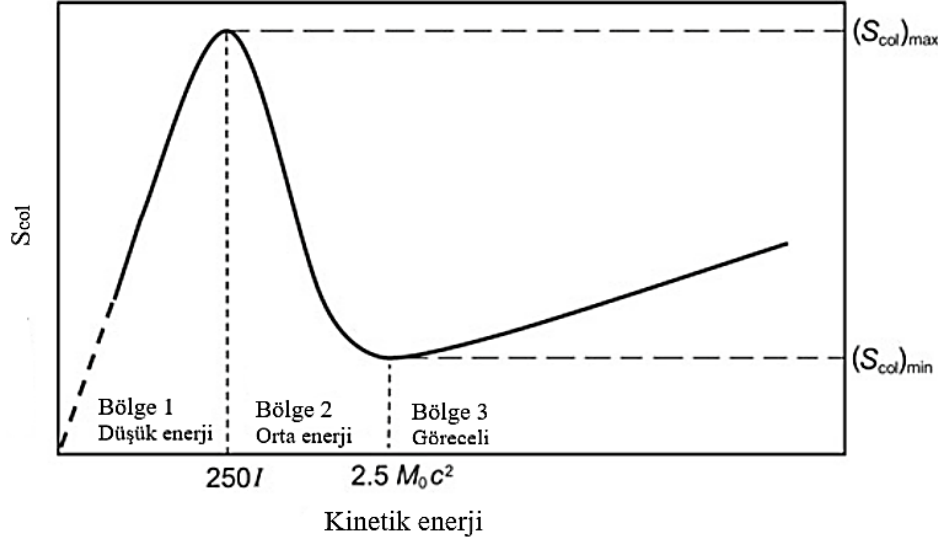
### 2.6.1. Bethe Kütle Çarpışma Durdurma Gücü Grafiği

Şekil 2.7’de şematik olarak gösterildiği gibi, ağır yüklü parçacığın kinetik enerjisine ( $E_K$ ) karşı çarpışma durdurma gücünün grafiği, artan kinetik enerji ile üç farklı bölgeden oluşmaktadır, bunlar:

**Bölge 1 :** Çok düşük kinetik enerjilerde, çarpışma durdurma gücü enerji ile yükselir ve bir tepeye ulaşır.

**Bölge 2 :** Orta kinetik enerjilerde, pikin ötesinde, çarpışma durdurma gücü,  $1/v^2$  veya  $1/E_K$  olarak geniş bir minimuma ulaşınca kadar azalır.

**Bölge 3 :** Rölativistik enerjilerde, geniş minimumun ötesinde, çarpışma durdurma gücü, rölativistik terimlerinin  $\{\ln \beta^2 - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2\}$  bir sonucu olarak artan kinetik enerji ile yavaşça artar.



Şekil 2.7. Yüklü parçacığın kinetik enerjisinin bir fonksiyonu olarak çarpışma durdurma gücünün grafiği

### 2.6.2. Bethe Çarpışma Durdurma Gücünün Bağımlılığı

Bethe kütle çarpışma durdurma gücü denklemi aşağıdaki gibi daha önce 2.35’de ifade edilmiştir.

$$S_{col} = C_0 \frac{z^2}{A\beta^2} Z \left\{ \ln \frac{2m_e c^2}{I} + \ln \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - \beta^2 \right\} \quad (2.37)$$

Görüldüğü gibi Bethe çarpışma durdurma gücü ifadesi (denk. 2.37) aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

**a) Parçacığın yükü ( $z^2$ ):** Çarpışma durdurma gücü, ağır yüklü parçacığın atom numarası veya yükünün karesi ile doğru orantılıdır. Örneğin, aynı hıza sahip olan döteryum ve proton için bir soğurucu ortamın kütle çarpışma durdurma gücünün aynı olacağı anlamına gelir ( $S_d(\beta) = S_p(\beta)$ ). Ancak, aynı hıza sahip olan  $\alpha$ -parçacığı ve proton için 4 kat kadar farklılık gösterirler ( $S_\alpha(\beta) = 4S_p(\beta)$ ).

**b) Parçacığın hızı ( $\beta$ ):** Düşük kinetik enerji bölgesinde, Bethe çarpışma durdurma gücü ifadesi (denk. 2.35), deney ile daha önce görüldüğü gibi herhangi bir uyum sağlamamaktadır. Orta enerji bölgesinde, çarpışma durdurma gücü  $1/v^2$  terimi tarafından kontrol edilir ve artan  $E_K$  ile hızla azalır. Rölativistik enerji bölgesinde ise, çarpışma durdurma gücü  $1/\beta^2$  ve  $\left\{ \ln \beta^2 - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right\}$  terimin sonucunda artan kinetik enerji ile yavaşça artar.

**c) Soğurucu ortam :** Kütle çarpışma durdurma gücü, soğurucu ortamın atom numarası ( $Z$ ) ile kütle numarası ( $A$ ) ve ortalama uyarma enerjisine ( $I$ ) iki terim şeklinde bağlıdır. İlk terim  $Z/A$  veya elektron yoğunluğudur ( $N_e = ZN_A/A$ ) ve ikinci terim  $(- \ln I)$ 'dir.  $Z/A$  terim, maddeden maddeye oldukça dar bir aralıkta değiştiğinden (düşük  $Z$  elementler için 0.5, yüksek  $Z$  elementler için  $\sim 0.4$ , hidrojen için 1) kütle çarpışma durdurma gücü maddeden maddeye çok fazla değişiklik göstermeyeceğini anlarız. Başka bir ifade ile,  $\text{g/cm}^2$  cinsinden eşit kalınlıktaki katmanlardan geçen belirli bir yüklü parçacığın enerji kaybı tüm maddeler için yaklaşık olarak aynı olacağı anlamına gelir. Dolayısıyla, belirli bir kinetik enerjiye sahip yüklü bir parçacık için, düşük atom numaralı soğurucunun kütle çarpışma durdurma gücünün, yüksek atom numaralı soğurucunun kütle çarpışma durdurma gücünden büyük olacağına dikkat edilmelidir.

### 2.6.3. Bethe Çarpışma Durdurma Gücü İfadesine Bazı Düzeltmeler

Bethe çarpışma durdurma gücü ifadesi (denk. 2.35), deneysel verilerle tam bir uyum içinde olmadığı daha önce tartışılmıştır. Uyuşmazlığı ortadan kladırarak amacıyla Bethe çarpışma durdurma gücü ifadesine aşağıdaki gibi çeşitli düzeltmeler getirilmiştir.

#### 2.6.3.1. Kabuk Düzeltmesi ( $C/Z$ )

Kabuk düzeltmesi, Bethe çarpışma durdurma gücü denkleminde olan düzeltme terimlerinden biridir. Born yaklaşımı, ağır yüklü parçacığın hızı, soğurucu ortamın atomik elektronlarının hızından çok daha büyük olduğunu varsayar. Yüksek kinetik enerjilerde bu varsayım doğrudur. Ancak; düşük enerjilerde bu varsayım geçersizdir. Yörünge elektronların hızları, yüklü parçacığın hızıyla karşılaştırılabilir hale geldiğinde, yüklü parçacıktan enerji transferindeki katkıları sona erir. Bu etki, düşük enerjilerde ortalama uyarma enerji değerlerinde ( $I$ ) büyük tahminler, Bethe denklemi ile hesaplanan çarpışma durdurma gücü değerlerinde ise küçük tahminlere neden olur. Kabuk düzeltme terimi olan  $C/Z$ , ortalama uyarma enerjisindeki aşırı tahminleri dikkate almak için tanıtıldı ve bununla ilgili çeşitli teoriler geliştirildi.  $K$  kabuğu elektronları, tüm yörünge elektronlarının en hızlısı olduğundan, düşük enerjili parçacıklardan ilk etkilenenlerdir. Kabuk düzeltmesi genellikle  $K$  kabuk düzeltmesi olarak ele alınır ( $C_K/Z$ ), ve olası tüm yüksek kabuk düzeltmeleri genellikle ihmal edilir. Kabuk düzeltmesi terimi olan  $C/Z$ , soğurucu ortamın ve yüklü parçacık hızının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, aynı ortam ve parçacık hızı için, elektronlar ve

pozitronlar da dahil tüm yüklü parçacıklar için aynıdır. Kabuk düzeltmesi hesaplamaları değişik yaklaşımlar kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımların hepsi yaklaşık olarak aynı sonuçlar verir ve durdurma gücü düzeltilmesinde etkilidir. Rölativistik olmayan kabuk düzeltmesi hesaplamalarında kullanılan en yaygın yaklaşımlar hidrojenik dalga fonksiyonları ve lokal yoğunluk yaklaşımıdır.

#### **a) Hidrojenik Dalga Fonksiyonları- HWF**

Bu yaklaşım, hidrojenik dalga fonksiyonları ile tanımlanan bireysel atom elektronları ile yüklü parçacıkların etkileşimleri dikkate alır. Pek çok araştırmacı, hidrojenik dalga fonksiyonları kullanarak rölativistik olmayan kabuk düzeltmesinin teorik tanımlarında bulunmuştur (Bohr, 1948; Walske, 1952; Fano, 1963; Khandelwal, 1968). Ancak; hidrojenik dalga fonksiyonları kullanarak en yaygın olarak kullanılan kabuk düzeltmeleri 1964 ve 1992 yılında Bichsel tarafından önerilmiştir. Bu tür kabuk düzeltmesi, doğrudan deneysel durdurma gücü değerlerinden faydalanarak elde edilir. Dolayısıyla, elde edilen düzeltmeler, hem doğruluğu bilinmeyen deneysel durdurma gücüne hem de kullanılan diğer düzeltmelere bağlıdır.

#### **b) Lokal Yoğunluk Yaklaşımı- LDA**

Bu yaklaşım, çeşitli yoğunluklardaki serbest gaz elektronları ile yüklü parçacıkların etkileşimleri dikkate alır. Kabuk düzeltmesinde kullanılan lokal yoğunluk yaklaşımı ilk olarak 1963 yılında Fano tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, önce bir parçacığın elektronik ortamdaki durdurma gücü hesaplanır ve sonra Bethe – Bloch durdurma gücü denklemi tersine çevirilerek kabuk düzeltmeleri elde edilir. Kabuk düzeltmesi ile ilgili ayrıntılı bilgiler için (bkz, SRIM Ziegler, 2008).

#### **2.6.3.2. Yoğunluk Etkisi Düzeltmesi ( $\delta$ )**

Yoğunluk etkisi düzeltmesi, Bethe çarpışma durdurma gücü denklemine olan ikinci bir düzeltme terimidir. Bu etki, yüklü parçacıklar madde içerisinde yollar boyunca, yoğun soğurucu atomları polarize ederek Coulomb etkileşimlerin (esnek etkileşimler) azalmasına neden olur. Böylece, gaz halindeki aynı soğurucu ortama kıyasla yoğun ortamın çarpışma durdurma gücü daha düşüktür. Ağır yüklü parçacıklar için yoğunluk düzeltmesi göreceli enerjilerde önemlidir ve orta ile düşük enerjilerde ihmal edilebilir. Ancak; elektron ve pozitronlar için tüm enerjilerde durdurma gücü denkleminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu etki, Bohr (1948) tarafından oldukça

ayrıntılı olarak tartışılmıştır ancak nicel bir teori ilk olarak Fermi (1940) tarafından geliştirilmiştir. Yüklü parçacıkların değişik ortamlarda iyonizasyon ile enerji kaybı için, yoğunluk etkisi düzeltilmesi, 1945 ile 1952 yıllarında Sternheimer tarafından ele alınmıştır. Yoğunluk düzeltilmesi hesaplamaları, 98 element ve 180 bileşik olmak üzere toplam 278 materyal için gerçekleştirilmiş olup tablo haline getirilmiştir (Sternheimer et al, 1984). Burada, Nümerik yöntemler kullanarak yoğunluk etkisi düzeltilmesi hesaplamaları aşağıdaki gibi 1945 ile 1952 yıllarında Sternheimer tarafından türetilen denklemlere dayanmaktadır.

$$\begin{aligned}
\delta(X) &= \delta(X_0) \times 10^{2(X-X_0)} & X < X_0 \\
\delta(X) &= 4.6052X + a(X_1 - X)^m + C & X_0 < X < X_1 \\
\delta(X) &= 4.6052X + C & X > X_1
\end{aligned} \quad (2.38)$$

$$X = \log_{10}(\beta\gamma) \quad C = -2 \ln\left(\frac{I}{\hbar\nu_p}\right) - 1 \quad \hbar\nu_p = 28.816 \sqrt{\frac{\rho Z}{A}} \quad (\text{eV})$$

Burada,  $\hbar\nu_p$  serbest elektronlar kabul ederek, ortamın elektronlarının plazma enerjisidir.  $\rho$ ,  $A$ ,  $Z$  ve  $I$  sırasıyla ortamın yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ ), kütle numarası, atom numarası ve ortalama uyarma enerjisidir.  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $a$  ve  $m$  ise katsayılar olup 278 materyal için tablo halinde ilgili referansta (Sternheimer et al, 1984) verilmektedirler. Yüklü parçacıkların değişik ortamlarda enerji kaybı için yoğunluk etkisi düzeltilmesi, 1956 yılında Fano tarafından da ele alınmıştır. Çok yüksek enerjilerde yoğunluk etkisi düzeltilmesi için aşağıdaki gibi asimtotik bir ifade tanıtılmıştır (Fano, 1956).

$$\delta = 2 \ln\left(\frac{\hbar\nu_p}{I}\right) + \ln(\beta^2 \gamma^2) - 1.0 \quad (2.39)$$

Kabuk düzeltilmesi ile yoğunluk etkisi düzeltilmesi dikkate alarak, ağır yüklü parçacıklar için Bethe çarpışma durdurma gücü denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S_{col} = 4\pi \frac{N_A}{A} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{m_e c^2 \beta^2} Z \left\{ \ln \frac{2m_e c^2}{I} + \ln \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \delta \right\} \quad (2.40)$$

Burada,  $C/Z$  ve  $\delta$  sırasıyla kabuk düzeltmesi ile yoğunluk etkisi düzeltmesidir. Diğer parametreler ( $Z$ ,  $A$ ,  $I$ ,  $\beta$  ve  $z$ ) daha önce tanımlanmıştır.

## 2.7. Ağır Yüklü Parçacıkların Çarpışma Durdurma Gücü Denklemleri

Değişik teorilere göre ağır yüklü parçacıklar için elde edilen çarpışma durdurma gücü denklemleri, değişik enerji aralığına göre aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$S_{col} = C_0 \frac{z^2}{\beta^2} \frac{Z}{A} B_{col} \quad (MeV.cm^2.g^{-1}) \quad (2.41)$$

Tablo 2.1. Ağır yüklü parçacıkların değişik teori ve enerji aralığına göre atom durdurma sayısının ( $B_{col}$ ) değişik ifadeleri

| Teori                                                                                          | Atom durdurma sayısı- $B_{col}$                                                                            |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Klasik (Bohr, 1913)                                                                            | $\left\{ \ln \sqrt{\frac{2m_e v^2}{I}} \right\}$                                                           | (2.42) |
| Göreceli olmayan kuantum mekaniği (Bethe, 1931)                                                | $\left\{ \ln \frac{2m_e v^2}{I} \right\}$                                                                  | (2.43) |
| Göreceli kuantum mekaniği (Bethe, 1931)                                                        | $\left\{ \ln \frac{2m_e c^2}{I} + \ln \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - \beta^2 \right\}$                        | (2.44) |
| Göreceli kuantum mekaniği, kabuk düzeltmesi ( $C/Z$ ), yoğunluk etkisi düzeltmesi ( $\delta$ ) | $\left\{ \ln \frac{2m_e c^2}{I} + \ln \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \delta \right\}$ | (2.45) |

## 2.8. Hafif Yüklü Parçacıkların Çarpışma Durdurma Gücü

Tek bir çarpışmada, hafif yüklü parçacıklardan atomik elektronlara olası enerji transferi  $Q$ , yumuşak ile sert çarpışmalar arasında bir enerji transferi sınırı  $\eta$  tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, yumuşak (uzak) çarpışmalar için  $Q < \eta$ , sert (yakın) çarpışmalar için ise  $Q > \eta$  olarak belirlenmektedir. Enerji transferi sınırı olan  $\eta$  aşağıdaki koşullara tabi tutulmaktadır:

(a) Atomik elektronların bağlanma enerjisinden büyük olmalı.

(b)  $\eta$  mertebesinde ve daha düşük enerji transferi için yeterince küçük olmalıdır.

Yeterince yüksek hıza sahip parçacıklar için, bu koşulların her ikisini de karşılayan bir

$\eta$  değeri bulmak mümkündür ( $10^4$  ile  $10^5$  eV). Dolayısıyla, iki tür çarpışma (yakın ile uzak) için ortalama enerji kaybı artık ayrı ayrı ele alınabilmektedir.

$Q < \eta$  'ye karşılık gelen uzak çarpışmalar için enerji kaybı, atomun tüm uyarılma olasılıkları toplayarak elde edilir. Bethe tarafından türetilen yakın çarpışma ile enerji kaybı (birim cm başına enerji kaybı) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{Q < \eta} = \frac{2\pi n(ze^2)^2}{m\beta^2 c^2} \left[ \ln \frac{2m\beta^2 c^2 \eta}{(1-\beta^2)I^2} - \beta^2 \right] \quad (2.46)$$

Burada,  $ze$  nüfuz eden parçacığın yükü,  $\beta = v/c$ ,  $n$  ortamın  $\text{cm}^3$  başına elektron sayısı,  $m$  elektron kütlesi ve  $I$  ortamın ortalama uyarılma enerjisidir.  $\eta$  için öngörülen koşullar nedeniyle, 2.46 nolu ifade elektronlar ve pozitronlar dahil tüm yüklü parçacıklar için geçerlidir.  $Q$  ile  $dQ$  arasında, ortamın serbest elektronlarına enerji transferi için diferansiyel tesir kesitinin ifadeleri, elektronlar için 1932 yılında Moller tarafından (denk. 2.47), pozitronlar için 1936 yılında Bhabha tarafından (denk. 2.48) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$d\sigma = \frac{2\pi e^4}{m\beta^2 c^2} \frac{dQ}{Q^2} \left[ 1 + \left( \frac{Q}{E_k - Q} \right)^2 + \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)^2 \left( \frac{Q}{E_k} \right)^2 - \frac{2\gamma - 1}{\gamma^2} \left( \frac{Q}{E_k - Q} \right) \right] \quad (2.47)$$

$$d\sigma = \frac{2\pi e^4}{m\beta^2 c^2} \frac{dQ}{Q^2} \left[ \begin{aligned} & 1 - \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{Q}{E_k} + \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)^2 \left( \frac{Q}{E_k} \right)^2 \\ & - \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \left( \frac{Q}{E_k} \right) \left\{ \frac{\gamma + 2}{\gamma} - 2 \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \left( \frac{Q}{E_k} \right) + \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)^2 \left( \frac{Q}{E_k} \right)^2 \right\} \\ & + \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)^2 \left( \frac{Q}{E_k} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\gamma} + \frac{3}{2\gamma^2} - \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)^2 \frac{Q}{E_k} \left( 1 - \frac{Q}{E_k} \right) \right\} \end{aligned} \right] \quad (2.48)$$

Burada,  $E_k$  elektron veya pozitronların kinetik enerjisi ( $E_k = mc^2(\gamma - 1)$  ve  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ). Benzer şekilde, sert çarpışmalar ( $Q > \eta$ ) için, birim cm başına enerji kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{Q > \eta} = n \int_{\eta}^{Q_{\max}} Q d\sigma \quad (2.49)$$

Burada, pozitronlar için  $Q_{\max}=E_k$  ve elektronlar için  $Q_{\max}=E_k/2$  olarak ifade edilir. 2.47 ile 2.48 nolu denklemlerde elektronlar ve pozitronlar için verilen diferansiyel tesir kesitleri, 2.49'deki yerine yerleştirilerek Rohrlich ve Carlson tarafından 1954 yılında birim cm başına enerji kaybı için aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Q>\eta} = \frac{2\pi ne^4}{m\beta^2 c^2} \left[ \ln \frac{E_k}{4\eta} + 1 - \frac{2\gamma-1}{\gamma^2} \ln 2 + \frac{1}{8} \left( \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)^2 \right] \text{ (Elektronlar)} \quad (2.50)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Q>\eta} = \frac{2\pi ne^4}{m\beta^2 c^2} \left[ \ln \frac{E_k}{4\eta} - \frac{\beta^2}{12} \left\{ 11 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3} \right\} \right] \text{ (Pozitronlar)} \quad (2.51)$$

Uzak ( $Q < \eta$ ) ile yakın ( $Q>\eta$ ) çarpışmaları dikkate alarak, birim cm başına toplam enerji kaybı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Q<\eta} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Q>\eta} \quad (2.52)$$

Eşitlikler 2.46, 2.50 ve 2.51, 2.52'deki yerine yerleştirilerek elektronlar ve pozitronlar için birim yol başına toplam enerji kaybı için aşağıdaki ifadeler elde edilebilir.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_e = \frac{2\pi ne^4}{m\beta^2 c^2} \left[ \ln \frac{E_k^2 (\gamma+1)}{2I^2} + (1-\beta^2) - \frac{2\gamma-1}{\gamma^2} \ln 2 + \frac{1}{8} \left( \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)^2 \right] \quad (2.53)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_p = \frac{2\pi ne^4}{m\beta^2 c^2} \left[ \ln \frac{2E_k^2 (\gamma+1)}{I^2} - \frac{\beta^2}{12} \left\{ 23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3} \right\} \right] \quad (2.54)$$

Burada,  $\frac{m\beta^2 c^2}{1-\beta^2} = mc^2 (\gamma^2 - 1) = E_k (\gamma+1)$  olarak alınmıştır.

## 2.9. Radyatif Durdurma Gücü

Larmor bağıntısında gösterildiği gibi, yüklü bir parçacığın hızlandırıldığı veya

yavaşlatıldığında kinetik enerjisinin bir kısmı bremsstrahlung fotonları olarak yayılmaktadır. Bremsstrahlung, yalnızca yüklü bir parçacık ile soğurucu ortamın atom çekirdeği arasındaki inelastik Coulomb etkileşimleriyle meydana gelmektedir. Burada, Coulomb etkileşmesinden kaynaklanan parçacık ivmesi  $\alpha$ , Newton'un ikinci kanununa göre, Coulomb kuvveti ile eşitlenerek aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$ma = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad a \sim \frac{zZe^2}{m} \quad (2.55)$$

Hızlandırılmış yüklü bir parçacık tarafından Bremsstrahlung fotonların yayılma hızı veya yoğunluğu P, aşağıdaki gibi Larmor klasik bağıntısından elde edilebilir.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{q^2 a^2}{c^3} \quad (2.56)$$

Denklem 2.56'de görüldüğü gibi, Bremsstrahlung yoğunluğu, hem parçacık yükünün karesi  $q^2$  hem de ivmesinin karesi  $a^2$  ile doğrudan orantılıdır. Ayrıca, denklem 2.55'de görüldüğü gibi, bremsstrahlung yayılma hızı,  $(zZ)^2$  ile doğru  $m^2$  ile ise ters orantılıdır. Burada,  $z$  ile  $Z$  parçacık ve hedefin atom numarası,  $m$  ise parçacığın kütlesidir. Dolayısıyla, protonlar ve  $\alpha$  parçacıkları gibi ağır yüklü parçacıkların Bremsstrahlung yoğunluğu, elektron ve pozitronlar gibi hafif yüklü parçacıklara kıyasla önemsizdir ve genellikle ihmal edilebilir.

### 2.9.1. Bremsstrahlung Tesir Kesiti ile Radyatif Durdurma Gücü

Bremsstrahlung yayılma tesir kesitinin  $\sigma_{rad}$ , klasik ve kuantum teorisinde aynı forma sahip olduğu 1930 yılında Hans Bethe ve Walter Heitler tarafından aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$\sigma_{rad} \propto \alpha r_e^2 Z^2 \quad (\text{cm}^2/\text{çekirdek}) \quad (2.57)$$

Burada,  $\alpha$ : ince yapı sabiti [ $\alpha = e^2 / (4\pi\epsilon_0 \hbar c) = 1/137$ ],  $Z$ : Soğurucu hedefin atom numarası,  $r_e$ : klasik elektron yarıçapı [ $r_e = e^2 / (4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2.818 \text{ fm}$ ].

Soğurucu bir ortamdan geçen hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar) tarafından Bremsstrahlung emisyonu ile enerji kaybı, genellikle aşağıdaki gibi kütle

radyatif durdurma gücü  $S_{rad}$  ile ifade edilir.

$$S_{rad} = N_a \sigma_{rad} E_i \quad (2.58)$$

Burada,  $N_a$  : Birim kütle başına atom sayısı ( $N_a = N_A / A$ ),  $N_A$  : Avogadro sayısı ( $6.02 \times 10^{23}$  atom/mol),  $A$  : Soğurucu ortamın kütle numarası,  $\sigma_{rad}$  : Tablo 2.2’de verilen değişik enerji aralığı için Bremsstrahlung üretimin toplam tesir kesiti,  $E_i$  : Hafif yüklü parçacığın toplam enerjisi ( $E_i = (E_K)_0 + m_e c^2$ ),  $(E_K)_0$  : Hafif yüklü parçacığın başlangıçtaki kinetik enerjisidir.

Tablo 2.2. Elektron ve pozitronların değişik kinetik enerji aralığı için  $\sigma_{rad}$  ve  $B_{rad}$  değerleri

| Enerji Aralığı                                                                      | $\sigma_{rad} (cm^2 / \text{Çekirdek})$                                                  | $B_{rad} = \sigma_{rad} / (\alpha r_e^2 Z^2)$                           |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------|
| Göreceli olmayan<br>( $E_K)_0 \ll m_e c^2$                                          | $\frac{16}{3} \alpha r_e^2 Z^2$                                                          | $\frac{16}{3}$                                                          | (2.59) |
| Göreceli<br>( $E_K)_0 \approx m_e c^2$                                              | Karmaşık güç serisi                                                                      | -                                                                       | (2.60) |
| Yüksek göreceli<br>$m_e c^2 \ll (E_K)_0 \ll \frac{m_e c^2}{\alpha Z^{\frac{1}{3}}}$ | $8 \alpha r_e^2 Z^2 \left[ \ln \left( \frac{E_i}{m_e c^2} \right) - \frac{1}{6} \right]$ | $8 \left[ \ln \left( \frac{E_i}{m_e c^2} \right) - \frac{1}{6} \right]$ | (2.61) |
| Aşırı göreceli<br>( $E_K)_0 \gg \frac{m_e c^2}{\alpha Z^{\frac{1}{3}}}$             | $4 \alpha r_e^2 Z^2 \left[ \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{18} \right]$       | $4 \left[ \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{18} \right]$       | (2.62) |

$N_a$  ve  $\sigma_{rad}$  terimler, 2.58 nolu ifadedeki yerine yerleştirilirse kütle radyatif durdurma gücü için aşağıdaki gibi bir ifade elde edilebilir.

$$S_{rad} = \alpha r_e^2 Z^2 \frac{N_A}{A} E_i B_{rad} \quad (2.63)$$

Eşitlik 2.63’de kütle radyatif durdurma gücü aşağıdaki terimler ile orantılı olduğu görülmektedir:

1)  $N_A Z^2 / A$ : Hidrojen hariç tüm atomlar için  $Z / A \approx 0.5$  olduğu için  $S_{rad}$  soğurucu ortamın atom numarası ( $Z$ ) ile orantılıdır. Dolayısıyla, soğurucunun atom numarası  $Z$

ne kadar yüksekse, Bremsstrahlung ile enerji kaybı ( radyatif durdurma gücü) da o kadar yüksektir.

2)  $E_i$  : Hafif yüklü parçacıkların toplam enerjisi.

3)  $B_{rad}$  parametresi (enerjiye göre değerleri tablo 2.3’de verilmiştir).

Tablo 2.3. Hafif yüklü parçacıkların değişik enerjilerine göre  $B_{rad}$  değerleri

| Kinetik Enerji | Klasik | 1 MeV | 10 MeV | 100 MeV |
|----------------|--------|-------|--------|---------|
| $B_{rad}$      | ~5.3   | ~6    | ~10    | ~15     |

### 2.9.2. Radyasyon Uzunluğu ile Radyatif Durdurma Gücü

Yüksek enerjili elektronlar ile fotonların bir maddeden geçerken, o maddenin kalınlığını, radyasyon uzunluğu birimlerinde ölçmek daha uygundur. Yüksek enerjili elektronlar, maddeyi geçerken enerjisini ağırlıklı olarak Bremsstrahlung ile, yüksek enerjili fotonlar ise çifti üretimi ( $e^+e^-$ ) ile kaybederler. Bu ilgili etkileşimler için katedilen madde kalınlığı, genellikle  $\text{g.cm}^{-2}$  ile ölçülen radyasyon uzunluğu  $X_0$  olarak adlandırılır. Radyasyon uzunluğu, bir başka ifade ile, yüksek enerjili bir elektronun bremsstrahlung yoluyla enerjisinin  $1/e$  (% 63.2) azaldığı ortalama mesafedir. Malzemelerin (dedektörlerin) kalınlığı genellikle radyasyon uzunluğu biriminde verilmektedir. Bu sayede mesafe başına radyasyon kaybı maddeden bağımsız hale gelir.

Radyatif durdurma gücü hesaplamaları için kullanılabilen yöntem ile ilgili analitik denklemler, 1974 yılında Tsai tarafından ifade edilmiştir. Bu yöntemde, yüksek enerjilerde radyatif durdurma gücü hesaplamaları için, radyasyon uzunluğu dikkate alarak aşağıdaki gibi ifadeler elde edilmiştir (Tsai, 1974).

$$S_{rad} = \left( -\frac{dE}{\rho dx} \right)_{rad} = \frac{E}{X_0(Z)} \quad (\text{MeV.cm}^2.\text{g}^{-1}) \quad (2.64)$$

Burada,  $E$  gelen elektron veya pozitronun MeV cinsinden kinetik enerjisi,  $X_0$  radyasyon uzunluğu olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$X_0(Z) = 716.405A / \left[ Z^2(L_{rad} - f(Z)) + ZL'_{rad} \right] \quad (\text{g/cm}^2) \quad (2.65)$$

Burada, Z: hedef materyalin atom numarası, f(z) ): atom numarasına bağlı olarak değişen bir fonksiyon olup aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$f(Z) = a^2 \left[ (1+a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369a^2 + 0.0083a^4 - 0.002a^6 \right] \quad (2.66)$$

$$a = \alpha Z$$

Burada,  $\alpha$  ince yapı sabitidir ( $\alpha = 1/137.03599911$ ),  $L_{rad}$  ve  $L'_{rad}$  atom numarasına bağlı olarak değişen bir sabit olup tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Hedef maddenin atom numarasına göre  $L_{rad}$  ve  $L'_{rad}$  değerleri

| Element  | Z  | $L_{rad}$                       | $L'_{rad}$                     |
|----------|----|---------------------------------|--------------------------------|
| H        | 1  | 5.31                            | 6.144                          |
| He       | 2  | 4.79                            | 5.621                          |
| Li       | 3  | 4.74                            | 5.805                          |
| Be       | 4  | 4.71                            | 5.924                          |
| Diğerler | >4 | $L_{rad} = \ln(184.15Z^{-1/3})$ | $L'_{rad} = \ln(1194Z^{-2/3})$ |

### 2.9.3. Çarpışma Durdurma Gücü ile Radyatif Durdurma Gücü Oranı

Daha önce gösterildiği gibi, elektronlar ile pozitronlar gibi hafif yüklü parçacıklar tarafından üretilen Bremsstrahlung miktarı önemlidir. Üretilen Bremsstrahlung miktarı, eşit hıza sahip olan yüklü parçacığın kütlesinin ters karesi ile orantılıdır. Bethe ile Heitler teorisi dikkate alarak 1955 yılında Evans tarafından radyatif durdurma gücü için aşağıdaki gibi bir ifade türetilmiştir.

$$\left(-\frac{dE}{\rho dx}\right)_{rad} = \sigma_0 \frac{N_A Z^2}{A} (E + m_e c^2) \overline{B_r} \quad (2.67)$$

Burada,  $\sigma_0 = \frac{1}{137} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2}\right)^2 = 5.80 \times 10^{-28} \text{ cm}^2/\text{atom}$ , E: MeV biriminde parçacığın kinetik enerjisi,  $\overline{B_r}$  : enerji ve atom numarası (Z) ile yavaş değişen bir fonksiyon olup aşağıdaki gibi enerji aralığına göre bazı değerleri verilmiştir.

$$\begin{aligned}\overline{B_r} &= \frac{16}{3} \quad (E \ll 0.5 \text{ MeV}) & \overline{B_r} &= 6 \quad (E \approx 1.0 \text{ MeV}) \\ \overline{B_r} &= 12 \quad (E \approx 10 \text{ MeV}) & \overline{B_r} &= 15 \quad (E \approx 100 \text{ MeV})\end{aligned}$$

Yukarıda 2.67 ve 2.35 eşitliklerde, radyatif durdurma gücü  $Z^2$  ile orantılı olduğu, çarpışma durdurma gücü ise  $Z$  ile orantılı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, ikisinin (çarpışma ile radyatif durdurma gücü) oranlarının  $Z$  ile orantılı olması beklenir. Ayrıca, 2.67 nolu ifadede de görüldüğü gibi, radyatif durdurma gücü  $E + m_e c^2$  ile veya  $E \gg m_e c^2$  olması durumunda  $E$  ile orantılıdır.  $E \gg m_e c^2$  için çarpışma durdurma gücü enerjinin bir fonksiyonu olarak yavaşça değişmektedir. Dolayısıyla, radyatif durdurma gücünün çarpışma durdurma gücüne olan oranı, yüksek enerjilerde enerji ile tamamen orantılı olacaktır. Bu oran aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{\left(-\frac{dE}{\rho dx}\right)_{rad}}{\left(-\frac{dE}{\rho dx}\right)_{col}} \cong \frac{EZ}{n} \quad (2.68)$$

Burada,  $E$ : parçacığın MeV biriminde kinetik enerjisi,  $Z$ : hedef maddenin atom numarası,  $n$ : hedef maddeye göre değişen bir sabit olup genelde 700 veya 800 MeV olarak alınabilmektedir (Attix, 2008).

## 2.10. Toplam Kütle Durdurma Gücü

Genel olarak, bir soğrucunun toplam kütle durdurma gücü ( $S_{tot}$ ), aşağıdaki gibi (denk. 2.69) iki bileşenin toplamı ile verilmektedir. Bunlar, kütle radyatif durdurma gücü ( $S_{rad}$ ) ve kütle çarpışma durdurma gücüdür ( $S_{col}$ ).

$$S_{tot} = S_{rad} + S_{col} \quad (2.69)$$

Ağır yüklü parçacıkların radyatif durdurma gücü ihmal edilebilir ( $S_{rad} \approx 0$ ). Dolayısıyla, ağır yüklü parçacıklar için  $S_{tot} = S_{col}$  olarak verilmektedir. Hafif yüklü parçacıklar için, her iki bileşen toplam durdurma gücüne katkıda bulunurlar. 10 MeV'den düşük enerjiler için çarpışma ile enerji kaybı baskındır ( $S_{col} > S_{rad}$ ). Ancak, yüksek kinetik enerjilerde durum tersine döner ve radyasyon ile enerji kaybı daha baskındır ( $S_{rad} > S_{col}$ ).

### 2.11. Ortalama Uyarma Enerjisi-I

Ortalama uyarma enerjisi  $I$ , durdurma gücü ifadesinin temel bir parametresidir. Ortalama uyarma enerjisinin doğru değerleri, atomun, molekülün veya ilgilenilen katının spesifik elektronik yapısını hesaba katarak elde edilebilir. Değişik materyaller için, ortalama uyarma enerjisinin hesaplamalarında kullanılan yöntemlerin çoğu yarı deneysel yöntemlerdir. Bu yöntemlerde kullanılan veriler iki kaynaktan elde edilebilir. Protonlar ve alfa parçacıkları için durdurma gücü ile menzil ölçümlerinden, fotonlar için etkileşme tesir kesitlerinden elde edilebilen dielektrik-tepki fonksiyonları (katılar için) ve osilatör-güç dağılımından (gazlar için) elde edilebilir.

Gazlar için, osilatör-güç verileri kullanarak, ortalama uyarma enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Berger and Seltzer, 1982).

$$\ln I = \frac{\int_0^\infty \frac{df}{dE} \ln E dE}{\int_0^\infty \frac{df}{dE} dE} \quad (2.70)$$

Burada,  $df/dE$ , taban durumunun üzerindeki birim uyarma enerjisi başına optik dipol osilatör kuvvetinin yoğunluğudur.

Lindhard ve Scharff tarafından 1953 yılında geliştirilen yerel plazma yaklaşımı (LPA) dikkate alarak, gazlar için ortalama uyarma enerjisi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\ln I = \left(\frac{1}{Z}\right) \int_0^\infty 4\pi r^2 n_0(r) \ln(\gamma \hbar \omega_0) dr \quad (2.71)$$
$$\omega_0 = \left( \frac{4\pi e^2 n_0(r)}{m} \right)^{1/2}$$

Burada,  $\omega_0$  çekirdekten  $r$  uzaklıkta olan elektron yoğunluğuna  $n(r)$  karşılık gelen plazma frekansı,  $\hbar = h/2\pi$  ( $h$  planck sabiti),  $\gamma$  serbest bir parametredir ( $\gamma = \sqrt{2}$ ).

Optik dipol osilatör gücü dağılımlarının kullanımı, ortamdaki elektronların konumları arasında yalnızca zayıf bir korelasyon bulunan seyreltik gazlar için geçerlidir. Yoğun materyaller için ortalama uyarma enerjisi, ortamın dielektrik-tepki fonksiyonu  $\epsilon(w)$  cinsinden aşağıdaki gibi alternatif bir denklemden elde edilmiştir (Fano, 1956, 1963).

$$\ln I = \left( \frac{2}{\pi \omega_p^2} \right) \int_0^\infty d\omega \omega \operatorname{Im} \left[ -\frac{1}{\epsilon(\omega)} \right] \ln(\hbar \omega) \quad (2.72)$$

$$\hbar \omega_p = \left( \frac{4\pi \hbar^2 e^2 n_e}{m} \right)^{1/2} = 28.816 (\rho Z / A)^{1/2} \text{ eV}$$

Burada,  $\omega_p$  plazma frekansı,  $\hbar \omega_p$  plazma enerjisi,  $n_e$  birim hacim başına toplam elektron sayısı ve  $e$  elektronun yüküdür.

## 2.12. Bileşikler için Durdurma Gücü ile İlgili Parametreler

Bileşikler için durdurma gücü ve ortalama uyarma enerjisi hesaplamaları, ilk 1905 yılında Bragg ve Kleeman tarafından incelenmiştir. Bir bileşiğin çarpışma durdurma gücü, bileşiğin atomik bileşenlerinin durdurma güçlerinin ağırlıklı toplamı ile yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir. Bileşikler için kütle çarpışma durdurma gücü, Bragg ve Kleeman toplama kuralı kullanarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{1}{\rho} S_{col} = \sum_j w_j \frac{1}{\rho} S_{col,j} \quad (2.73)$$

$Z/A$ ,  $I$  ve  $\delta$  gibi durdurma gücü denkleminde yer alan parametreler için Bragg ve Kleeman toplama kuralı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$Z / A = \sum_j w_j (Z_j / A_j) \quad (2.74)$$

$$\ln(I) = \frac{\sum_j W_j (Z_j / A_j) \ln(I_j)}{\sum_j W_j (Z_j / A_j)} \quad (2.75)$$

$$\delta = \left[ \frac{\sum_j W_j (Z_j / A_j) \delta_j}{\sum_j W_j (Z_j / A_j)} \right] \quad (2.76)$$

Burada,  $W_j$ ,  $j$ 'nci atomik bileşenin ağırlık kesri,  $Z_j$ ,  $A_j$ ,  $I_j$  ve  $\delta_j$   $j$ 'nci bileşenin sırasıyla atom numarası, kütle numarası, ortalama uyarma enerjisi ve yoğunluk etkisi düzeltme terimidir.

### 2.13. Radyasyon Verimi-Y

Radyasyon verimi  $Y(E_0)$ , bir soğurucuya çarpan başlangıç kinetik enerjisi  $E_0$  olan hafif yüklü bir parçacığın soğurucu içinde yavaşlanarak durana kadar başlangıç enerjisinin Bremsstrahlung enerjisine dönüşen kesri olarak tanımlanır. Yayılan enerji  $E_{rad}$ , genellikle bremsstrahlung fotonları şeklinde yayılır. Yayılan enerji sadece Bremsstrahlung fotonları değil, aynı zamanda uçuş sırasında pozitronun yok olma olayına takiben yok olma fotonları olarak ve atomun uyarma ve iyonlaşma olaylarını takiben karakteristik x-ışınları olarak da yayılabilir.

Genelde, radyasyon verimi hesaplamalarında pozitronların yok olma fotonları ile karakteristik x-ışın fotonları ihmal edilir.

Ağır yüklü parçacıklar için radyasyon durdurma gücü ihmal edilebildiğinden ( $S_{rad} \approx 0$ ) radyasyon verimi  $Y(E_0) \approx 0$ . Hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar) için radyasyon verimi  $Y(E_0)$ , durdurma gücü verilerinden aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$Y(E_0) = \frac{\int_0^{E_0} \frac{S_{rad}(E)}{S_{tot}(E)} dE}{\int_0^{E_0} dE} = \frac{1}{(E_0)} \int_0^{E_0} \frac{S_{rad}(E)}{S_{tot}(E)} dE \quad (2.77)$$

Pozitron etkileşmelerinde uçuş sırasında pozitronların yok olma olayına takiben, yok olma fotonları, pozitron enerjisi tamamen tükenmeden önce yayılabilir. Dolayısıyla, radyasyon verimi iki katkının toplamıdır. Bunlar, Bremsstrahlung verimi  $Y_B(E_0)$  ve uçuş sırasındaki yok olma kesri  $Y_A(E_0)$ 'dir. Ancak; uçuş sırasında yok olma kesri Bremsstrahlung kesrinden çok daha küçük olduğundan radyasyon verimi  $Y(E_0)$  hesaplamalarında genellikle ihmal edilir. Dolayısıyla, "Bremsstrahlung verimi" terimi genellikle toplam radyasyon verimi tanımlamak için yanlıştır. 2.77 nolu ifade dikkate alarak yüklü parçacık başına, radyasyon ile enerji kaybı  $E_{rad}$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E_{rad} = (E_0).Y(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{S_{rad}(E)}{S_{tot}(E)} dE \quad (2.78)$$

Böylece, yüklü parçacık başına, çarpışma ile enerji kaybı  $E_{col}$  aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E_{col} = (E_0) - E_{rad} = (E_0) \cdot (1 - Y(E_0)) = \int_0^{E_0} \frac{S_{col}(E)}{S_{tot}(E)} dE \quad (2.79)$$

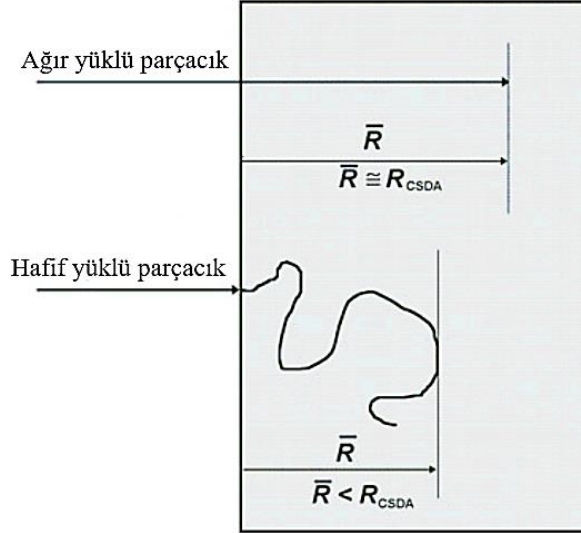
#### 2.14. Yüklü Parçacıkların Menzili-R

Belirli bir soğurucu ortamda yüklü bir parçacığın menzili R, parçacığın nüfuz edebileceği bir soğurucu kalınlığını ifade eden deneysel bir kavramdır. Menzil, Parçacığın kinetik enerjisine, kütesine ile yüküne ve soğurucu ortamın bileşimine bağlıdır. Maddeyi geçerken yüklü parçacıklar, çarpışma (uyarma ile iyonlaşma) ve radyasyon ile enerjilerini kaybederken bu parçacıkların geliş doğrultusunda önemli sapmalar meydana gelebilir. Ayrıca, yüklü parçacıklar elastik saçılmanın bir sonucu olarak çok sayıda sapmaya maruz kalırlar. Bu saçılma etkileri, ağır yüklü parçacıklara kıyasla, hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar) için çok daha belirgindir (şekil 2.8) çünkü;

1) Ağır yüklü parçacıklar, radyasyon ile enerji kaybı yaşamazlar. Bu parçacıklar, bireysel iyonlaştırıcı çarpışmalarda sadece küçük miktarlarda enerji aktarır ve elastik çarpışmalarda küçük açı sapmalarına maruz kalırlar. Şekil 2.8’de şematik olarak gösterildiği gibi, soğurucu bir ortamdan geçen yolları bu nedenle doğrusaldır.

2) Kinetik enerjisi  $E_0$  olan hafif yüklü parçacıklar ( elektronlar ve pozitronlar) bireysel iyonlaştırıcı çarpışmalarda  $1/2 E_0$ ’ya kadar, bireysel radyasyon çarpışmalarında ise  $E_K$ ’ya kadar enerji kaybedebilirler. Dolayısıyla, bu parçacıklar çok büyük saçılma açılarıyla sapmaktadırlar. Şekil 2.8’de şematik olarak gösterildiği gibi, soğurucu ortamdan geçen yolları çok kıvrımlıdır. Yüklü parçacıkların madde içinden geçerken kat ettikleri mesafe ile ilgili çeşitli tanımlar öne sürülmüştür. Bunlar:

- a) **Yol Uzunluğu:** Yüklü bir parçacığın yol uzunluğu, parçacığın gerçek yörüngesi boyunca hareket yönünden bağımsız olarak durana kadar kat ettiği toplam mesafedir.
- b) **Öngörülen Menzil:** Parçacık yönüne yansıtılan ayrı ayrı yol uzunlukların toplamıdır. Ayrıca, menzil ile ilgili çok çeşitli tanımlar bulunmaktadır, CSDA menzil  $R_{CSDA}$ , maksimum menzil  $R_{max}$ , % 50 menzil  $R_{50}$  ve pratik menzil  $R_p$  dir.



Şekil 2.8. Soğurucu ortamdaki yüklü parçacıkların takip ettiği yol (üst : ağır yüklü parçacıklar, alt: hafif yüklü parçacıklar)

#### 2.14.1. CSDA Menzil (RCSDA)

Hafif yüklü parçacığın soğurucu bir ortama, çarpışma ve radyasyon ile enerji aktarımı yalnızca küçük miktarlar halinde ayrı ayrı gerçekleşir. Soğurucu bir ortamda hareket eden yüklü bir parçacık, genellikle kinetik enerjisini kademeli ve sürekli olarak kaybettiği düşünülmüştür ve bu süreç “Sürekli yavaşlanma yaklaşımı - CSDA” olarak adlandırılmıştır. 1983 yılında Berger ve Seltzer tarafından hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar) için CSDA menzil konsepti tanıtılarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$R_{CSDA} = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_{tot}(E)} \quad (2.80)$$

Burada,  $R_{CSDA}$ : yüklü parçacığın CSDA menzili ( $g/cm^2$ ),  $E_0$  : yüklü parçacığın başlangıç kinetik enerjisi (MeV) ve  $S_{tot}$  : yüklü parçacığın toplam kütle durdurma gücüdür ( $MeV.cm^2.g^{-1}$ ).

CSDA menzil, parçacığın yörüngesi boyunca ortalama yol uzunluğu temsil etmektedir. Ancak; soğurucu ortamda belirli bir yöndeki penetrasyon derinliği temsil etmesi mümkün değildir. Ağır yüklü parçacıkların ortamdaki doğrusal yolları nedeniyle, CSDA menzil ( $R_{CSDA}$ ) ile ortalama menzil ( $\bar{R}$ ) birbirine çok yakındırlar. Hafif yüklü parçacıklar için CSDA menzil ( $R_{CSDA}$ ), ortalama menzilin  $\bar{R}$  iki katına kadar çıkabilmektedir.

Daha önce tartışıldığı gibi, hafif yüklü parçacıkların soğurucu bir ortamdaki enerji kaybı, çarpışma ve radyasyon ile gerçekleşmektedir. Ancak; ağır yüklü parçacıklar için radyasyon ile enerji kaybı çok küçüktür ve genelde ihmal edilebilir ( $S_{rad} \approx 0$ ). Dolayısıyla, ağır yüklü parçacıklar için toplam durdurma gücü  $S_{tot} = S_{col}$  olarak ifade edilebilir. Buna göre, ağır yüklü parçacıklar için CSDA menzil aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$R_{CSDA} = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_{col}(E)} \quad (2.81)$$

#### 2.14.2. Maksimum Penetrasyon Derinliği

Maksimum penetrasyon derinliği  $R_{max}$ , soğurucu ortamın ötesinde hiçbir parçacığın nüfuz etmediği gözlemlenen derinlik olarak tanımlanır.

Ağır yüklü parçacıklar için ve tüm soğurucu ortamlar için  $R_{max} \approx R_{CSDA}$ . Ancak; hafif yüklü parçacıklar için  $R_{max}$  ile  $R_{CSDA}$  arasındaki ilişki soğurucu ortamın atom numarası ( $Z$ ) ile değişir. Düşük  $Z$ 'li soğurucular için  $R_{max}/R_{CSDA} \approx 1$ , bu oran artan  $Z$  ile azalarak yüksek  $Z$ 'li soğurucular için  $R_{max}/R_{CSDA} \approx 0.5$ 'e kadar düşmektedir.

#### 2.15. Ortalama Çarpışma Durdurma Gücü

Radyasyon dozimetrisinde asıl ilgi, çarpışma ile yüklü parçacıktan soğurucu ortamın birim kütlesi başına soğurulan enerjidir. Pratikte mevcut olan radyasyon demeti (elektronlar) spektrum halinde ( $d\phi/dE$ ) olur. Ancak; belirli bir elektron demeti spektrumu yerine yalnızca tek enerjili elektronlarla karakterize etmek genellikle daha uygundur. Örneğin, bir soğurucu ortamda başlangıç kinetik enerjisi ( $E_0$ ) ile harekete geçirilen monoenerjetik elektronlar, yavaşlama yoluyla ortamdaki enerjileri ( $E_0$ )'dan sıfıra kadar değişen bir elektron spektrumu üretecektir.

Elektron spektrumu  $d\phi(E)/dE$ , olası sert çarpışmaları göz ardı edildiğinde aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{d\phi(E)}{dE} = \frac{N}{S_{tot}(E)} \quad (2.82)$$

Burada, N: soğurucu ortamda birim kütle başına üretilen  $E_0$  kinteik enerjili monoenerjitik elektron sayısıdır.  $S_{tot}$  : toplam durdurma gücüdür.

Monoenerjitik elektronlar tarafından ve 2.82’de verilen elektron spektrumu için ortalama çarpışma durdurma gücü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\overline{S_{col}}(E_0) = \frac{\int_0^{E_0} \frac{d\phi}{dE} S_{col}(E) dE}{\int_0^{E_0} \frac{d\phi}{dE}(E) dE} \quad (2.83)$$

Yukarıda 2.82 eşitliğin, 0’dan  $E_0$ ’a kadar integrali alınarak.

$$\int_0^{E_0} \frac{d\phi}{dE}(E) dE = N \cdot \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_{tot}(E)} \quad (2.84)$$

Eşitlikler 2.77, 2.80 ve 2.82 dikkate alınır, 2.83 eşitliğin pay ile paydası aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \int_0^{E_0} \frac{d\phi}{dE} S_{col}(E) dE &= N \cdot \int_0^{E_0} \frac{S_{col}(E)}{S_{tot}(E)} dE = N \cdot \int_0^{E_0} \frac{S_{tot}(E) - S_{rad}(E)}{S_{tot}(E)} dE \\ &= N \cdot (E_0) - N \cdot (E_0) \cdot Y(E_0) \end{aligned} \quad (2.85)$$

$$\int_0^{E_0} \frac{d\phi}{dE}(E) dE = N \cdot \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_{tot}(E)} = N \cdot R_{CSDA} \quad (2.86)$$

Eşitlikler 2.85 ve 2.86, 2.83’deki yerine yerleştirilirse ortalama çarpışma durdurma gücü için aşağıdaki gibi bir ifade elde edilebilir (Podgoršak, 2015).

$$\overline{S_{col}}(E_0) = E_0 \left[ \frac{1 - Y(E_0)}{R_{CSDA}} \right] \quad (2.87)$$

## 2.16. Sürekli Yavaşlanma Yaklaşımında Soğrulan Doz

Son derece basitleştirilmiş bir model olarak, radyal olarak dışa doğru hareket eden ve durdurma gücü  $S_{tot}(E)$ 'ye göre sürekli yavaşlayan monoenerjetik elektronlar yayan izotropik bir nokta kaynak düşünelim. Kaynak başına soğrulan doz aşağıdaki gibi verilir.

$$D(r) = \frac{S_{tot}(E)}{4\pi\rho r^2} \quad (2.88)$$

Burada,  $S_{tot}$ : toplam durdurma gücü,  $\rho$ : ortamın yoğunluğu ve  $r$  : orijinde bulunan kaynaktan olan mesafe olup aşağıdaki gibi verilir (Prestwich, 1989)

$$r = \int_{E(r)}^{E_0} \frac{dE}{S_{tot}(E)} \quad (2.89)$$

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Medikal fizik ve radyasyon fiziğinde, elektron ve pozitronlar gibi hafif yüklü parçacıklardan ortama enerji transferi çok önemli olduğu koşkusuzdur. Radyoterapideki doz hesaplamaları, genellikle su veya doku eşdeğeri olan materyaller üzerinde elektron ve pozitronların etkileşmelerini karakterize eden durdurma gücü ve menzil hesaplamaları ile gerçekleştirilmektedir. Literatürde, durdurma gücü ile menzil hesaplamaları yapan birçok program bulunmaktadır ve bunların en yaygını ESTAR ve PENELOPE'dir. Bu çalışmada, MATLAB programlama dili (MATLAB App Designer) kullanarak, elektron ve pozitronların değişik ortamlarda durdurma gücü ile menzil hesaplamaları yapan MEPSAR isimli bir paket program geliştirildi. Ayrıca, geliştirilen paket programı (MEPSAR) kullanarak, bazı polimer jeller (MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT) için elektron ve pozitronların durdurma gücü ile menzil hesaplamaları gerçekleştirildi. Bu çalışmada ise, EGSnrc ile PENELOPE simülasyon programları kullanarak yukarıda bahsi geçen polimer jellerin bazı radyolojik özellikleri (kütle azalım katsayısı, etkileşme tesir kesitleri...vb) araştırıldı.

#### 3.1. MEPSAR

MEPSAR Paket programın geliştirilmesinde durdurma gücü, menzil ve ilgili diğer parametrelerin hesaplamaları için aşağıdaki modeller ile ilgili analitik ve sayısal ifadeler kullanıldı.

##### 3.1.1. Toplam Kütle Durdurma Gücü-Stot

Toplam kütle durdurma gücü (  $S_{tot}$  ) hesaplamalarında, aşağıdaki gibi kütle radyasyon durdurma gücü (  $S_{rad}$  ) ile kütle çarpışma durdurma gücünün (  $S_{col}$  ) toplamı ile elde edildi (Podgoršak, 2015).

$$S_{tot} = S_{rad} + S_{col} \quad (3.1)$$

##### 3.1.2. Kütle Çarpışma Durdurma Gücü-Scol

Kütle çarpışma durdurma gücü hesaplamalarında, gelen parçacığın (elektron veya pozitron) enerjisine göre aşağıda gösterilen modeller dikkate alındı .

##### 3.1.2.1. Düşük Enerji Aralığında Kütle Çarpışma Durdurma Gücü

Düşük enerji aralığında, elektron ve poiztronların kütle çarpışma durdurma gücü ( $\text{MeV.cm}^2.\text{g}^{-1}$ ), hedef materyalin etkin yükü ve etkin ortalama iyonlaşma enerjisi ile elektronun etkin yükü dikkate alarak aşağıdaki gibi denk. 3.2 ile ifade edilmiştir (*Rohrlich and Carlson, 1954; Sugiyama, 1985; Gümüş, 2005*).

$$S_{col} = \left(-\frac{dE}{\rho dx}\right)_{col} = k \frac{z^* Z^*}{A\beta^2} \left\{ \ln\left(\frac{E}{I^*}\right) + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\tau}{2}\right) + F^\mp(\tau)/2 - \delta/2 \right\} \quad (3.2)$$

### 3.1.2.2. Orta ve Yüksek Enerji Aralığında Kütle Çarpışma Durdurma Gücü

Orta ve yüksek enerji aralığında, elektron ve pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü ( $\text{MeV.cm}^2.\text{g}^{-1}$ ) aşağıdaki gibi denk. 3.3 ile ifade edilmiştir (*Berger and Seltzer, 1982*).

$$S_{col} = k \frac{z^2 Z}{A\beta^2} \left\{ \ln\left(\frac{T}{I}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\tau}{2}\right) + F^\pm(\tau)/2 - \delta/2 \right\} \quad (3.3)$$

Burada,  $k = 4\pi r_e^2 N_a m c^2 = 0.307075 \text{ MeV.cm}^2.\text{mol}^{-1}$ ,  $\beta$  gelen parçacığın hızının ( $v$ ) ışık hızına oranıdır ( $\beta = v/c$ ).  $\tau$  gelen elektron veya pozitronun durgun kütle birimi cinsinden kinetik enerjisidir,  $E$  gelen parçacığın kinetik enerjisi,  $A$  hedef materyalin kütle numarası,  $Z^*$  hedef materyalin etkin ayükü,  $I^*$  hedef materyalin etkin iyonlaşma enerjisi,  $z^*$  gelen parçacığın etkin yükü,  $mc^2$  elektron veya pozitron durgun kütle enerjisi ( $mc^2 = 0.511\text{MeV}$ ).  $F(\tau)$  Enerjiye bağlı bir fonksiyon olup elektronlar (-) ve pozitronlar (+) için aşağıdaki gibi denk. 3.4 ve 3.5 ile verilmiştir.

$$F^-(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{1}{(1+\tau)^2} \left[ \frac{\tau^2}{8} - (2\tau+1)\ln(2) \right] \quad (3.4)$$

$$F^+(\tau) = 2\ln(2) - \frac{\beta^2}{12} \left[ 23 + \frac{14}{(\tau+2)} + \frac{10}{(\tau+2)^2} + \frac{4}{(\tau+2)^3} \right] \quad (3.5)$$

### 3.1.3. Hedef Materyalin Etkin Yükü Belirlenmesi- $Z^*$

Elektron veya pozitronların enerji kaybı süreçlerinde hedef atomun etkin atom numarası aşağıdaki gibi denk. 3.6 ile ifade edilmiştir (*Gümüş, 2008*).

$$Z^* = Zb^2 \frac{(3x_c + b)}{(x_c + b)^3} \quad (3.6)$$

Burada,  $Z$  hedef atomun atom numarası,  $b$  hedef atomun electron yoğunluğunu

normalize eden bir sabittir ( $b=(8/\pi)^{2/3}$ ),  $x_c$  sıyırma (stripping) uzunluğu veya kritik uzunluk olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi denk. 3.7 ile ifade edilmiştir (Cabrera-Trujillo et al, 1997).

$$x_c = -2\left(\frac{b}{3}\right) + \frac{\left(\frac{b}{3}\right)^2}{\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a\left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{1/3}} + \left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a\left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{1/3} \quad (3.7)$$

$$a = \frac{1}{0.606474} \frac{b^2 v_0^2 Z^{4/3}}{\beta^2 c^2} \quad (3.8)$$

Burada,  $v_0$  Bohr hızı ( $2.18 \times 10^6$  m/s),  $c$  ışık hızı ( $2.99792458 \times 10^8$  m/s),  $\beta$  gelen parçacığın hızının ( $v$ ) ışık hızına oranıdır ( $\beta = v/c$ ).

#### 3.1.4. Hedef Materyalin Etkin Uyarma Enerjisinin Belirlenmesi-I\*

Tietz perdelenme fonksiyonu dikkate alarak hedef materyalin etkin iyonlaşma enerjisi ( $I^*$ ) aşağıdaki gibi denk. 3.9 ile ifade edilmiştir (Tufan et al, 2005).

$$I^* = 2R_\infty \gamma Z c_0^{-3/2} \exp(\alpha) \text{ (eV)} \quad (3.9)$$

Burada,  $R_\infty$  Rydberg sabiti (13.605 eV),  $c_0 = 6064741718$ ,  $\gamma = 0.0955736531/Z$  (eV/Z) ve  $\alpha$  ise bir sabit olup aşağıdaki gibi denk. 3.10 ile ifade edilmiştir.

$$\alpha = \frac{Z}{2Z^*} \frac{1}{(x_c + b)^3} \left[ x_c^2 (x_c + 3b) \ln(x_c) + x_c (x_c + b)b + x_c (\ln 6 - 2)3b^2 + b^3 \left( \ln 6 - \frac{10}{3} \right) \right. \\ \left. + (3x_c + b)b^2 \ln \left( \frac{b^2}{(x_c + b)^4} \right) - (x_c + b)^3 \ln(x_c + b) \right] \quad (3.10)$$

#### 3.1.5. Gelen Parçacığın Etkin Yüğü Belirlenmesi-z\*

Gelen elektron veya pozitronların etkin yükü hesaplamalarında aşağıdaki gibi Sygiuama'nın yarı deneysel ifadesi (denk. 3.11) kullanıldı (Sugiyama, 1985).

$$z^* = 1 - \exp(-2200\beta^{1.78}) \quad (3.11)$$

### 3.1.6. Bileşiklerin Atom Numarası (Zbileşik), Kütle Kumarası (Abileşik) ve Uyarma Enerjisi (Ibileşik) Belirlenmesi

Bileşiklerin kütle çarpışma ve kütle radyatif durdurma gücü hesaplamalarında kullanılan bileşiklerin atom numarası ( $Z_{\text{bileşik}}$ ), kütle numarası ( $A_{\text{bileşik}}$ ) ve ortalama uyarma enerjisi ( $I_{\text{bileşik}}$ ), element bileşimleri dikkate alarak aşağıdaki gibi Bragg-kleeman toplama kuralları (denk 3.12, 3.13 ve 3.14) kullanarak gerçekleştirildi (Bragg and Kleeman, 1905; Berger and Seltzer, 1982).

$$A_{\text{compound}} = \sum_i W_i (A_i) \quad (3.12)$$

$$Z_{\text{compound}} = \left[ \frac{\sum_i (W_i / A_i) Z_i^2}{\sum_i (W_i / A_i) Z_i} \right] \quad (3.13)$$

$$I_{\text{compound}} = \exp \left[ \frac{\sum_i W_i (Z_i / A_i) \ln(I_i)}{\sum_i W_i (Z_i / A_i)} \right] \quad (3.14)$$

Burada,  $W_i$ ,  $Z_i$ ,  $A_i$  ve  $I_i$ , bileşik hedefteki  $i$  elementin sırasıyla ağırlık oranı, atom numarası, kütle numarası ve ortalama uyarma enerjisidir.

### 3.1.7. Yoğunluk Etkisi Düzeltmesi- $\delta$

Yüksek enerji aralığında, kütle çarpışma durdurma gücü denkleminde uygulanan yoğunluk etkisi düzeltmesi için, aşağıdaki gibi 1956 yılında Fano tarafından önerilen asimptotik bir formül (denk. 3.15) kullanıldı (Fano, 1956; Groom and Klein, 2000).

$$\delta = 2 \ln \left( \frac{\hbar \omega_p}{I} \right) + \ln(\beta^2 \gamma^2) - 1.0 \quad (3.15)$$

Burada,  $\hbar \omega_p$  plazma enerjisi ( $\hbar \omega_p = 28.816 \sqrt{\frac{\rho Z}{A}}$  (eV) ),  $\gamma$  Lorentz faktörü (

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ ),  $\rho$  hedef materyalin yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.1.8. Kütle Radyatif Durdurma Gücü-Srad

Elektron ve pozitronların kütle radyatif durdurma gücü hesaplamalarında, kütle

radyatif durdurma gücünün çarpışma durdurma gücüne olan oranı dikkate alan 1938 yılında Bhabha tarafından önerilen bir bağıntı (denk. 3.16) kullanıldı (Bhabha, 1938; Evans, 1955).

$$\frac{S_{rad}}{S_{col}} = \frac{\left(-\frac{dE}{\rho dx}\right)_{rad}}{\left(-\frac{dE}{\rho dx}\right)_{col}} = \frac{EZ}{n} \quad (3.16)$$

Burada Z: hedef maddenin atom numarası, E: MeV cinsinden gelen elektron veya pozitronun kinetik enerjisi ve n, 700 ile 800 MeV arasında değer alan bir sabittir.

### 3.1.9. CSDA Menzil-R

Elektron ve pozitronların menzil hesaplamalarında, sürekli yavaşlama yaklaşımı (CSDA) dikkate alarak aşağıdaki gibi 1982 yılında Berger ve Seltzer tarafından önerilen ifade (denk. 3.17) kullanıldı (Berger and Seltzerl,1982).

$$R_{CSDA} = \int_0^E \frac{dE}{S_{tot}} \quad (3.17)$$

### 3.1.10. CSDA Radyasyon Verimi-Y

Elektron ve pozitronların radyasyon verimi hesaplamalarında, sürekli yavaşlanma yaklaşımı (CSDA) dikkate alarak aşağıdaki gibi 1982 yılında Berger ve Seltzer tarafından önerilen ifade (denk. 3.17) kullanıldı (Berger and Seltzerl,1982).

$$Y(E) = \frac{1}{E} \int_0^E \frac{S_{rad}(E)}{S_{tot}(E)} dE \quad (3.18)$$

### 3.1.11. Soğrulan Doz-D

Soğrulan doz hesaplamalarında, sürekli yavaşlanma yaklaşımı dikkate alarak, elektron veya pozitronlardan kaynaklanan kaynak bozunması başına soğrulan doz aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Prestwich et al,1989)

$$D(r) = \frac{S_{tot}}{4\pi\rho r^2} \text{ (MeV/g)} \quad (3.19)$$

$$r = \int_{E(r)}^{E_0} \frac{dE}{S_{tot}} \quad (\text{g/cm}^2) \quad (3.20)$$

Burada,  $S_{tot}$  toplam durdurma gücü (MeV/cm),  $\rho$  ortamın yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ ),  $E_0$  kaynak enerjisi (MeV),  $r$  kaynaktan olan mesafe (cm).

### 3.1.12. Simpson Bileşik Yöntemi

Bu çalışmadaki integrasyon işlemleri simpson bileşik yöntemi kullanarak gerçekleştirildi (denk. 3.21). Bu yöntemde,  $[a,b]$  integral aralığının  $n$  adet eşit uzunluklu alt aralıklara bölerek her bir alt aralık üzerinde uygulandı (Coskun, 2018).

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3} \left( f(a) + 4 \sum_{i=1}^k f(x_{2i}) + 2 \sum_{i=1}^{k-1} f(x_{2i+1}) + f(b) \right) \quad (3.21)$$

$$h = \frac{b-a}{n} \quad x_{n+1} = a + nh \quad k = \frac{n}{2}$$

## 3.2. PENELOPE

PENELOPE Monte Carlo modellemesinin değişik alt programları kullanarak değişik polimer jeller için elektron, pozitron ve fotonların taşınması gerçekleştirildi. *Materila.exe* programı, tablo 3.1’de yoğunluğu ile element bilşimi verilen materyaller için materyal dosyası oluşturuldu. *Tables.exe* programı, gelen elektron ile pozitronların durdurma gücü ve CSDA menzil hesaplamaları için kullanıldı. *Penmain.exe* programı ise, elektron ile fotonların derin-doz hesaplamaları için kullanıldı. Elektron ile fotoların taşıma parametreleri, EABS (1): 1.00E+05 eV, EABS (2): 1.00E+04 eV, EABS (3): 1.00E+05 eV, C<sub>1</sub>: 5.00E-02, C<sub>2</sub>: 5.00E-02, WCC: 5.00E+03 eV, WCR: 5.00E+03 eV, NSIMSH: 1.00E+08 olarak kullanıldı. Burada, EABS (1:3) elektron, foton ve pozitronların soğrulma enerjisi, C<sub>1</sub> ve C<sub>2</sub> elastik saçılmanın parametreleri, WCC ve WCR Bremsstrahlung emisyonu ve inelastik saçılmaları için enerji kayıpların kesme enerjisi ve NSIMSH simülasyon düş sayısıdır. derin-doz hesaplamaları, 5 cm çapında ve 25 cm uzunluğunda bir silindirik jel fantomu kullanarak yapıldı. Jel fantomu ışınlaması için, 2x2 cm<sup>2</sup> alan, Z ekseninde ve 100 cm mesafede bulunan bir nokta kaynak tarafından üretilen konik ışınlar kullanıldı.

### 3.3. EGSnrc

EGSnrc Monte Carlo modellemesinin değişik alt programları kullanarak polimer jeller için elektron ve fotonların taşınması gerçekleştirildi. *egs.gui* programı, tablo 3.1’de kütle yoğunluğu ile element bileşimi verilen polimer jellerde fotonların tesir kesitlerin hesaplamaları için kullanıldı. DOSRZnrc programı, eksensel (Z) ve radyal (R) yönlerdeki doz dağılımının hesaplamaları için kullanıldı. Elektron ile fotonların taşıma parametreleri, ECUT: 0.521 MeV, PCUT: 0.001 MeV, electron-step algorithm: PRESTA II, Bremsstrahlung angular sampling: KOCH-MOTZ, electron impact ionization: off, Bremsstrahlung cross sections: Bethe-Heitler, boundary crossing algorithm: EXACT, SMAX: 1e10, Rayleigh scattering: on, photon-electron angular sampling: on, bound Compton scattering: norej, atomic relaxations: on, photon cross sections: xcom, ESTEPE: 0.25, Ximax: 0.5, and number of histories: 1e8 olarak kullanıldı. DOSRZnrz programında, 5 cm çapında ve 20 cm uzunluğunda bir silindirik jel fantomu tanımlanarak derin-doz eğrileri oluşturuldu. Jel fantomu ışınlanması için, 2x2 cm<sup>2</sup> alan, Z eksenini üzerinde ve 100 cm mesafede bulunan bir nokta kaynak tarafından üretilen konik ışınlar kullanıldı.

Tablo 3.1. Yumuşak doku ile bazı polimer jellerin kütle yoğunluğu ile element bileşimi

|                                  | MAGIC <sup>1</sup> | MAGAS <sup>2</sup> | MAGAT <sup>3</sup> | PAGAT <sup>4</sup> | Yumuşak Doku <sup>5</sup> |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| H                                | 0.1067             | 0.1047             | 0.1042             | 0.1059             | 0.104472                  |
| C                                | 0.0843             | 0.0844             | 0.0854             | 0.0681             | 0.232190                  |
| N                                | 0.01392            | 0.0115             | 0.0115             | 0.0242             | 0.024880                  |
| O                                | 0.7994             | 0.7984             | 0.7928             | 0.8008             | 0.630238                  |
| Na                               | -                  | -                  | -                  | -                  | 0.001130                  |
| Mg                               | -                  | -                  | -                  | -                  | 0.000130                  |
| P                                | -                  | -                  | 0.0015             | 0.0002             | 0.001330                  |
| S                                | 0.00000256         | -                  | -                  | -                  | 0.001990                  |
| Cl                               | -                  | -                  | 0.0017             | 0.0002             | 0.001340                  |
| K                                | -                  | -                  | -                  | -                  | 0.001990                  |
| Ca                               | -                  | -                  | -                  | -                  | 0.000230                  |
| Fe                               | -                  | -                  | -                  | -                  | 0.000050                  |
| Cu                               | 0.00000508         | -                  | -                  | -                  | ---                       |
| Zn                               | -                  | -                  | -                  | -                  | 0.000030                  |
| Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.027              | 1.038              | 1.032              | 1.026              | 1.000                     |

1: (Aljamal et al, 2013), 2: (Venning et al, 2005), 3: ( Venning et al, 2005)

4: ( Venning et al, 2005), 5: ICRP (Physics.nist.gov)

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. MEPSAR Paket Programın Sonuçları

Burada, özellikleri tablo 3.1’de verilen MAGIC ve MAGAS polimer jeller için bu çalışma kapsamında geliştirilen MEPSAR paket programı kullanarak, elektron ve pozitronlar için etkin atom numarası ( $Z^*$ ), etkin ortalama uyarma enerjisi ( $I^*$ ), durdurma gücü, CSDA menzil ve radyasyon verimi hesaplandı.

#### 4.1.1. Hedef Materyal için $Z^*$ ve $I^*$ Blerilenmesi

Burada, MAGIC ve MAGAS polimer jellerin etkin atom numarası ( $Z^*$ ) ve etkin ortalama uyarma enerjisi ( $I^*$ ), gelen elektron ve pozitronlar enerjisinin bir fonksiyonu olarak hesaplandı (Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4). Elde edilen sonuçların garafikleri şekil 4.1’de gösterildi. Şekil 4.1’de, 0.001 MeV’den düşük enerjiler için, gelen elektron ve pozitron enerjisi ile  $Z^*$  ve  $I^*$ ’nın doğrusal olarak artığı gözlemlendi. Ancak; 0.001 MeV’den büyük enerjiler için bu parametrelerin ortalama uyarma enerjisine ( $I$ ) ve hedef materyalin atom numarasına ( $Z$ ) dönüştüğü gözlemlendi.

Tablo 4.1. MAGIC jel’de elektronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzil sonuçları

| Enerji<br>(MeV)    | $Z^*$ | $I^*$ (eV) | Kütle Durdurma Gücü (MeV.cm <sup>2</sup> /g) |                       |           | Radyasyon<br>Verimi   | CSDA<br>Menzil<br>(g/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------|------------|----------------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|----------------------------------------|
|                    |       |            | $S_{col}$                                    | $S_{rad}$             | $S_{tot}$ |                       |                                        |
| $2 \times 10^{-5}$ | 3.009 | 14.051     | 62.924                                       | $1.12 \times 10^{-5}$ | 62.924    | $6.66 \times 10^{-8}$ | $2.84 \times 10^{-7}$                  |
| $4 \times 10^{-5}$ | 3.919 | 21.445     | 149.430                                      | $5.31 \times 10^{-5}$ | 149.430   | $2.18 \times 10^{-7}$ | $4.80 \times 10^{-7}$                  |
| $6 \times 10^{-5}$ | 4.477 | 26.835     | 209.300                                      | $1.12 \times 10^{-4}$ | 209.300   | $3.80 \times 10^{-7}$ | $5.91 \times 10^{-7}$                  |
| $8 \times 10^{-5}$ | 4.867 | 31.074     | 245.020                                      | $1.74 \times 10^{-4}$ | 245.020   | $5.45 \times 10^{-7}$ | $6.79 \times 10^{-7}$                  |
| $1 \times 10^{-4}$ | 5.160 | 34.544     | 263.840                                      | $2.34 \times 10^{-4}$ | 263.840   | $7.14 \times 10^{-7}$ | $7.57 \times 10^{-7}$                  |
| $2 \times 10^{-4}$ | 5.966 | 45.678     | 257.910                                      | $4.58 \times 10^{-4}$ | 257.910   | $1.38 \times 10^{-6}$ | $1.13 \times 10^{-6}$                  |
| $4 \times 10^{-4}$ | 6.542 | 55.668     | 192.840                                      | $6.85 \times 10^{-4}$ | 192.840   | $2.90 \times 10^{-6}$ | $2.03 \times 10^{-6}$                  |
| $6 \times 10^{-4}$ | 6.762 | 60.205     | 153.690                                      | $8.12 \times 10^{-4}$ | 153.690   | $4.51 \times 10^{-6}$ | $3.20 \times 10^{-6}$                  |
| $8 \times 10^{-4}$ | 6.873 | 62.714     | 129.020                                      | $9.17 \times 10^{-4}$ | 129.020   | $6.17 \times 10^{-6}$ | $4.63 \times 10^{-6}$                  |
| $1 \times 10^{-3}$ | 6.937 | 64.263     | 111.900                                      | $9.94 \times 10^{-4}$ | 111.900   | $7.85 \times 10^{-6}$ | $6.30 \times 10^{-6}$                  |
| $2 \times 10^{-3}$ | 7.049 | 67.250     | 69.744                                       | $1.24 \times 10^{-3}$ | 69.745    | $1.45 \times 10^{-5}$ | $1.80 \times 10^{-5}$                  |
| $4 \times 10^{-3}$ | 7.088 | 68.450     | 41.967                                       | $1.49 \times 10^{-3}$ | 41.969    | $2.97 \times 10^{-5}$ | $5.64 \times 10^{-5}$                  |
| $6 \times 10^{-3}$ | 7.097 | 68.744     | 30.839                                       | $1.64 \times 10^{-3}$ | 30.840    | $4.58 \times 10^{-5}$ | $1.13 \times 10^{-4}$                  |
| $8 \times 10^{-3}$ | 7.100 | 68.861     | 24.702                                       | $1.76 \times 10^{-3}$ | 24.704    | $6.24 \times 10^{-5}$ | $1.86 \times 10^{-4}$                  |
| $1 \times 10^{-2}$ | 7.102 | 68.920     | 20.772                                       | $1.84 \times 10^{-3}$ | 20.774    | $7.92 \times 10^{-5}$ | $2.74 \times 10^{-4}$                  |
| $2 \times 10^{-2}$ | 7.104 | 69.007     | 12.107                                       | $2.15 \times 10^{-3}$ | 12.109    | $1.46 \times 10^{-4}$ | $9.32 \times 10^{-4}$                  |
| $4 \times 10^{-2}$ | 7.105 | 69.032     | 7.136                                        | $2.54 \times 10^{-3}$ | 7.139     | $2.97 \times 10^{-4}$ | $3.18 \times 10^{-3}$                  |
| $6 \times 10^{-2}$ | 7.105 | 69.038     | 5.315                                        | $2.83 \times 10^{-3}$ | 5.318     | $4.59 \times 10^{-4}$ | $6.47 \times 10^{-3}$                  |
| $8 \times 10^{-2}$ | 7.105 | 69.040     | 4.360                                        | $3.10 \times 10^{-3}$ | 4.363     | $6.24 \times 10^{-4}$ | $1.07 \times 10^{-2}$                  |
| 0.1                | 7.105 | 69.041     | 3.771                                        | $3.35 \times 10^{-3}$ | 3.774     | $7.93 \times 10^{-4}$ | $1.56 \times 10^{-2}$                  |
| 0.2                | 7.105 | 69.042     | 2.557                                        | $4.54 \times 10^{-3}$ | 2.561     | $1.46 \times 10^{-3}$ | $4.90 \times 10^{-2}$                  |
| 0.4                | 7.105 | 69.043     | 1.964                                        | $6.98 \times 10^{-3}$ | 1.971     | $2.97 \times 10^{-3}$ | 0.141                                  |
| 0.6                | 7.105 | 69.043     | 1.798                                        | $9.58 \times 10^{-3}$ | 1.807     | $4.58 \times 10^{-3}$ | 0.247                                  |
| 0.8                | 7.105 | 69.043     | 1.735                                        | $1.23 \times 10^{-2}$ | 1.747     | $6.22 \times 10^{-3}$ | 0.360                                  |
| 1                  | 7.105 | 69.043     | 1.711                                        | $1.52 \times 10^{-2}$ | 1.726     | $7.89 \times 10^{-3}$ | 0.476                                  |
| 2                  | 7.105 | 69.043     | 1.732                                        | $3.08 \times 10^{-2}$ | 1.762     | $1.45 \times 10^{-2}$ | 1.052                                  |

|      |       |        |       |                       |        |                       |         |
|------|-------|--------|-------|-----------------------|--------|-----------------------|---------|
| 4    | 7.105 | 69.043 | 1.764 | $6.27 \times 10^{-2}$ | 1.827  | $2.92 \times 10^{-2}$ | 2.163   |
| 6    | 7.105 | 69.043 | 1.787 | $9.52 \times 10^{-2}$ | 1.882  | $4.47 \times 10^{-2}$ | 3.242   |
| 8    | 7.105 | 69.043 | 1.807 | 0.128                 | 1.935  | $6.03 \times 10^{-2}$ | 4.290   |
| 10   | 7.105 | 69.043 | 1.823 | 0.162                 | 1.985  | $7.59 \times 10^{-2}$ | 5.310   |
| 20   | 7.105 | 69.043 | 1.876 | 0.333                 | 2.209  | 0.134                 | 10.080  |
| 40   | 7.105 | 69.043 | 1.930 | 0.686                 | 2.616  | 0.254                 | 18.380  |
| 60   | 7.105 | 69.043 | 1.962 | 1.045                 | 3.007  | 0.366                 | 25.500  |
| 80   | 7.105 | 69.043 | 1.984 | 1.410                 | 3.394  | 0.468                 | 31.760  |
| 100  | 7.105 | 69.043 | 2.002 | 1.778                 | 3.779  | 0.562                 | 37.340  |
| 200  | 7.105 | 69.043 | 2.055 | 3.651                 | 5.706  | 0.845                 | 58.730  |
| 400  | 7.105 | 69.043 | 2.109 | 7.493                 | 9.602  | 1.263                 | 85.460  |
| 600  | 7.105 | 69.043 | 2.140 | 11.406                | 13.546 | 1.561                 | 102.900 |
| 800  | 7.105 | 69.043 | 2.163 | 15.366                | 17.528 | 1.791                 | 115.900 |
| 1000 | 7.105 | 69.043 | 2.180 | 19.360                | 21.540 | 1.979                 | 126.100 |

Tablo 4.2. MAGAS jel’de elektronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzil sonuçları

| Enerji<br>(MeV)    | Z*    | I* (eV) | Kütle Durdurma Gücü (MeV.cm <sup>2</sup> /g) |                       |                  | Radyasyon<br>Verimi   | CSDA<br>Menzil<br>(g/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------|---------|----------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------------------------------|
|                    |       |         | S <sub>col</sub>                             | S <sub>rad</sub>      | S <sub>tot</sub> |                       |                                        |
| 2×10 <sup>-5</sup> | 3.004 | 14.152  | 62.159                                       | 1.10×10 <sup>-5</sup> | 62.159           | 6.64×10 <sup>-8</sup> | 2.89×10 <sup>-7</sup>                  |
| 4×10 <sup>-5</sup> | 3.912 | 21.591  | 148.360                                      | 5.25×10 <sup>-5</sup> | 148.360          | 2.18×10 <sup>-7</sup> | 4.87×10 <sup>-7</sup>                  |
| 6×10 <sup>-5</sup> | 4.467 | 27.011  | 208.160                                      | 1.11×10 <sup>-4</sup> | 208.160          | 3.78×10 <sup>-7</sup> | 5.99×10 <sup>-7</sup>                  |
| 8×10 <sup>-5</sup> | 4.855 | 31.272  | 243.900                                      | 1.73×10 <sup>-4</sup> | 243.900          | 5.43×10 <sup>-7</sup> | 6.87×10 <sup>-7</sup>                  |
| 1×10 <sup>-4</sup> | 5.147 | 34.759  | 262.780                                      | 2.33×10 <sup>-4</sup> | 262.780          | 7.11×10 <sup>-7</sup> | 7.66×10 <sup>-7</sup>                  |
| 2×10 <sup>-4</sup> | 5.949 | 45.938  | 257.200                                      | 4.55×10 <sup>-4</sup> | 257.200          | 1.37×10 <sup>-6</sup> | 1.14×10 <sup>-6</sup>                  |
| 4×10 <sup>-4</sup> | 6.521 | 55.951  | 192.450                                      | 6.81×10 <sup>-4</sup> | 192.460          | 2.89×10 <sup>-6</sup> | 2.04×10 <sup>-6</sup>                  |
| 6×10 <sup>-4</sup> | 6.740 | 60.492  | 153.420                                      | 8.15×10 <sup>-4</sup> | 153.430          | 4.49×10 <sup>-6</sup> | 3.22×10 <sup>-6</sup>                  |
| 8×10 <sup>-4</sup> | 6.849 | 63.000  | 128.820                                      | 9.12×10 <sup>-4</sup> | 128.820          | 6.15×10 <sup>-6</sup> | 4.65×10 <sup>-6</sup>                  |
| 1×10 <sup>-3</sup> | 6.913 | 64.549  | 111.740                                      | 9.89×10 <sup>-4</sup> | 111.740          | 7.82×10 <sup>-6</sup> | 6.32×10 <sup>-6</sup>                  |
| 2×10 <sup>-3</sup> | 7.023 | 67.530  | 69.658                                       | 1.23×10 <sup>-3</sup> | 69.660           | 1.45×10 <sup>-5</sup> | 1.80×10 <sup>-5</sup>                  |
| 4×10 <sup>-3</sup> | 7.062 | 68.726  | 41.923                                       | 1.48×10 <sup>-3</sup> | 41.925           | 2.96×10 <sup>-5</sup> | 5.64×10 <sup>-5</sup>                  |
| 6×10 <sup>-3</sup> | 7.071 | 69.019  | 30.809                                       | 1.64×10 <sup>-3</sup> | 30.810           | 4.56×10 <sup>-5</sup> | 1.13×10 <sup>-4</sup>                  |
| 8×10 <sup>-3</sup> | 7.074 | 69.136  | 24.680                                       | 1.75×10 <sup>-3</sup> | 24.682           | 6.22×10 <sup>-5</sup> | 1.86×10 <sup>-4</sup>                  |
| 1×10 <sup>-2</sup> | 7.076 | 69.194  | 20.754                                       | 1.84×10 <sup>-3</sup> | 20.755           | 7.89×10 <sup>-5</sup> | 2.75×10 <sup>-4</sup>                  |
| 2×10 <sup>-2</sup> | 7.078 | 69.281  | 12.097                                       | 2.14×10 <sup>-3</sup> | 12.100           | 1.45×10 <sup>-4</sup> | 9.33×10 <sup>-4</sup>                  |
| 4×10 <sup>-2</sup> | 7.079 | 69.306  | 7.131                                        | 2.52×10 <sup>-3</sup> | 7.134            | 2.96×10 <sup>-4</sup> | 3.18×10 <sup>-3</sup>                  |
| 6×10 <sup>-2</sup> | 7.079 | 69.311  | 5.312                                        | 2.82×10 <sup>-3</sup> | 5.314            | 4.57×10 <sup>-4</sup> | 6.48×10 <sup>-3</sup>                  |
| 8×10 <sup>-2</sup> | 7.079 | 69.314  | 4.357                                        | 3.08×10 <sup>-3</sup> | 4.360            | 6.22×10 <sup>-4</sup> | 1.07×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.1                | 7.079 | 69.315  | 3.768                                        | 3.33×10 <sup>-3</sup> | 3.771            | 7.90×10 <sup>-4</sup> | 1.56×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.2                | 7.079 | 69.316  | 2.555                                        | 4.52×10 <sup>-3</sup> | 2.560            | 1.45×10 <sup>-3</sup> | 4.90×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.4                | 7.079 | 69.317  | 1.963                                        | 6.95×10 <sup>-3</sup> | 1.970            | 2.96×10 <sup>-3</sup> | 0.141                                  |
| 0.6                | 7.079 | 69.317  | 1.797                                        | 9.54×10 <sup>-3</sup> | 1.806            | 4.56×10 <sup>-3</sup> | 0.248                                  |
| 0.8                | 7.079 | 69.317  | 1.734                                        | 1.23×10 <sup>-2</sup> | 1.746            | 6.20×10 <sup>-3</sup> | 0.360                                  |
| 1                  | 7.079 | 69.317  | 1.710                                        | 1.51×10 <sup>-2</sup> | 1.725            | 7.86×10 <sup>-3</sup> | 0.476                                  |
| 2                  | 7.079 | 69.317  | 1.731                                        | 3.06×10 <sup>-2</sup> | 1.761            | 1.44×10 <sup>-2</sup> | 1.052                                  |
| 4                  | 7.079 | 69.317  | 1.763                                        | 6.24×10 <sup>-2</sup> | 1.825            | 2.91×10 <sup>-2</sup> | 2.165                                  |
| 6                  | 7.079 | 69.317  | 1.786                                        | 9.48×10 <sup>-2</sup> | 1.881            | 4.45×10 <sup>-2</sup> | 3.244                                  |
| 8                  | 7.079 | 69.317  | 1.806                                        | 0.128                 | 1.933            | 6.00×10 <sup>-2</sup> | 4.293                                  |
| 10                 | 7.079 | 69.317  | 1.822                                        | 0.161                 | 1.983            | 7.56×10 <sup>-2</sup> | 5.314                                  |
| 20                 | 7.079 | 69.317  | 1.875                                        | 0.332                 | 2.207            | 0.134                 | 10.090                                 |
| 40                 | 7.079 | 69.317  | 1.929                                        | 0.683                 | 2.612            | 0.253                 | 18.400                                 |
| 60                 | 7.079 | 69.317  | 1.961                                        | 1.041                 | 3.002            | 0.365                 | 25.530                                 |
| 80                 | 7.079 | 69.317  | 1.983                                        | 1.404                 | 3.387            | 0.467                 | 31.800                                 |
| 100                | 7.079 | 69.317  | 2.001                                        | 1.770                 | 3.771            | 0.560                 | 37.400                                 |
| 200                | 7.079 | 69.317  | 2.054                                        | 3.636                 | 5.690            | 0.843                 | 58.840                                 |

|      |       |        |       |        |        |       |         |
|------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|---------|
| 400  | 7.079 | 69.317 | 2.108 | 7.461  | 9.569  | 1.260 | 85.650  |
| 600  | 7.079 | 69.317 | 2.139 | 11.358 | 13.497 | 1.558 | 103.200 |
| 800  | 7.079 | 69.317 | 2.162 | 15.302 | 17.463 | 1.788 | 116.200 |
| 1000 | 7.079 | 69.317 | 2.179 | 19.279 | 21.458 | 1.976 | 126.500 |

Tablo 4.3. MAGIC jel’de pozitronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzil sonuçları

| Enerji<br>(MeV)    | Z*    | I* (eV) | Kütle Durdurma Gücü (MeV.cm <sup>2</sup> /g) |                       |                  | Radyasyon<br>Verimi   | CSDA<br>Menzil<br>(g/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------|---------|----------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------------------------------|
|                    |       |         | S <sub>col</sub>                             | S <sub>rad</sub>      | S <sub>tot</sub> |                       |                                        |
| 2×10 <sup>-5</sup> | 3.009 | 14.051  | 129.980                                      | 2.31×10 <sup>-5</sup> | 129.980          | 6.66×10 <sup>-8</sup> | 1.16×10 <sup>-7</sup>                  |
| 4×10 <sup>-5</sup> | 3.919 | 21.445  | 253.230                                      | 9.00×10 <sup>-5</sup> | 253.230          | 2.18×10 <sup>-7</sup> | 2.22×10 <sup>-7</sup>                  |
| 6×10 <sup>-5</sup> | 4.477 | 26.835  | 327.180                                      | 1.74×10 <sup>-4</sup> | 327.180          | 3.80×10 <sup>-7</sup> | 2.90×10 <sup>-7</sup>                  |
| 8×10 <sup>-5</sup> | 4.867 | 31.074  | 365.290                                      | 2.60×10 <sup>-4</sup> | 365.290          | 5.45×10 <sup>-7</sup> | 3.48×10 <sup>-7</sup>                  |
| 1×10 <sup>-4</sup> | 5.160 | 34.544  | 380.850                                      | 3.38×10 <sup>-4</sup> | 380.850          | 7.14×10 <sup>-7</sup> | 4.01×10 <sup>-7</sup>                  |
| 2×10 <sup>-4</sup> | 5.966 | 45.678  | 343.210                                      | 6.10×10 <sup>-4</sup> | 343.210          | 1.38×10 <sup>-6</sup> | 6.72×10 <sup>-7</sup>                  |
| 4×10 <sup>-4</sup> | 6.542 | 55.668  | 241.700                                      | 8.59×10 <sup>-4</sup> | 241.700          | 2.90×10 <sup>-6</sup> | 1.38×10 <sup>-6</sup>                  |
| 6×10 <sup>-4</sup> | 6.762 | 60.205  | 187.390                                      | 9.99×10 <sup>-4</sup> | 187.400          | 4.51×10 <sup>-6</sup> | 2.32×10 <sup>-6</sup>                  |
| 8×10 <sup>-4</sup> | 6.873 | 62.714  | 154.700                                      | 1.10×10 <sup>-3</sup> | 154.700          | 6.17×10 <sup>-6</sup> | 3.51×10 <sup>-6</sup>                  |
| 1×10 <sup>-3</sup> | 6.937 | 64.263  | 132.620                                      | 1.18×10 <sup>-3</sup> | 132.620          | 7.85×10 <sup>-6</sup> | 4.91×10 <sup>-6</sup>                  |
| 2×10 <sup>-3</sup> | 7.049 | 67.250  | 80.234                                       | 1.43×10 <sup>-3</sup> | 80.235           | 1.45×10 <sup>-5</sup> | 1.50×10 <sup>-5</sup>                  |
| 4×10 <sup>-3</sup> | 7.088 | 68.450  | 47.206                                       | 1.68×10 <sup>-3</sup> | 47.207           | 2.97×10 <sup>-5</sup> | 4.88×10 <sup>-5</sup>                  |
| 6×10 <sup>-3</sup> | 7.097 | 68.744  | 34.311                                       | 1.83×10 <sup>-3</sup> | 34.313           | 4.58×10 <sup>-5</sup> | 9.92×10 <sup>-5</sup>                  |
| 8×10 <sup>-3</sup> | 7.100 | 68.861  | 27.290                                       | 1.94×10 <sup>-3</sup> | 27.292           | 6.24×10 <sup>-5</sup> | 1.65×10 <sup>-4</sup>                  |
| 1×10 <sup>-2</sup> | 7.102 | 68.920  | 22.828                                       | 2.03×10 <sup>-3</sup> | 22.830           | 7.92×10 <sup>-5</sup> | 2.46×10 <sup>-4</sup>                  |
| 2×10 <sup>-2</sup> | 7.104 | 69.007  | 13.100                                       | 2.33×10 <sup>-3</sup> | 13.102           | 1.46×10 <sup>-4</sup> | 8.50×10 <sup>-4</sup>                  |
| 4×10 <sup>-2</sup> | 7.105 | 69.032  | 7.598                                        | 2.70×10 <sup>-3</sup> | 7.600            | 2.98×10 <sup>-4</sup> | 2.95×10 <sup>-3</sup>                  |
| 6×10 <sup>-2</sup> | 7.105 | 69.038  | 5.600                                        | 2.98×10 <sup>-3</sup> | 5.603            | 4.59×10 <sup>-4</sup> | 6.06×10 <sup>-3</sup>                  |
| 8×10 <sup>-2</sup> | 7.105 | 69.040  | 4.557                                        | 3.24×10 <sup>-3</sup> | 4.560            | 6.24×10 <sup>-4</sup> | 1.00×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.1                | 7.105 | 69.041  | 3.915                                        | 3.48×10 <sup>-3</sup> | 3.918            | 7.93×10 <sup>-4</sup> | 1.48×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.2                | 7.105 | 69.042  | 2.597                                        | 4.61×10 <sup>-3</sup> | 2.602            | 1.46×10 <sup>-3</sup> | 4.74×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.4                | 7.105 | 69.043  | 1.956                                        | 6.95×10 <sup>-3</sup> | 1.963            | 2.97×10 <sup>-3</sup> | 0.139                                  |
| 0.6                | 7.105 | 69.043  | 1.774                                        | 9.45×10 <sup>-3</sup> | 1.783            | 4.58×10 <sup>-3</sup> | 0.246                                  |
| 0.8                | 7.105 | 69.043  | 1.704                                        | 1.21×10 <sup>-2</sup> | 1.716            | 6.22×10 <sup>-3</sup> | 0.361                                  |
| 1                  | 7.105 | 69.043  | 1.676                                        | 1.49×10 <sup>-2</sup> | 1.690            | 7.89×10 <sup>-3</sup> | 0.479                                  |
| 2                  | 7.105 | 69.043  | 1.689                                        | 3.00×10 <sup>-2</sup> | 1.719            | 1.45×10 <sup>-2</sup> | 1.069                                  |
| 4                  | 7.105 | 69.043  | 1.717                                        | 6.10×10 <sup>-2</sup> | 1.778            | 2.92×10 <sup>-2</sup> | 2.209                                  |
| 6                  | 7.105 | 69.043  | 1.739                                        | 9.27×10 <sup>-2</sup> | 1.832            | 4.47×10 <sup>-2</sup> | 3.318                                  |
| 8                  | 7.105 | 69.043  | 1.758                                        | 0.125                 | 1.883            | 6.03×10 <sup>-2</sup> | 4.394                                  |
| 10                 | 7.105 | 69.043  | 1.774                                        | 0.158                 | 1.932            | 7.59×10 <sup>-2</sup> | 5.443                                  |
| 20                 | 7.105 | 69.043  | 1.826                                        | 0.324                 | 2.151            | 0.134                 | 10.340                                 |
| 40                 | 7.105 | 69.043  | 1.880                                        | 0.668                 | 2.548            | 0.254                 | 18.870                                 |
| 60                 | 7.105 | 69.043  | 1.912                                        | 1.019                 | 2.930            | 0.366                 | 26.180                                 |
| 80                 | 7.105 | 69.043  | 1.934                                        | 1.374                 | 3.308            | 0.468                 | 32.600                                 |
| 100                | 7.105 | 69.043  | 1.951                                        | 1.733                 | 3.684            | 0.562                 | 38.320                                 |
| 200                | 7.105 | 69.043  | 2.005                                        | 3.561                 | 5.566            | 0.845                 | 60.250                                 |
| 400                | 7.105 | 69.043  | 2.059                                        | 7.313                 | 9.371            | 1.263                 | 87.650                                 |
| 600                | 7.105 | 69.043  | 2.090                                        | 11.136                | 13.226           | 1.561                 | 105.500                                |
| 800                | 7.105 | 69.043  | 2.112                                        | 15.006                | 17.118           | 1.791                 | 118.800                                |
| 1000               | 7.105 | 69.043  | 2.129                                        | 18.911                | 21.040           | 1.979                 | 129.300                                |

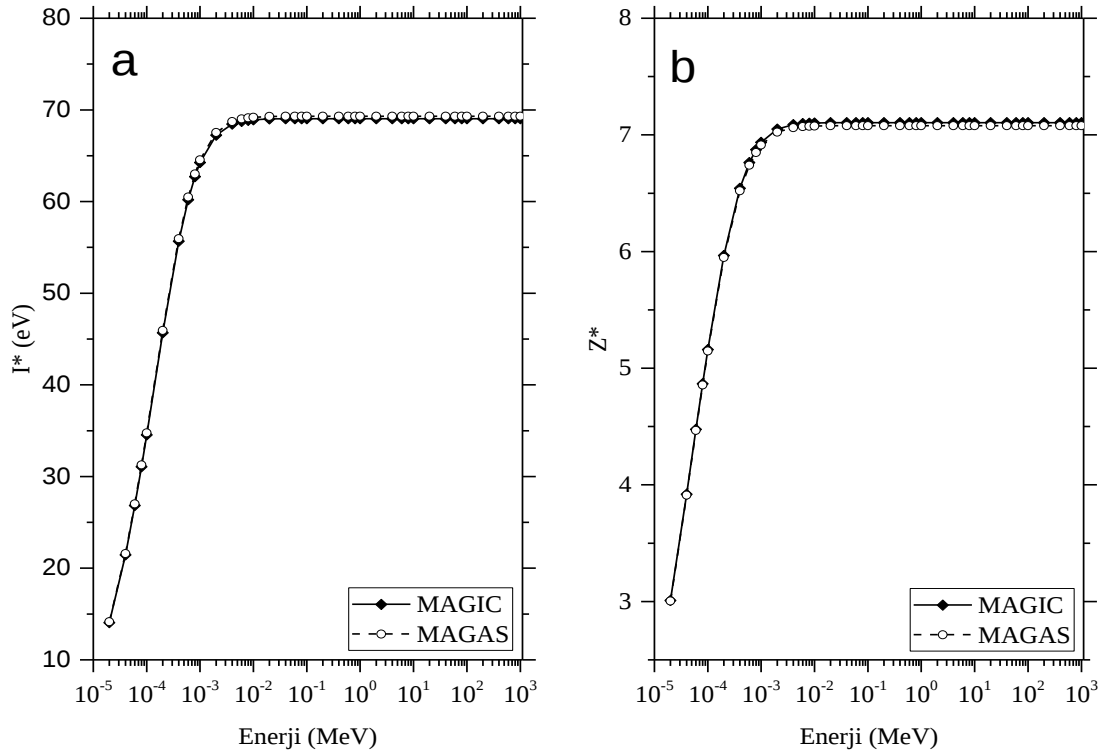
Tablo 4.4. MAGAS jel’de pozitronların durdurma gücü, radyasyon verimi ve CSDA menzil sonuçları

| Enerji<br>(MeV)    | Z*    | I* (eV) | Kütle Durdurma Gücü (MeV.cm <sup>2</sup> /g) |                       |                  | Radyasyon<br>Verimi   | CSDA<br>Menzil<br>(g/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------|---------|----------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------------------------------|
|                    |       |         | S <sub>col</sub>                             | S <sub>rad</sub>      | S <sub>tot</sub> |                       |                                        |
| 2×10 <sup>-5</sup> | 3.004 | 14.152  | 129.340                                      | 2.29×10 <sup>-5</sup> | 129.340          | 6.64×10 <sup>-8</sup> | 1.17×10 <sup>-7</sup>                  |
| 4×10 <sup>-5</sup> | 3.912 | 21.591  | 252.330                                      | 8.93×10 <sup>-5</sup> | 252.330          | 2.18×10 <sup>-7</sup> | 2.23×10 <sup>-7</sup>                  |
| 6×10 <sup>-5</sup> | 4.467 | 27.011  | 326.200                                      | 1.73×10 <sup>-4</sup> | 326.200          | 3.78×10 <sup>-7</sup> | 2.91×10 <sup>-7</sup>                  |
| 8×10 <sup>-5</sup> | 4.855 | 31.272  | 364.320                                      | 2.58×10 <sup>-4</sup> | 364.320          | 5.43×10 <sup>-7</sup> | 3.49×10 <sup>-7</sup>                  |
| 1×10 <sup>-4</sup> | 5.147 | 34.759  | 379.920                                      | 3.36×10 <sup>-4</sup> | 379.920          | 7.11×10 <sup>-7</sup> | 4.03×10 <sup>-7</sup>                  |
| 2×10 <sup>-4</sup> | 5.949 | 45.938  | 342.560                                      | 6.06×10 <sup>-4</sup> | 342.560          | 1.37×10 <sup>-6</sup> | 6.74×10 <sup>-7</sup>                  |
| 4×10 <sup>-4</sup> | 6.521 | 55.951  | 241.330                                      | 8.54×10 <sup>-4</sup> | 241.330          | 2.89×10 <sup>-6</sup> | 1.38×10 <sup>-6</sup>                  |
| 6×10 <sup>-4</sup> | 6.740 | 60.492  | 187.140                                      | 9.94×10 <sup>-4</sup> | 187.140          | 4.49×10 <sup>-6</sup> | 2.33×10 <sup>-6</sup>                  |
| 8×10 <sup>-4</sup> | 6.849 | 63.000  | 154.500                                      | 1.09×10 <sup>-3</sup> | 154.500          | 6.14×10 <sup>-6</sup> | 3.51×10 <sup>-6</sup>                  |
| 1×10 <sup>-3</sup> | 6.913 | 64.549  | 132.460                                      | 1.17×10 <sup>-3</sup> | 132.460          | 7.82×10 <sup>-6</sup> | 4.91×10 <sup>-6</sup>                  |
| 2×10 <sup>-3</sup> | 7.023 | 67.530  | 80.148                                       | 1.42×10 <sup>-3</sup> | 80.150           | 1.44×10 <sup>-5</sup> | 1.50×10 <sup>-5</sup>                  |
| 4×10 <sup>-3</sup> | 7.062 | 68.726  | 47.161                                       | 1.67×10 <sup>-3</sup> | 47.163           | 2.96×10 <sup>-5</sup> | 4.88×10 <sup>-5</sup>                  |
| 6×10 <sup>-3</sup> | 7.071 | 69.019  | 34.281                                       | 1.82×10 <sup>-3</sup> | 34.283           | 4.56×10 <sup>-5</sup> | 9.93×10 <sup>-5</sup>                  |
| 8×10 <sup>-3</sup> | 7.074 | 69.136  | 27.267                                       | 1.93×10 <sup>-3</sup> | 27.269           | 6.22×10 <sup>-5</sup> | 1.65×10 <sup>-4</sup>                  |
| 1×10 <sup>-2</sup> | 7.076 | 69.194  | 22.810                                       | 2.02×10 <sup>-3</sup> | 22.812           | 7.89×10 <sup>-5</sup> | 2.46×10 <sup>-4</sup>                  |
| 2×10 <sup>-2</sup> | 7.078 | 69.281  | 13.090                                       | 2.32×10 <sup>-3</sup> | 13.092           | 1.45×10 <sup>-4</sup> | 8.51×10 <sup>-4</sup>                  |
| 4×10 <sup>-2</sup> | 7.079 | 69.306  | 7.592                                        | 2.69×10 <sup>-3</sup> | 7.595            | 2.96×10 <sup>-4</sup> | 2.95×10 <sup>-3</sup>                  |
| 6×10 <sup>-2</sup> | 7.079 | 69.311  | 5.596                                        | 2.97×10 <sup>-3</sup> | 5.599            | 4.57×10 <sup>-4</sup> | 6.06×10 <sup>-3</sup>                  |
| 8×10 <sup>-2</sup> | 7.079 | 69.314  | 4.554                                        | 3.22×10 <sup>-3</sup> | 4.557            | 6.22×10 <sup>-4</sup> | 1.01×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.1                | 7.079 | 69.315  | 3.912                                        | 3.46×10 <sup>-3</sup> | 3.916            | 7.90×10 <sup>-4</sup> | 1.48×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.2                | 7.079 | 69.316  | 2.596                                        | 4.59×10 <sup>-3</sup> | 2.600            | 1.45×10 <sup>-3</sup> | 4.74×10 <sup>-2</sup>                  |
| 0.4                | 7.079 | 69.317  | 1.955                                        | 6.92×10 <sup>-3</sup> | 1.961            | 2.96×10 <sup>-3</sup> | 0.139                                  |
| 0.6                | 7.079 | 69.317  | 1.773                                        | 9.41×10 <sup>-3</sup> | 1.782            | 4.56×10 <sup>-3</sup> | 0.247                                  |
| 0.8                | 7.079 | 69.317  | 1.703                                        | 1.21×10 <sup>-2</sup> | 1.715            | 6.20×10 <sup>-3</sup> | 0.361                                  |
| 1                  | 7.079 | 69.317  | 1.675                                        | 1.48×10 <sup>-2</sup> | 1.689            | 7.86×10 <sup>-3</sup> | 0.479                                  |
| 2                  | 7.079 | 69.317  | 1.688                                        | 2.99×10 <sup>-2</sup> | 1.718            | 1.44×10 <sup>-2</sup> | 1.069                                  |
| 4                  | 7.079 | 69.317  | 1.716                                        | 6.08×10 <sup>-2</sup> | 1.777            | 2.91×10 <sup>-2</sup> | 2.211                                  |
| 6                  | 7.079 | 69.317  | 1.738                                        | 9.23×10 <sup>-2</sup> | 1.830            | 4.45×10 <sup>-2</sup> | 3.320                                  |
| 8                  | 7.079 | 69.317  | 1.757                                        | 0.124                 | 1.882            | 6.00×10 <sup>-2</sup> | 4.397                                  |
| 10                 | 7.079 | 69.317  | 1.773                                        | 0.157                 | 1.930            | 7.56×10 <sup>-2</sup> | 5.447                                  |
| 20                 | 7.079 | 69.317  | 1.825                                        | 0.323                 | 2.148            | 0.134                 | 10.350                                 |
| 40                 | 7.079 | 69.317  | 1.879                                        | 0.665                 | 2.544            | 0.253                 | 18.890                                 |
| 60                 | 7.079 | 69.317  | 1.911                                        | 1.014                 | 2.925            | 0.365                 | 26.210                                 |
| 80                 | 7.079 | 69.317  | 1.933                                        | 1.368                 | 3.301            | 0.467                 | 32.640                                 |
| 100                | 7.079 | 69.317  | 1.950                                        | 1.726                 | 3.676            | 0.560                 | 38.380                                 |
| 200                | 7.079 | 69.317  | 2.004                                        | 3.546                 | 5.550            | 0.843                 | 60.370                                 |
| 400                | 7.079 | 69.317  | 2.058                                        | 7.282                 | 9.340            | 1.260                 | 87.850                                 |
| 600                | 7.079 | 69.317  | 2.089                                        | 11.090                | 13.178           | 1.558                 | 105.800                                |
| 800                | 7.079 | 69.317  | 2.111                                        | 14.944                | 17.055           | 1.788                 | 119.100                                |
| 1000               | 7.079 | 69.317  | 2.128                                        | 18.832                | 20.960           | 1.976                 | 129.700                                |

#### 4.1.2. Kütle Çarpışma Durdurma Gücü

Burada, MAGIC ve MAGAS polimer jeller için, enerjinin bir fonksiyonu olarak, elektron ve pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü hesaplandı (Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4). Elde edilen sonuçların grafikleri şekiller 4.2, 4.4, 4.6 ve 4.8’de gösterildi. Bu grafiklerde, 1 keV’den büyük enerjiler için elde edilen sonuçların, referans verilerle

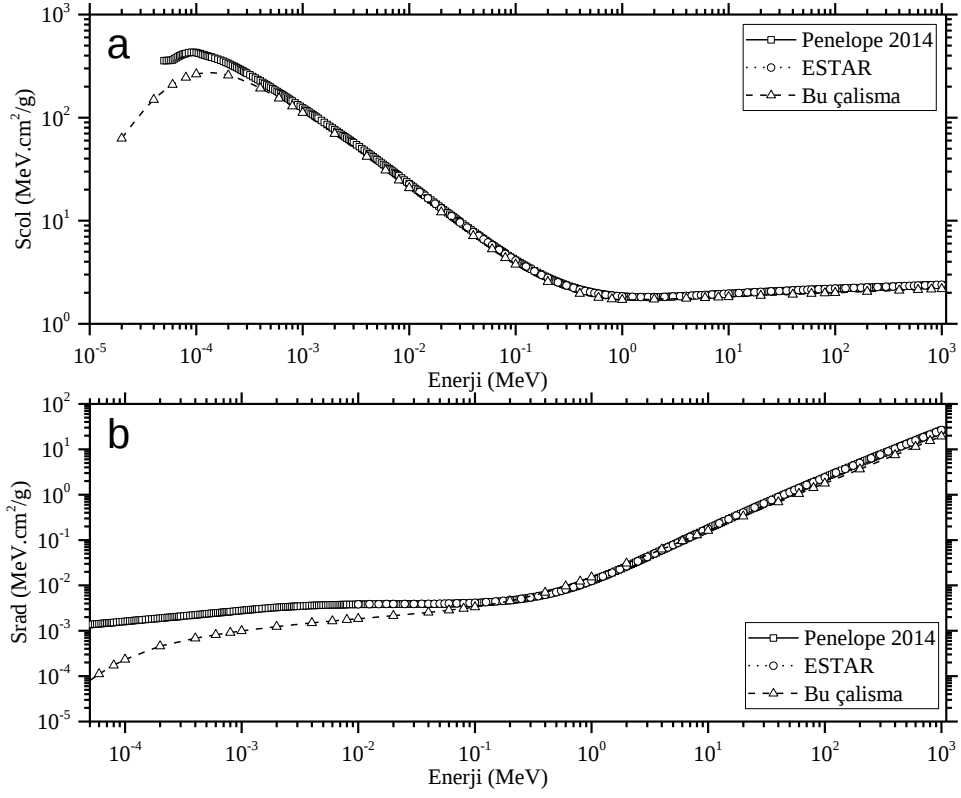
%15'lik fark içinde olduğu gözlemlendi. Ancak; keV'den düşük enerjiler için farkın daha net olduğu gözlemlendi.



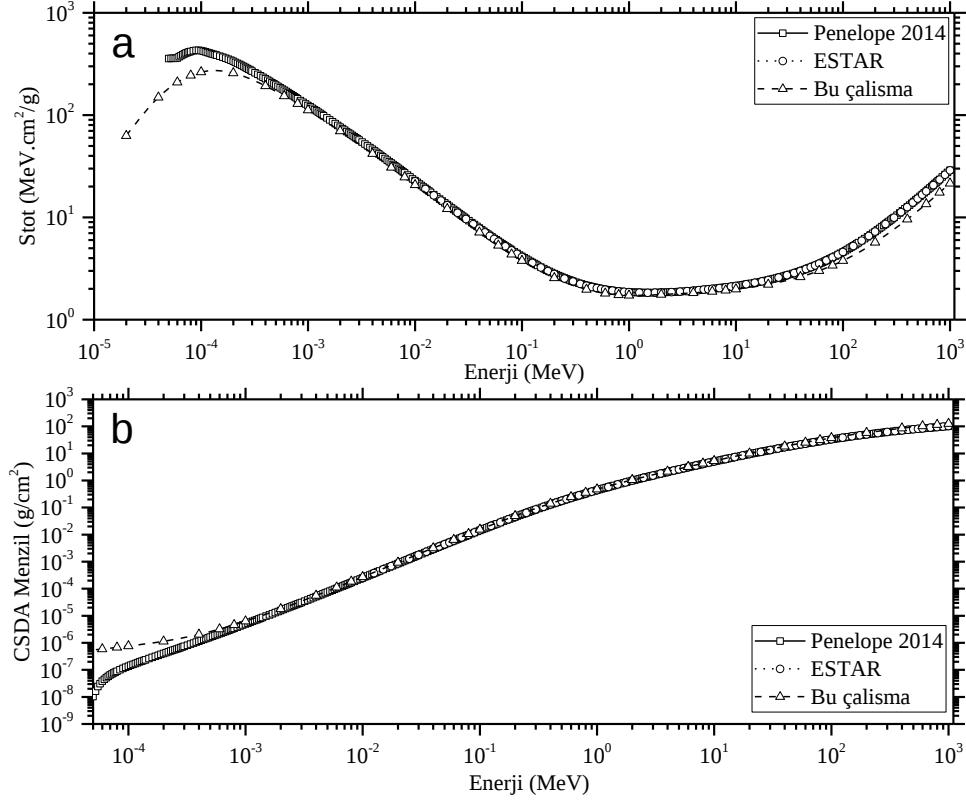
Şekil 4.1. Hedef materyalin etkin ortalama uyarma enerjisi (a) ve etkin atom numarasının (b) elektron ve pozitronların enerjisi ile değişmesi

#### 4.1.3. Kütle Radyatif Durdurma Gücü

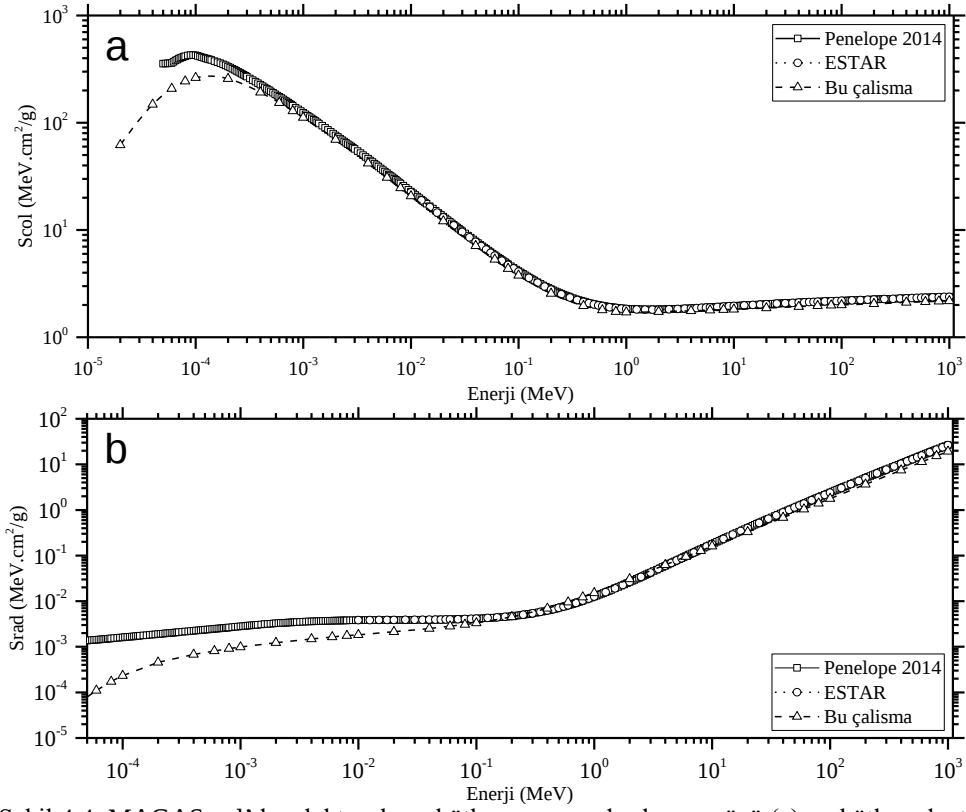
Burada, MAGIC ve MAGAS polimer jeller için, enerjinin bir fonksiyonu olarak, elektron ve pozitronların kütle radyatif durdurma gücü hesaplandı (Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4). Elde edilen sonuçların grafikleri şekiller 4.2, 4.4, 4.6 ve 4.8'de gösterildi. Bu grafiklerde, 0.1 MeV'den büyük enerjiler için elde edilen sonuçların, referans verilerle %18'lik fark içinde olduğu gözlemlendi. Ancak; 0.1 MeV'den düşük enerjiler için farkın daha net olduğu ve enerji düştükçe daha netleştiği gözlemlendi.



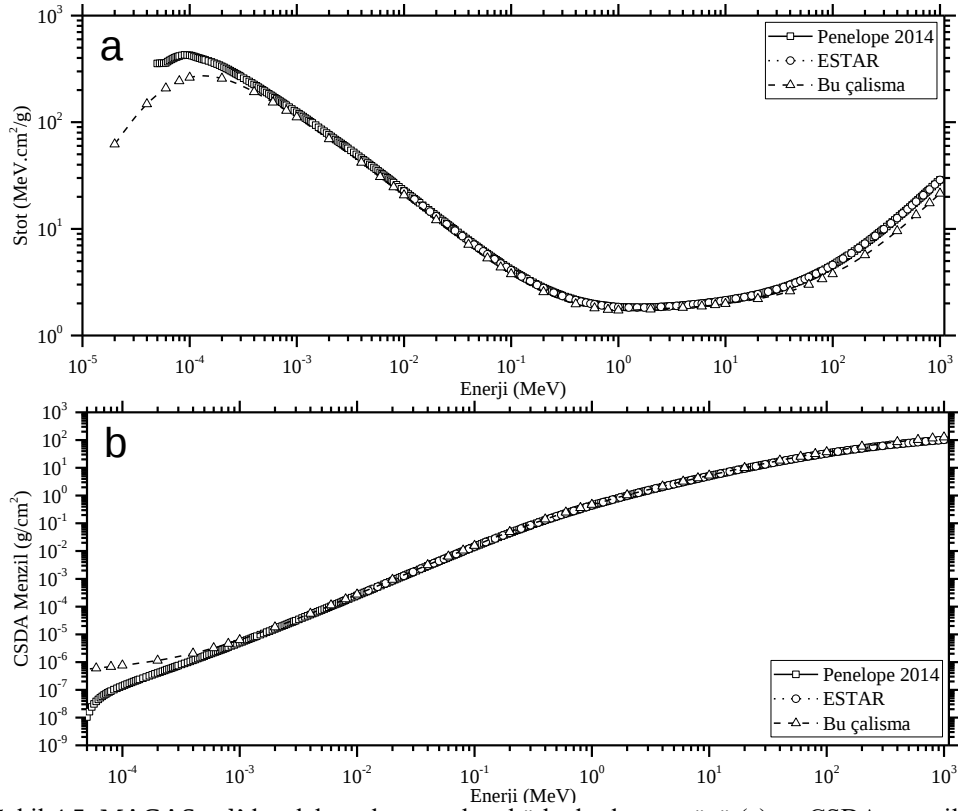
Şekil 4.2. MAGIC gel’de, elektronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi



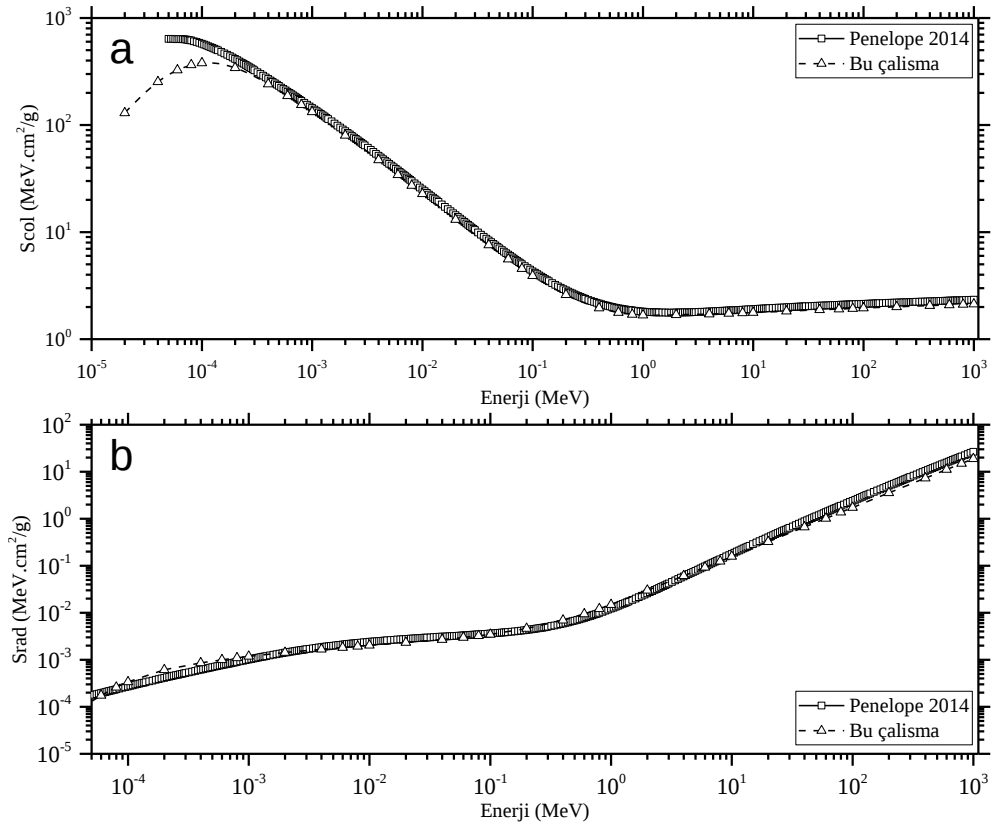
Şekil 4.3. MAGIC gel’de, elektronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi.



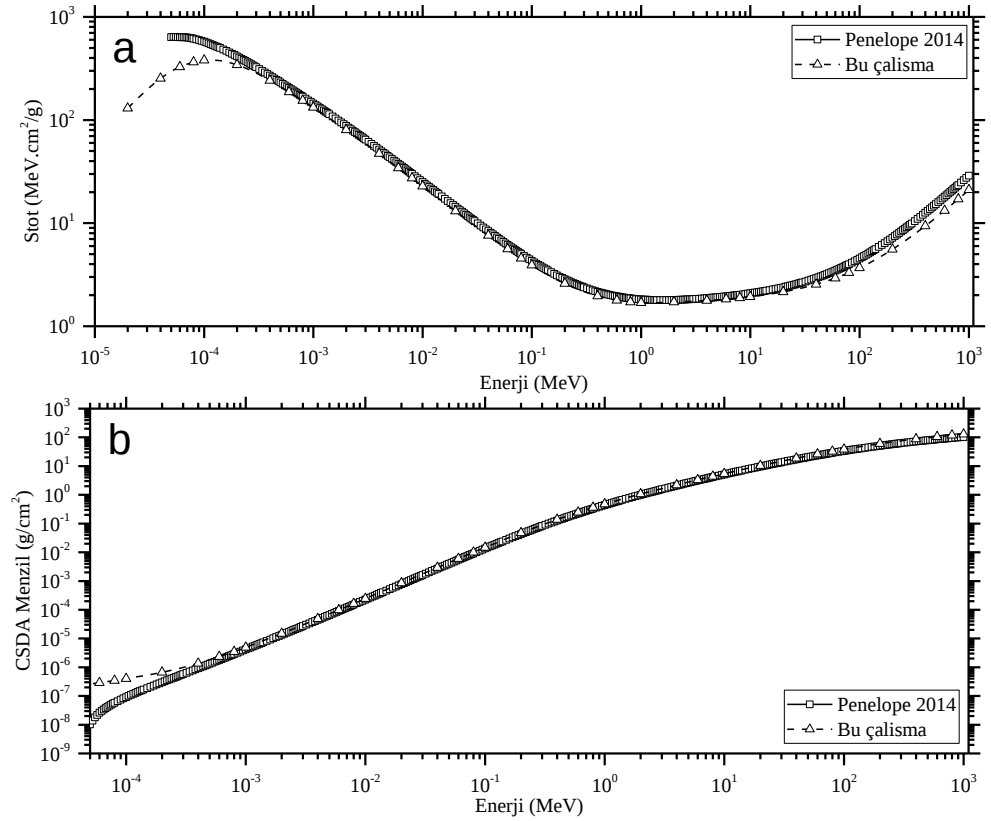
Şekil 4.4. MAGAS gel’de, elektronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi



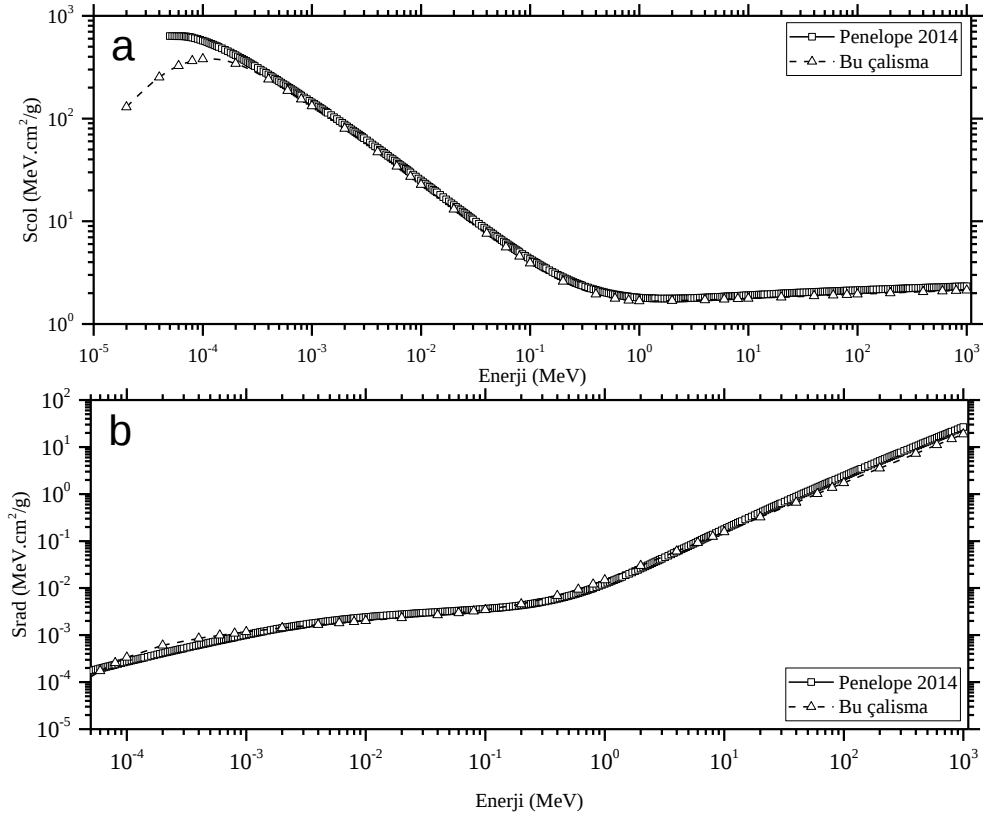
Şekil 4.5. MAGAS gel’de, elektronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi



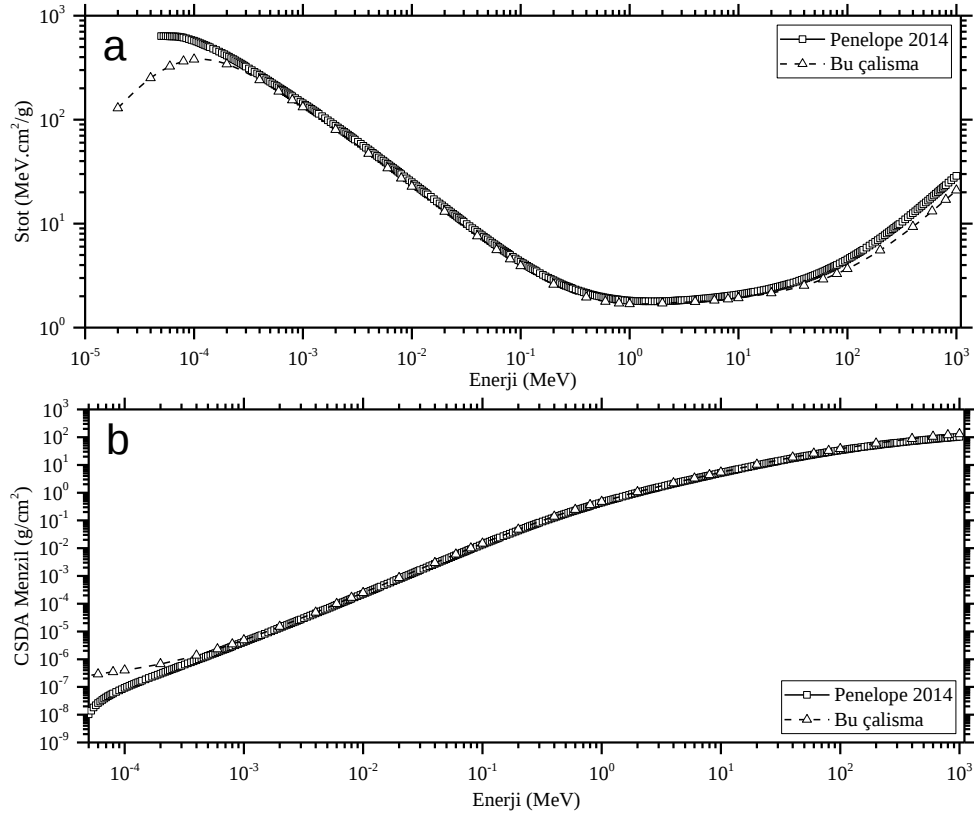
Şekil 4.6. MAGIC gel’de, pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi



Şekil 4.7. MAGIC gel’de, pozitronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi



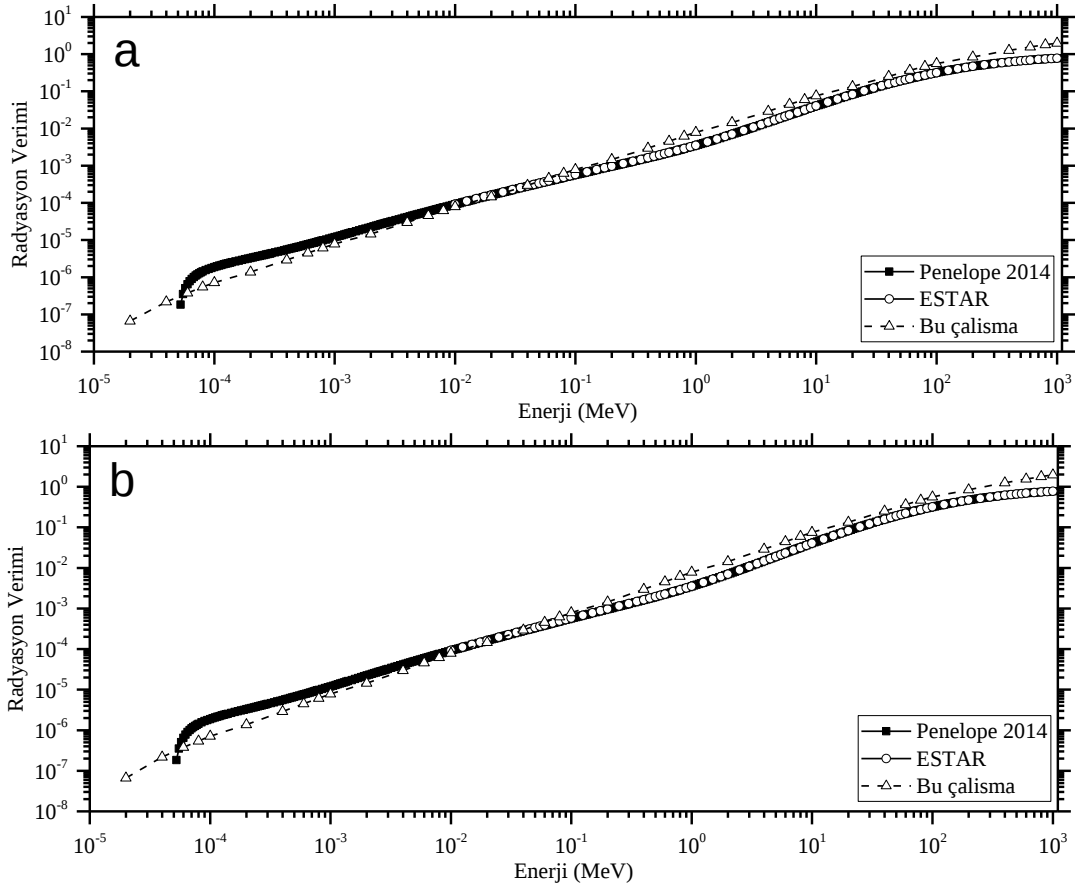
Şekil 4.8. MAGAS gel’de, pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücünün (b) enerji ile değişmesi



Şekil 4.9. MAGAS gel’de, pozitronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzilin (b) enerji ile değişmesi

#### 4.1.4. Toplam K t le Durdurma Gücü

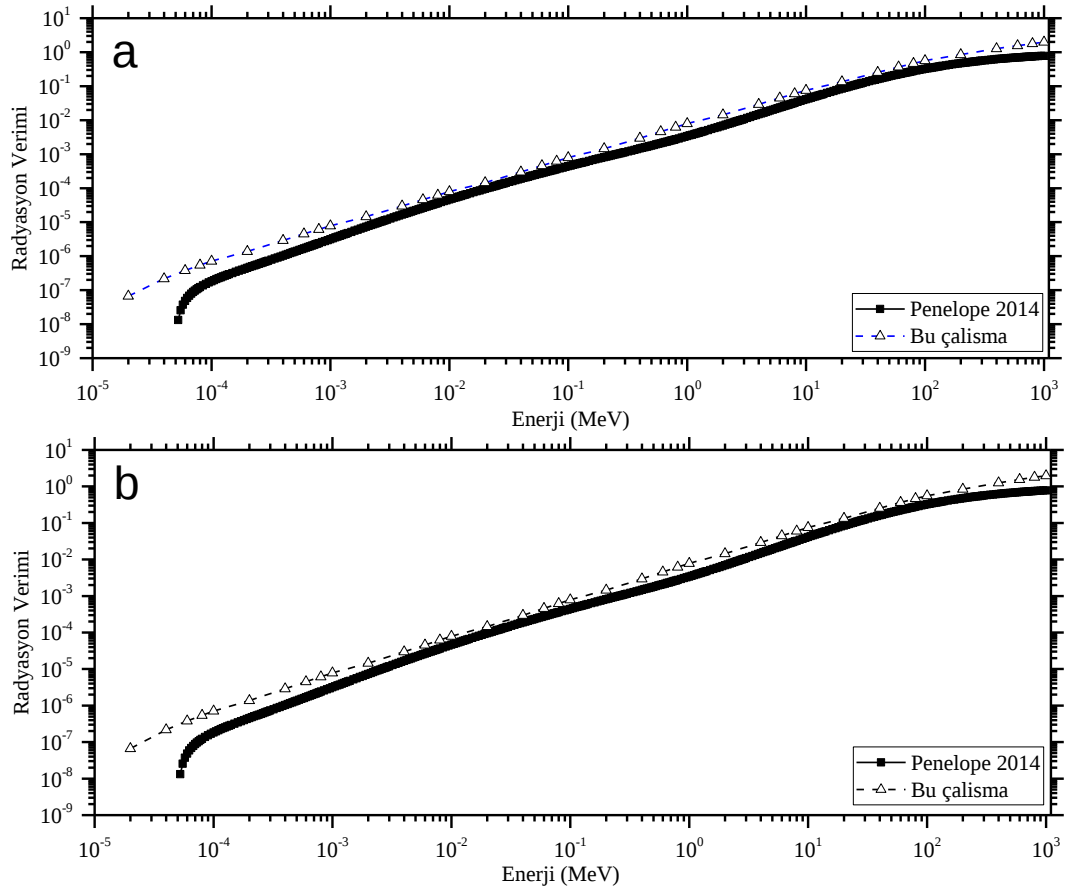
Burada, MAGIC ve MAGAS polimer jeller için, enerjinin bir fonksiyonu olarak, elektron ve pozitronların toplam k t le durdurma gücü, k t le çarpışma durdurma gücü ile k t le radyatif durdurma gücü toplamaları ile elde edildi (Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4). Elde edilen sonuçların grafikleri şekiller 4.3, 4.5, 4.7 ve 4.9’de gösterildi. Bu grafiklerde, 1 keV-1GeV enerji aralığında, elde edilen sonuçların, referans verilerle %15 ile %20’lik fark içinde olduğu gözlemlendi. Ancak; 1 keV’den düşük enerjiler için farkın daha net olduğu ve enerji d ş k e daha netleştiği gözlemlendi.



şekil 4.10. Elektronların radyasyon veriminin enerji ile değişmesi, MAGIC gel (a), MAGAS gel (b)

#### 4.1.5. Radyasyon Verimi

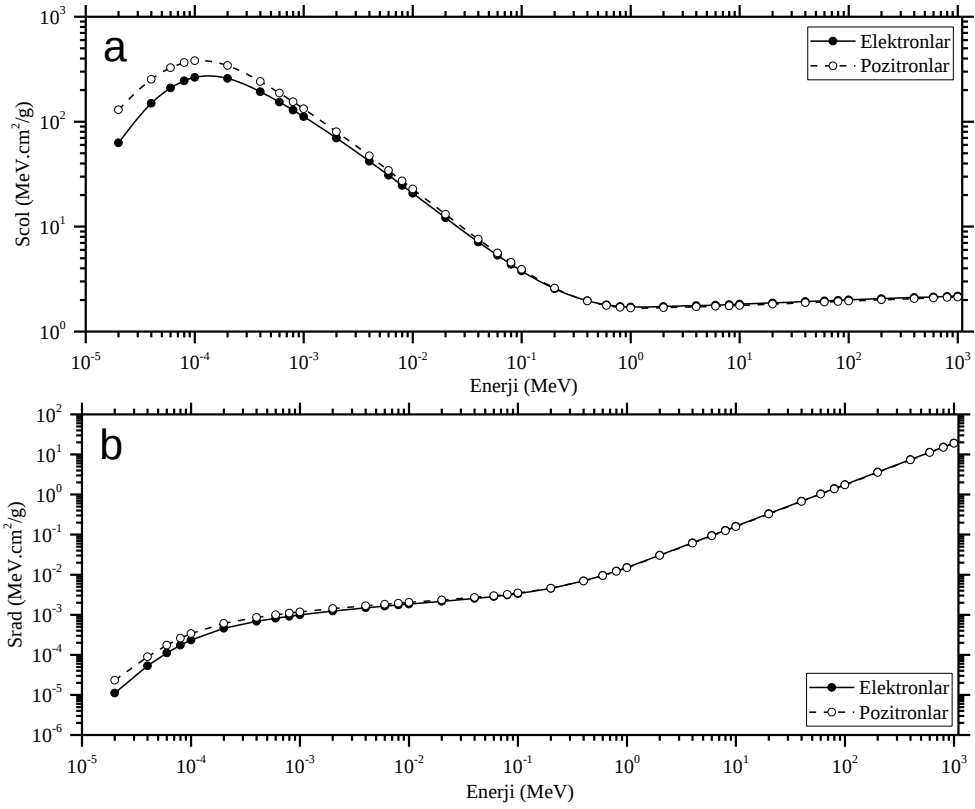
Burada, MAGIC ve MAGAS polimer jeller için, enerjinin bir fonksiyonu olarak, elektron ve pozitronların radyasyon verimi hesaplandı (Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4). Elde edilen sonuçların grafikleri şekiller 4.10 ve 4.11’de gösterildi. Bu grafiklerde, elde edilen sonuçların, referans verilerle karşılaştırıldığında açık fark olduğu ve bu fark düşük ve yüksek enerjilerde daha belirgin olduğu gözlendi.



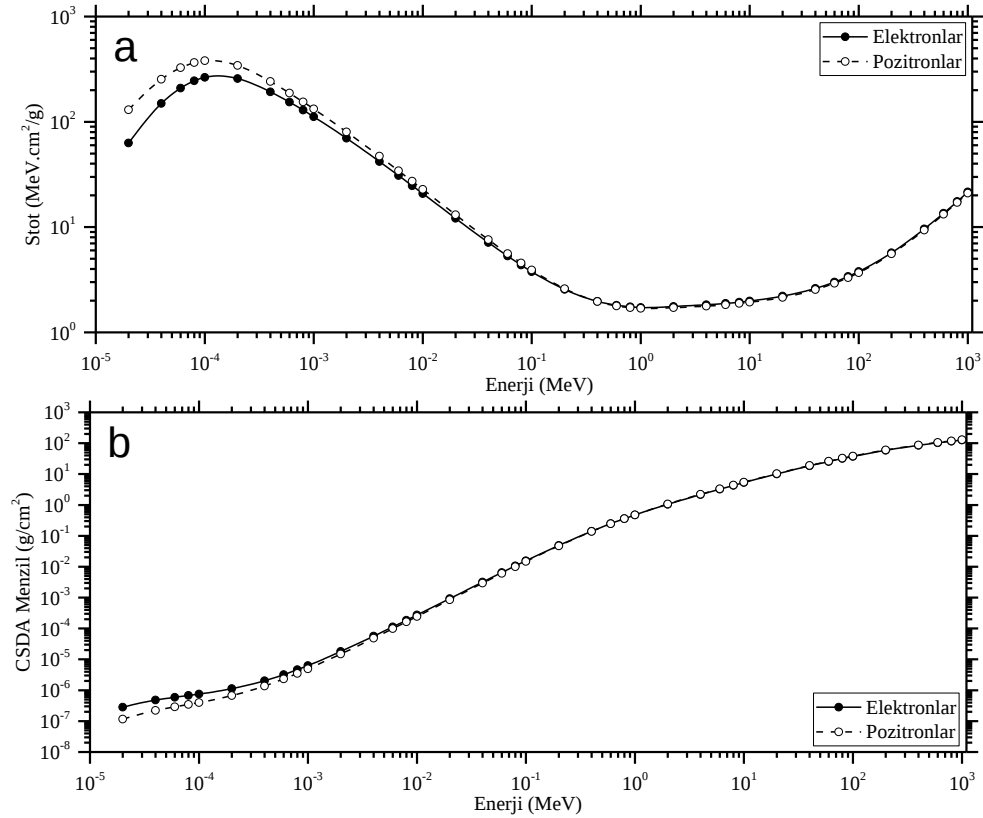
Şekil 4.11. Pozitronların radyasyon veriminin enerji ile değişmesi, MAGIC gel (a), MAGAS gel (b)

#### 4.1.6. CSDA Menzil

Burada, MAGIC ve MAGAS polimer jeller için, enerjinin bir fonksiyonu olarak, elektron ve pozitronların CSDA menzili hesaplandı (Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4). Elde edilen sonuçların grafikleri şekiller 4.3, 4.5, 4.7 ve 4.9’de gösterildi. Bu grafiklerde, 0.5 keV’den büyük enerjiler için, elde edilen sonuçların, referans verilerle çok iyi bir uyum ( % 0.5’lik fark) içinde olduğu gözlemlendi. Ancak; 0.5 keV’den düşük enerjiler için bariz bir fark olduğu ve bu fark düşük enerjilerde daha net olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.12. MAGIC jel’de elektron ve pozitronların kütle çarpışma durdurma gücü (a) ve kütle radyatif durdurma gücü (b) açısından karşılaştırılması



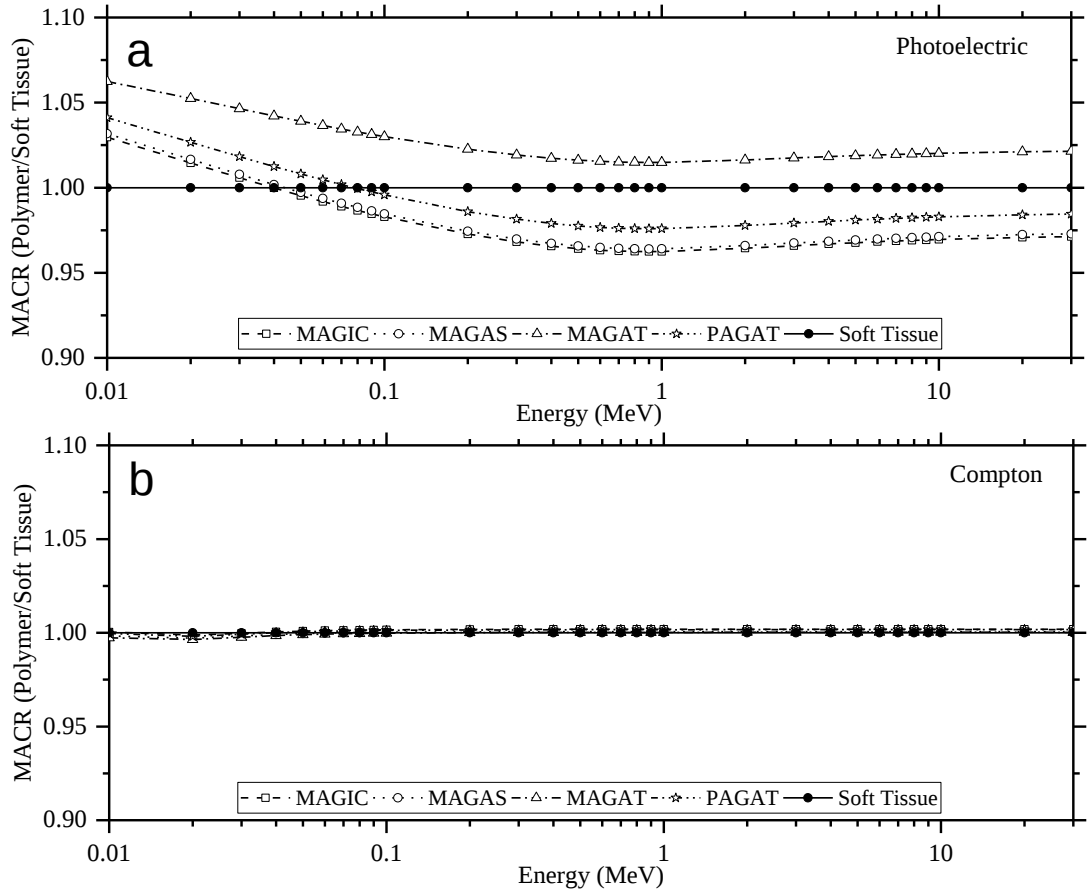
Şekil 4.13. MAGIC jel’de elektron ve pozitronların toplam kütle durdurma gücü (a) ve CSDA menzil (b) açısından karşılaştırılması

#### 4.1.7. Elektronlar ve Pozitronlar

MAGIC jel için elektronlar ve pozitronlar, kütle çarpışma durdurma gücü, kütle radyatif durdurma gücü, toplam kütle durdurma gücü ve CSDA menzili açısından karşılaştırıldı. Elde edilen sonuçların grafikleri şekiller 4.12 ve 4.13’de gösterildi. Bu grafiklerde, 0.1 MeV’den büyük enerjiler için, elektron ve pozitronların sonuçları birbirine çok yakın olduğu. Ancak; 0.1 MeV’den düşük enerjiler için bariz bir fark olduğu gözlemlendi (Tufan et al, 2013).

#### 4.2. PENELOPE ve EGSnrc Simülasyon Sonuçları

Burada, özellikleri tablo 3.1’de verilen yumuşak doku ile bazı polimer jeller için PENELOPE ile EGSnrc simülasyon programaları kullanarak kütle azalım katsayısı, etkileşme tesir kesitleri, durdurma gücü ile menzili ve derin-doz hesaplamaları gerçekleştirildi.

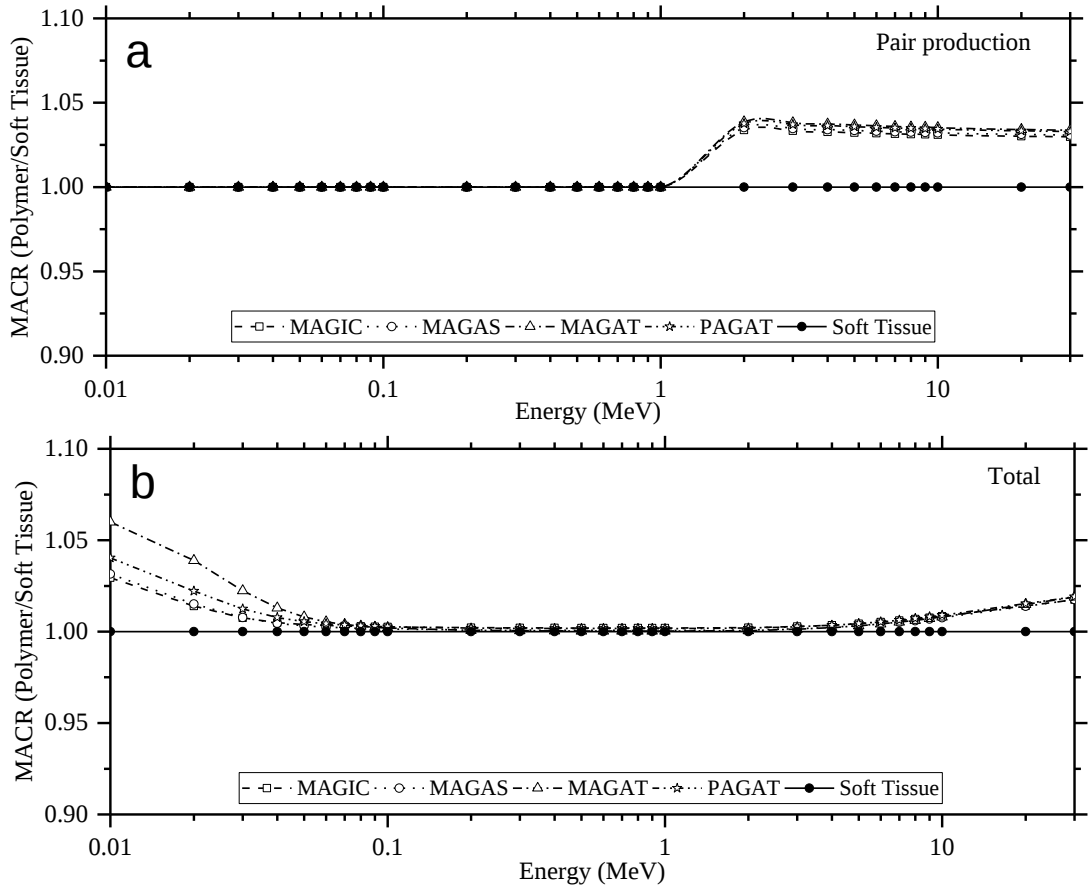


Şekil 4.14. Bazı polimer jellerin foton kütle azalım katsayısı oranı (MACR), fotoelektrik kütle azalım katsayısı (a), Compton kütle azalım katsayısı (b)

#### 4.2.1. Foton Kütle Azalım Katsayısı

Bir soğurucu ortamın foton azalım katsayısı fotoelektrik, Compton ve çift oluşumu olmak üzere üç bileşene ayrılır. Bu çalışmada, 10 keV ile 30 MeV enerji aralığında, yumuşak doku ile MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT gibi bazı polimer jellerin foton kütle azalım katsayısı hesaplandı. Elde edilen sonuçların grafikleri aşağıdaki gibi şekil 4.14 ve 4.15'te gösterildi.

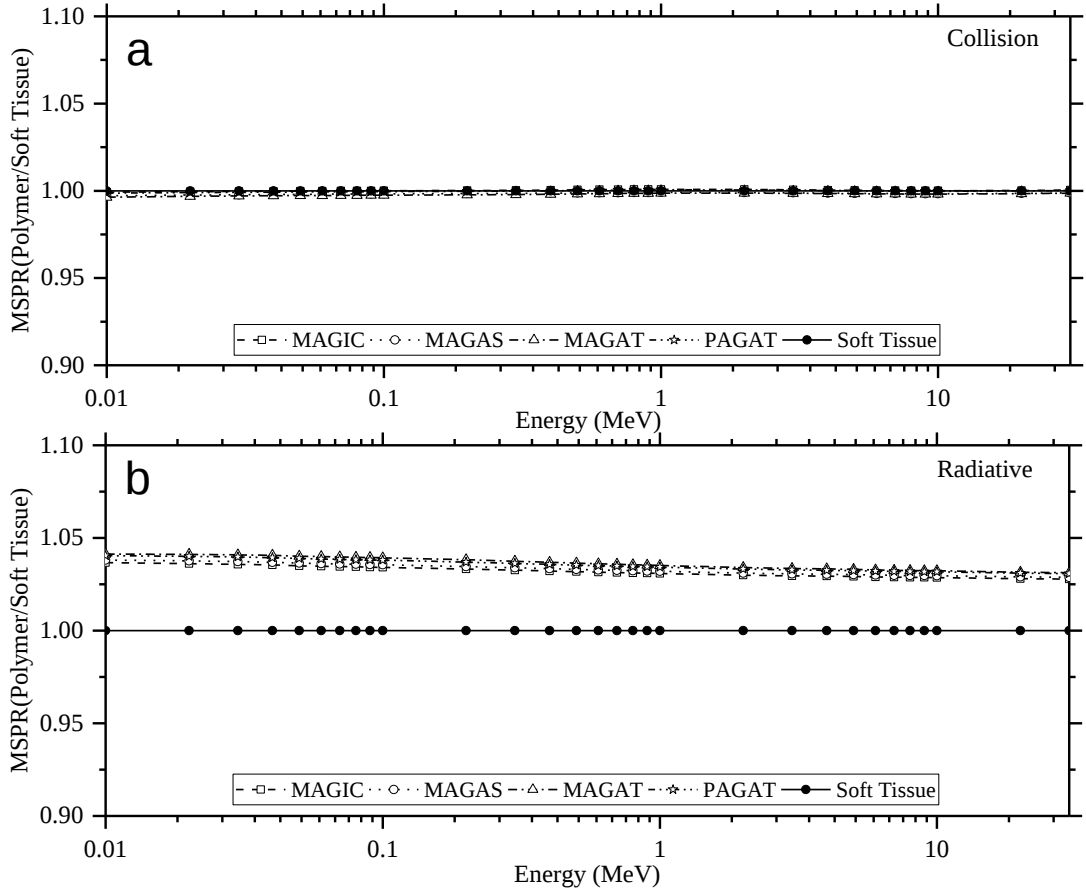
Fotoelektrik alanında, MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT jellerin kütle azalım katsayıları sırasıyla yumuşak dokudan % 5 daha düşük, % 5 daha düşük, % 5 daha yüksek ve % 2 daha düşük olduğu bulundu. İlgili tüm polimer jellerin Compton alanındaki kütle azalım katsayısının yumuşak dokuya çok yakın olduğu görüldü (çok küçük fark ile). Ayrıca, ilgili tüm polimer jellerin çift oluşumu alanındaki kütle azalım katsayısının yumuşak dokudan % 5 daha yüksek olduğu bulundu. Dolayısıyla, ilgili tüm polimer jellerin toplam kütle azalım katsayısının yumuşak dokuya çok yakın (% 0.05-1 fark ile) olduğu görüldü.



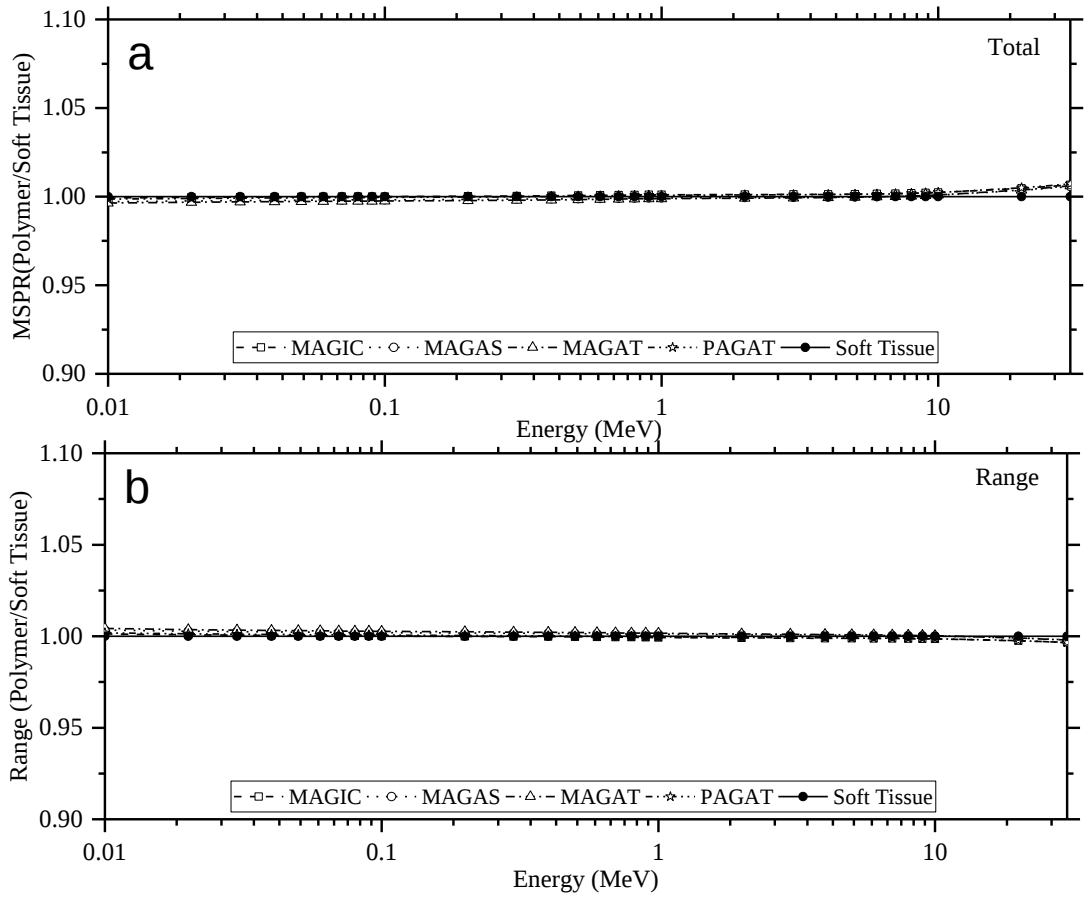
Şekil 4.15. Bazı polimer jellerin foton kütle azalım katsayısı oranı (MACR), çift oluşumu kütle azalım katsayısı (a), toplam kütle azalım katsayısı (b)

#### 4.2.2. Kütle Durdurma Gücü ve CSDA Menzil

Soğrucu bir ortamda elektronların toplam kütle durdurma gücü, kütle çarpışma durdurma gücü ve kütle radyatif durdurma gücü olmak üzere iki bileşene ayrılır. Bu çalışmada, 10 keV ile 30 MeV enerji aralığında, yumuşak doku ile MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT gibi bazı polimer jellerin kütle durdurma gücü ile CSDA menzil hesaplandı. Elde edilen sonuçların grafikleri aşağıdaki gibi şekil 4.16 ve 4.17’de gösterildi. 0.01 MeV-30 MeV enerji aralığında ilgili tüm polimer jellerin kütle çarpışma durdurma gücü, toplam kütle durdurma gücü ve CSDA menzil sonuçları, yumuşak dokuya çok yakın (çok küçük fark ile) olduğu görüldü. Ayrıca, aynı enerji aralığında ilgili tüm polimer jellerin kütle radyatif durdurma gücünün yumuşak dokuya göre % 4 daha yüksek olduğu bulundu. Dolayısıyla, ilgili tüm polimer jellerin toplam kütle durdurma gücü ve menzilin yumuşak dokuya çok yakın (%0.05 fark ile) olduğu görüldü.



Şekil 4.16. Bazı polimer jellerin elektron kütle durdurma gücü oranı (MSPR), kütle çarpışma durdurma gücü (a), kütle radyatif durdurma gücü (b)

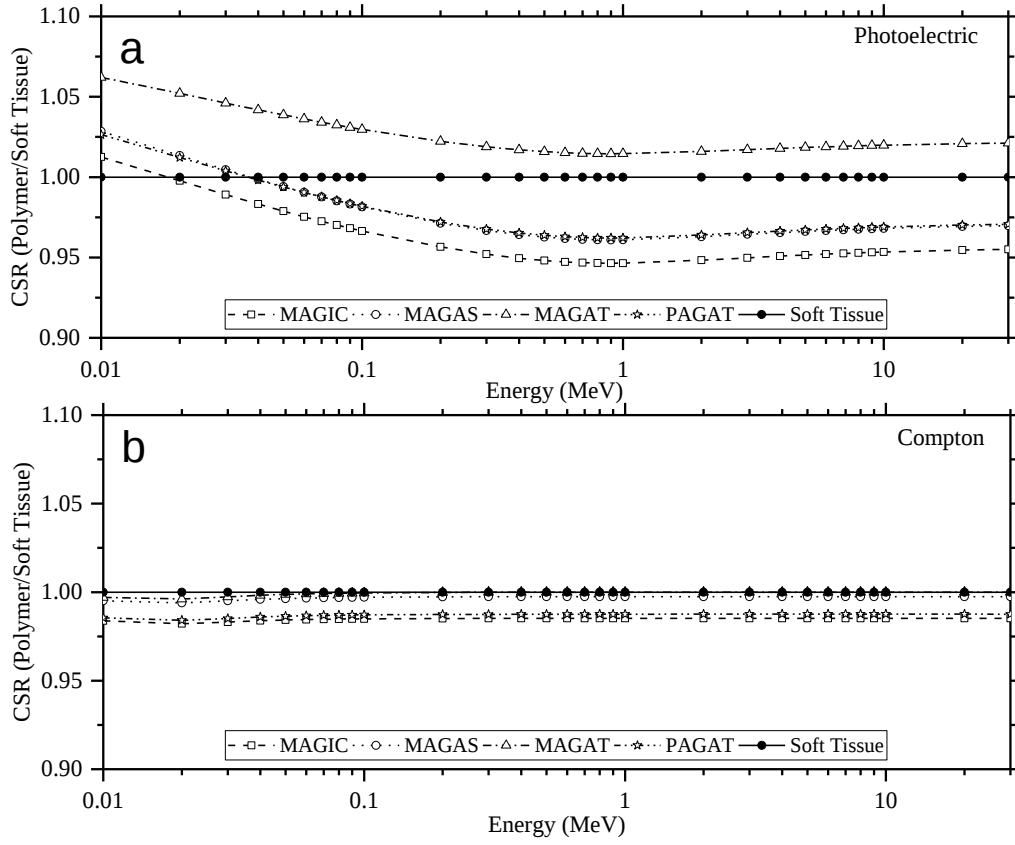


Şekil 4.17. Bazı polimer jellerin elektron kütle durdurma gücü (MSPR) ve menzil oranı, toplam kütle durdurma gücü (a), CSDA menzili (b)

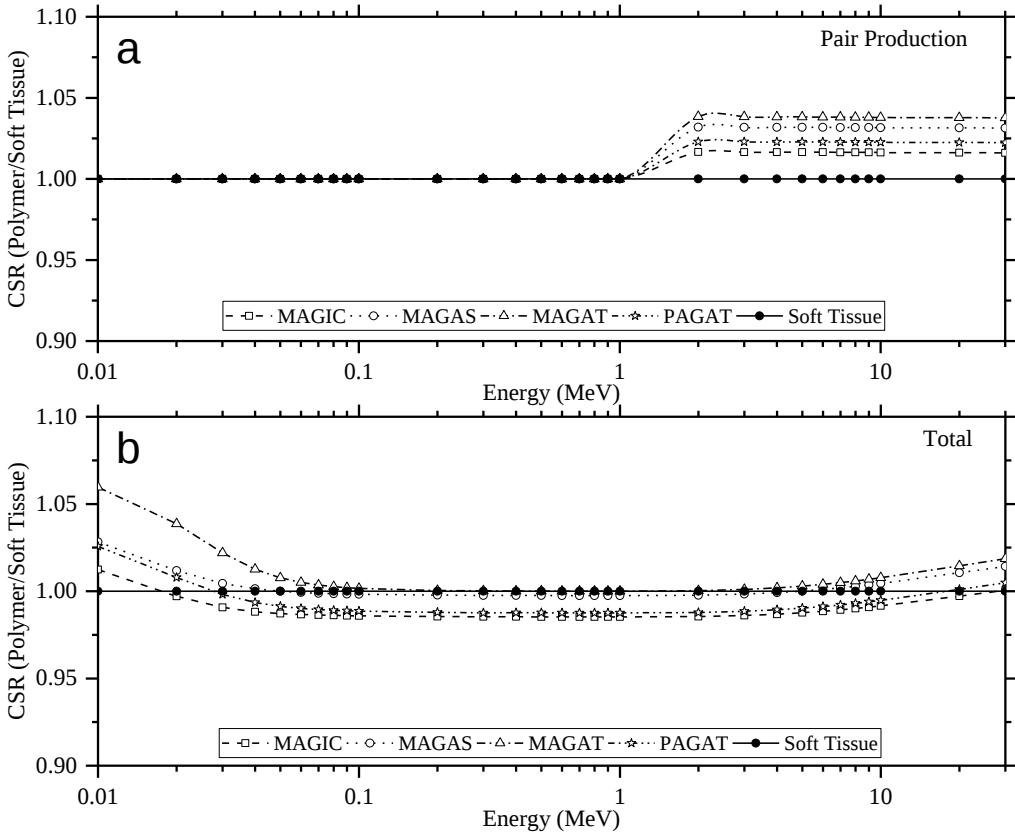
#### 4.2.3. Etkileşme Tesir Kesitleri

Soğurucu bir ortamda fotonların etkileşme tesir kesiti fotoelektrik, Compton ve çift oluşumu olmak üzere üç bileşene ayrılır. Bu çalışmada, 10 keV ile 30 MeV enerji aralığında, yumuşak doku ile MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT gibi bazı polimer jellerde fotonların etkileşme tesir kesitleri hesaplandı. Elde edilen sonuçların grafikleri aşağıdaki gibi şekil 4.18 ve 4.19’da gösterildi.

Fotoelektrik alanında, 1 MeV-30 MeV enerji aralığında, MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT jellerin etkileşme tesir kesitlerinin sırasıyla yumuşak dokudan % 5 daha düşük, % 3 daha düşük, % 2 daha yüksek ve % 3 daha düşük olduğu bulundu. Ayrıca, MAGIC ve PAGAT polimer jellerin Compton alanındaki etkileşme tesir kesitlerinin, 0.01 MeV - 30 MeV enerji aralığında yumuşak dokuya göre % 2 daha düşük olduğu bulundu.



Şekil 4.18. Bazı polimer jeller için foton tesir kesitinin oranı (CSR), fotoelektrik tesir kesiti (a), Compton tesir kesiti (b)

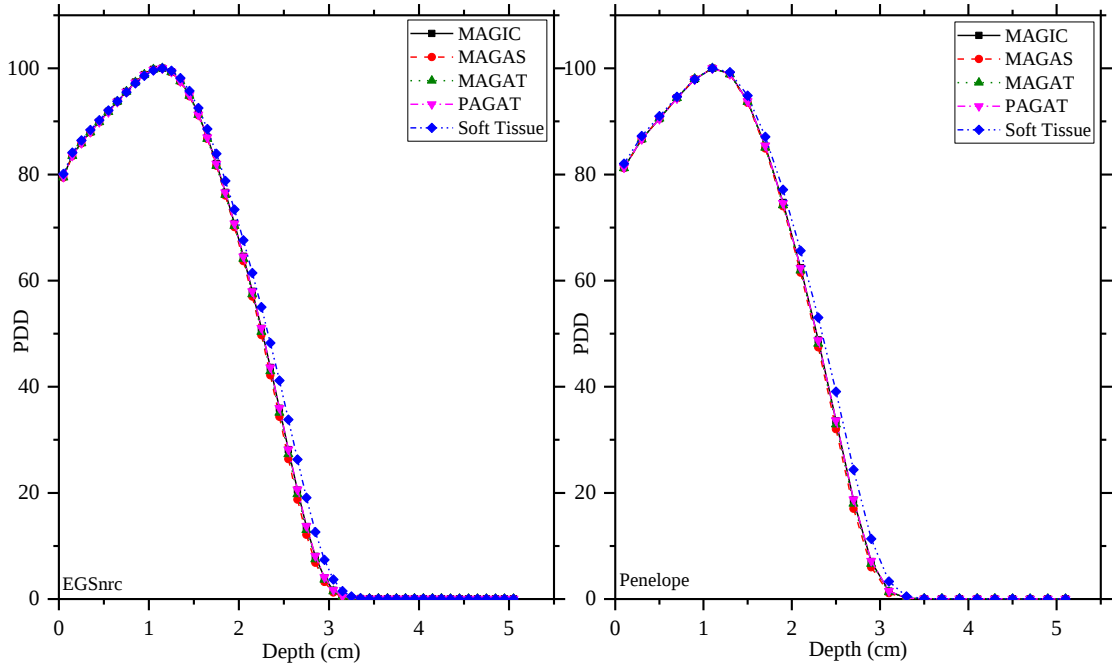


Şekil 4.19. Bazı polimer jeller için foton tesir kesitinin oranı (CSR), çift oluşumu tesir kesiti (a), toplam tesir kesiti (b)

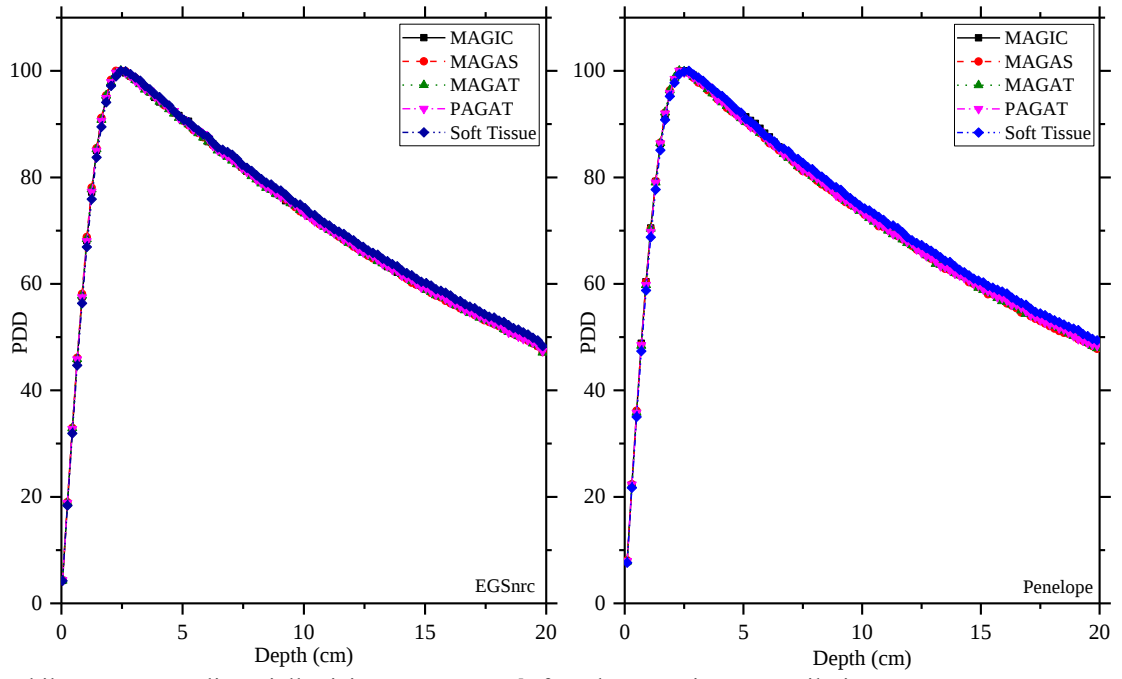
MAGAS ve MAGAT jellerin etkileşme tesir kesitlerinin ise aynı enerji aralığında yumuşak dokuya göre % 0.75 daha düşük olduğu bulundu. Ayrıca, 2 MeV - 30 MeV enerji aralığında MAGIC, MAGAS, MAGAT ve PAGAT jellerin çift oluşumu alanındaki etkileşme tesir kesitlerinin, yumuşak dokudan sırasıyla % 2 daha yüksek, % 3 daha yüksek, % 4 daha yüksek ve % 2.5 daha yüksek olduğu bulundu. Dolayısıyla, ilgili tüm polimer jeller için fotonların toplam etkileşme tesir kesitlerinin yumuşak dokuya çok yakın (% 0.002 - % 6 fark ile) olduğu görüldü.

#### 4.2.4. Yüzde Derin-Doz

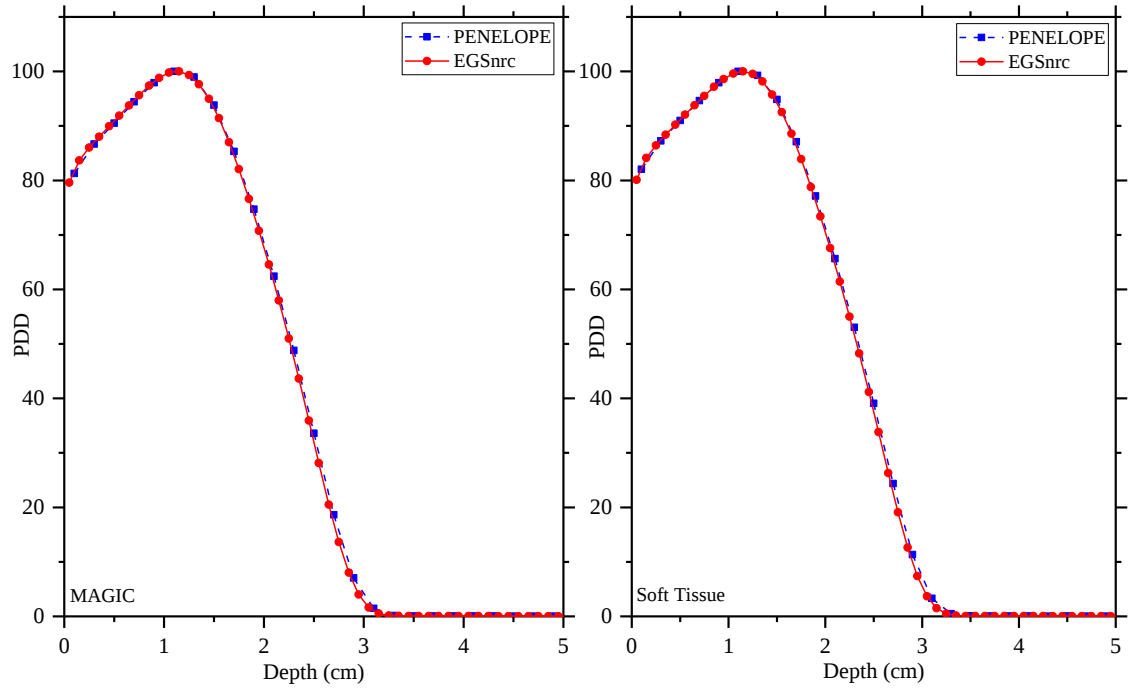
Burada, 6 MeV'li elektronlar ve fotonlar demeti için yumuşak doku ile bazı polimer jeller için PENELOPE ile EGSnrc Monte Carlo Derin-Doz eğrileri oluşturuldu ve elde edilen sonuçlar şekiller 4.20 ve 4.21'de gösterildi. PENELOPE ile oluşturulan elektronların Derin-Doz eğrilerinde, yumuşak doku ile polimer jellerin arasında, 0.1 cm-1.1 cm derinlik aralığında %1.5 fark, 1.1 cm-3.4 cm derinlik aralığında ise %1-%5 fark bulundu (şekil 4.20). EGSnrc ile oluşturulan elektronların Derin-Doz eğrilerinde polimer jeller ile yumuşak dokunun arasında 0.05 cm-1.1 cm derinlik aralığında % 0.5 fark ve 1.15 cm-3.4 cm derinlik aralığında %1-%6 fark bulundu (şekil 4.20).



Şekil 4.20. Bazı polimer jeller için 6 MeV enerjili elektronların Derin-Doz eğrileri



Şekil 4.21. Bazı polimer jeller için 6 MeV enerjili fotonların Derin-Doz eğrileri

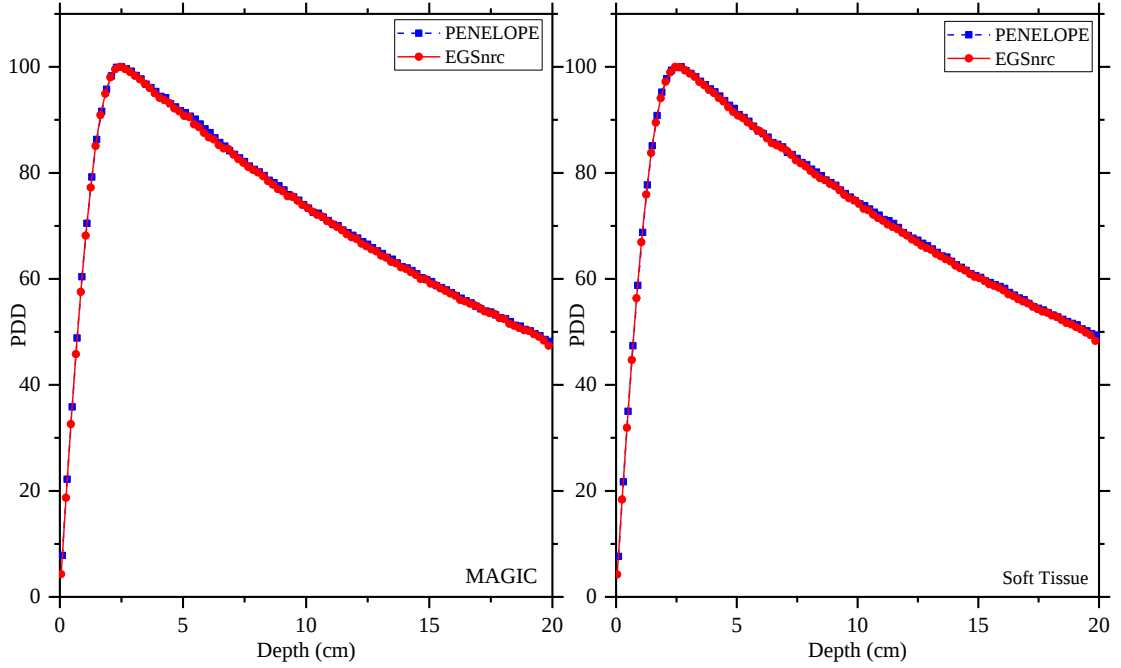


Şekil 4.22. MAGIC jel ve yumuşak doku için 6 MeV enerjili elektronların PENELOPE ve EGSnrc Derin-Doz eğrileri

Dolayısıyla, elektronlar demeti için yumuşak doku ile ilgili polimer jellerin Derin-Doz eğrilerinin hem EGSnrc hem PENELOPE’de birbirine çok yakın olduğu görüldü.

Benzer şekilde, PENELOPE ile oluşturulan fotonların Derin-Doz eğrilerinde,

ilgili polimer jeller ile yumuşak dokunun arasında 0.1 cm-2.3 cm derinlik aralığında %1 fark ve 2.3 cm-20 cm derinlik aralığında ise % 0.85 - %1 fark bulundu (şekil 4.21). EGSnrc ile oluşturulan Derin-Doz eğrilerinde, ilgili polimer jeller ile yumuşak dokunun arasında 0.05 cm-2.45 cm derinlik aralığında % 0.5 fark, 2.45 cm-20 cm derinlik aralığında ise % 0.5 - %1 fark bulundu (şekil 4.21).



Şekil 4.23. MAGIC jel ve yumuşak doku için 6 MeV enerjili fotonların PENELOPE ve EGSnrc Derin-Doz eğrileri

Dolayısıyla, fotonlar demeti için yumuşak doku ile ilgili polimer jellerin Derin-Doz eğrilerinin hem EGSnrc hem PENELOPE’de birbirine çok yakın olduğu görüldü. Ayrıca, MAIC plimer jel için EGSnrc ve PENELOPE ile oluşturulan elektron ve fotonların Derin-Doz eğrileri karşılaştırıldı (şekil 4.22 ve 4.23). Karşılaştırma sonucunda, ilgili derinlik (0.05 cm-20 cm) aralığında EGSnrc ile PENELOPE arasında % 0.5 fark bulunudu.

## 5. SONUÇ

Sonuç olarak, referans veriler ile elde edilen durdurma gücü ile menzil sonuçların arasında ortaya çıkan varyans, enerji aralığına göre sonraki nedenlerden kaynaklanmaktadır. 20 eV-1GeV enerji aralığındaki varyans, hedef maddenin ortalama atom ve kütle numarası ile durdurma gücü hesaplamalarında kullanılan yöntemlerden kaynaklandığı düşünüldü. Ayrıca, CSDA menzil ile radyasyon veriminin, durdurma gücü verilerinden hesaplandığı için durdurma gücünde ortaya çıkan varyans, otomatik olarak menzil ve radyasyon veriminin sonuçlarına yansımıştır. 50 MeV-1GeV enerji aralığındaki varyans, yoğunluk etkisi düzeltmesinde kullanılan yöntemden kaynaklandığı düşünüldü. Dolayısıyla, düşük enerji bölgesinde, hesaplanan ve referans radyatif durdurma gücü arasındaki fark çok belirgin ancak; çarpışma durdurma gücü ile karşılaştırıldığında ihmal edilebileceği açıktır. Daha önce bahsedildiği gibi, hesaplanan ve referans veriler arasında düşük ve yüksek enerji bölgesinde bazı sapmalar gözlemlendi ancak; arasındaki benzerlik dikkat çekicidir.

Bu çalışmada, bazı polimer jellerin yumuşak doku eşdeğerliliği araştırılması sonucunda, yumuşak dokunun toplam kütle azalım katsayısı sonuçları, ilgili enerji aralığında ve özellikle 1 MeV-10 MeV aralığında, polimer jellerin sonuçlarına çok yakın (% 0.05-0.1 fark ile) olduğu gözlemlendi. Ayrıca, ilgili tüm polimer jellerin toplam etkileşme tesir kesitlerinin, yumuşak dokuya çok yakın olduğu (% 0,002-6 fark ile) da gözlemlendi. Yumuşak dokunun toplam kütle durdurma gücü ve CSDA menzil sonuçlarının, ilgili enerji aralığında, polimer jellerin sonuçlarına çok yakın (% 0.05 fark ile) olduğu gözlemlendi. Ayrıca, 0.05 cm-20 cm derinlik aralığında 6 MeV’li elektron ve foton demeti için yumuşak doku ve ilgili polimer jellerin Derin-Doz eğrileri arasındaki farkın yaklaşık %1 ve daha az olduğu bulundu.

Buna göre, hesaplamalar mevcut çalışmada gösterildiği gibi farklı modellerin denklemleri programlayarak, farklı modellere ve farklı hedef malzemelere genişletilebilir. Son yıllarda, MAGAS ve MAGIC gibi polimer jeller, radyoterapide özellikle 3D doz dağılımında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle, mevcut çalışmada hesaplanan veriler önemlidir ve hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar) doz hesaplamaları için kullanılabilir. Ayrıca, bu çalışmadaki ilgili tüm polimer jellerin radyolojik olarak yumuşak doku eşdeğerleri olarak kabul edilebileceği sonucuna varıldı.

## KAYNAKLAR

- Akar, A., Gümüş, H., 2005. Electron stopping power in biological compounds for low and intermediate energies with the generalized oscillator strength (GOS) model. *Radiation Physics and Chemistry*, 73(4), 196-203.
- Akar, A., Gümüş, H., Okumuşoğlu, N. T., 2006. Electron inelastic mean free path formula and CSDA-range calculation in biological compounds for low and intermediate energies. *Applied radiation and isotopes*, 64(5), 543-550.
- Aljamal, M., Zakaria, A., Shamsuddin, S., 2013. Radiological properties of MAGIC normoxic polymer gel dosimetry. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 423, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
- Ashley, J. C., 1988. Interaction of low-energy electrons with condensed matter: stopping powers and inelastic mean free paths from optical data. *Journal of electron spectroscopy and related phenomena*, 46(1), 199-214.
- Attix, F. H., 2008. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley and Sons.
- Berger, M. J., Coursey, J. S., Zucker, M. A., Chang, J., 1998. *Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions*. Gaithersburg, MD: NIST Physics Laboratory.
- Berger, M. J., Seltzer, S. M., 1982. *Stopping powers and ranges of electrons and positrons*. National Bureau of Standards Center for Radiation Research, US.
- Bragg, W. H., Kleeman, R., 1905. On the  $\alpha$  particles of radium, and their loss of range in passing through various atoms and molecules. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 10(57), 318-340.
- Brown, S., Venning, A., De Deene, Y., Vial, P., Oliver, L., Adamovics, J., Baldock, C., 2008. Radiological properties of the PRESAGE and PAGAT polymer dosimeters. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(12), 1970-1974.
- Cabrera-Trujillo, R., Cruz, S. A., Oddershede, J., Sabin, J. R., 1997. Bethe theory of stopping incorporating electronic excitations of partially stripped projectiles. *Physical Review A*, 55(4), 2864.
- Day, M. J., Stein, G., 1950. Chemical effects of ionizing radiation in some gels. *Nature*, 166(4212), 146-147.
- De Deene, Y., 2004. Essential characteristics of polymer gel dosimeters. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 3, No. 1, p. 006). IOP Publishing.
- De Vera, P., Abril, I., Garcia-Molina, R., 2011. Inelastic scattering of electron and light ion beams in organic polymers. *Journal of Applied Physics*, 109(9), 094901.
- El-Ghossain, M. O., 2017. Calculations of stopping power, and range of electrons interaction with different material and human body parts. *International journal of scientific and technology research*, January 2017 ISSN 2277-8616, 6(issue 01).
- Emfietzoglou, D., Nikjoo, H., 2007. Accurate electron inelastic cross sections and stopping powers for liquid water over the 0.1-10 keV range based on an improved dielectric description of the Bethe surface. *Radiation Research*, 167(1), 110-120.
- Fano, U., 1956. Atomic theory of electromagnetic interactions in dense materials. *Physical Review*, 103(5), 1202.
- Garcia-Molina, R., Abril, I., Kyriakou, I., Emfietzoglou, D., 2017. Inelastic scattering and energy loss of swift electron beams in biologically relevant materials. *Surface and Interface Analysis*, 49(1), 11-17.

- Groom, D. E., Klein, S. R., 2000. Passage of particles through matter. *The European Physical Journal C-Particles and Fields*, 15(1), 163-173.
- Gümüş, H., 2005. Simple stopping power formula for low and intermediate energy electrons. *Radiation Physics and Chemistry*, 72(1), 7-12.
- Gümüş, H., 2008. New stopping power formula for intermediate energy electrons. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(12), 1886-1890.
- Gümüş, H., Kabaday, Ö., 2013. The Effect of Some Effective Quantities to Electronic Stopping Power. *Journal of Physical Science and Application*, 3(3), 163.
- Gümüş, H., Köksal, F., 2002. Effective stopping charges and stopping power calculations for heavy ions. *Radiation effects and defects in solids*, 157(5), 445-458.
- Gümüş, H., Namdar, T., Bentabet, A., 2018. Positron stopping power in some biological compounds for intermediate energies with generalized oscillator strength model. *Int J Mol Biol Open Access*, 3(3), 87-94.
- Hassani, H., Nedaie, H. A., Zahmatkesh, M. H., Shirani, K., 2014. A dosimetric study of small photon fields using polymer gel and Gafchromic EBT films. *Medical Dosimetry*, 39(1), 102-107.
- Hemlata, S., Rathi, S. K., Verma, A. S., 2013. Ranges of Electrons for Human Body Substances. *Research Journal of Chemical Sciences*, ISSN, 2231, 606X.
- Hoecker, F. E., Watkins, I. W., 1958. Radiation polymerization dosimetry. *The International journal of applied radiation and isotopes*, 3(1), 31-35.
- Jablonski, A., Tanuma, S., Powell, C. J., 2008. Modified predictive formula for the electron stopping power. *Journal of Applied Physics*, 103(6), 063708.
- Kawrakow, I., Rogers, D. W. O., 2000. The EGSnrc code system. NRC Report PIRS-701, NRC, Ottawa, 17.
- Maryanski, M. J., Ibbott, G. S., Eastman, P., Schulz, R. J., Gore, J. C., 1996. Radiation therapy dosimetry using magnetic resonance imaging of polymer gels. *Medical physics*, 23(5), 699-705.
- Maryanski, M. J., Schulz, R. J., Ibbott, G. S., Gatenby, J. C., Xie, J., Horton, D., Gore, J. C., 1994. Magnetic resonance imaging of radiation dose distributions using a polymer-gel dosimeter. *Physics in Medicine & Biology*, 39(9), 1437.
- Mohammed, S. H., Trabelsi, A., Manai, K., 2018. Stopping power, CSDA range, absorbed dose and cross sections calculations of f18 simulated in water using geant4 code. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(6), 1-10.
- Mostaar, A., Hashemi, B., Zahmatkesh, M. H., Aghamiri, S. M. R., Mahdavi, S. R., 2011. Development and characterization of a novel PRESAGE formulation for radiotherapy applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10), 1540-1545.
- Podgoršak, E. B., 2016. *Radiation Physics for Medical Physicists* (3<sup>rd</sup> edition). Springer.
- Razak, N. N. A., Rahman, A. A., Kandaiya, S., Mustafa, I. S., Mahmoud, A. A., Yahaya, N. Z., 2016. Optimisation of the MAGAT gel dosimeter compositions. *International Journal of Radiation Research*, 14(4), 305.
- Rohrlich, F., Carlson, B. C., 1954. Positron-electron differences in energy loss and multiple scattering. *Physical review*, 93(1), 38.
- Saadi, M. K., Machrafi, R., 2020. Development of a new code for stopping power and CSDA range calculation of incident charged particles, part A: Electron and positron. *Applied Radiation and Isotopes*, 161, 109145.

- Salvat, F., 2014. PENELOPE A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. NEA, Data Bank, Spain.
- Salvat, F., 2015. PENELOPE-2014-A Code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport (NEA/NSC/DOC).
- Saxena, A., Rathi, S. K., Verma, A. S., 2011. Continuous Slowing Down Approximation (CSDA) ranges of electrons for biomedical materials, *Elixir Bio. Phys*, 37, 3860-3863.
- Sternheimer, R. M., Berger, M. J., Seltzer, S. M. (1984). Density effect for the ionization loss of charged particles in various substances. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 30(2), 261-271.
- Sugiyama, H., 1985. Stopping power formula for intermediate energy electrons. *Physics in Medicine & Biology*, 30(4), 331.
- Tai, H., Bichsel, H., Wilson, J. W., Shinn, J. L., Cucinotta, F. A., Badavi, F. F., 1997. Comparison of stopping power and range databases for radiation transport study. NASA.
- Tan, Z., Xia, Y., Zhao, M., Liu, X., Li, F., Huang, B., Ji, Y., 2004. Electron stopping power and mean free path in organic compounds over the energy range of 20–10,000 eV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 222(1-2), 27-43.
- Townson, R., Tessier, E., Mainegra, E., Walters, B., 2020. Getting Started with EGSnrc. Ionizing Radiation Standards. National Research Council of Canada.
- Tsai, Y. S., 1974. Pair production and bremsstrahlung of charged leptons. *Reviews of Modern Physics*, 46(4), 815.
- Tufan, M. C., Koroglu, A., Gumus, H., 2005. Stopping power calculations for partially stripped projectiles in high energy region. *Acta physica polonica A*, 107, 3.
- Tufan, M. Ç., Namdar, T., Gümüş, H., 2013. Stopping power and CSDA range calculations for incident electrons and positrons in breast and brain tissues. *Radiation and environmental biophysics*, 52(2), 245-253.
- Venning, A. J., Hill, B., Brindha, S., Healy, B. J., Baldock, C., 2005. Investigation of the PAGAT polymer gel dosimeter using magnetic resonance imaging. *Physics in Medicine and Biology*, 50(16), 3875.
- Venning, A., Healy, B., Nitschke, K., Baldock, C., 2005. Investigation of the MAGAS normoxic polymer gel dosimeter with Pyrex glass walls for clinical radiotherapy dosimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 555(1-2), 396-402.

## **EKLER**

### **EK1. Monte Carlo Modellemesi (PENELOPE – EGSnrc)**

Monte Carlo yöntemi, istatistiksel süreçleri içeren problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, radyasyon taşıma süreçlerinin stokastik doğası nedeniyle medikal fizikte çok kullanışlıdır. Monte Carlo yöntemi, istatistiksel simülasyonun şans oyunlarına benzerliğinden ve Monako prensliğindeki şehrin kumar ve benzeri şans oyunları için bir merkez olması nedeniyle Von Neumann tarafından isimlendirildi. Von Neumann, Ulam ve Fermi bu yöntemi, II. Dünya Savaşı sırasında Los Alamos'taki Manhattan Projesi'nde nötron difüzyon problemlerine uyguladılar. 1948 yılında Fermi, Metropolis ve Ulam, Schrödinger denkleminin öz değerlerini Monte Carlo tahminleri ile elde ettiler. Monte Carlo yöntemlerin Kullanım Alanları ve uygulamaları o zamandan beri sürekli artışta olup özellikle nükleer fizik ve radyasyonun maddedeki taşınması ve doz hesaplamalarında önemli bir rol oynama başladı. Monte Carlo yöntemi gerçekleştirilmesi zor olan deneylerde veya bir deney sonuçları doğrulamak için de çoğu zaman yardımcı oldu (Zaidi, 1999). Son yıllarda Monte Carlo yöntemi kullanarak MCNP, PENELOPE, FLUKA ve EGSnrc gibi çok sayıda bilgisayar kod sistemi geliştirilmiştir.

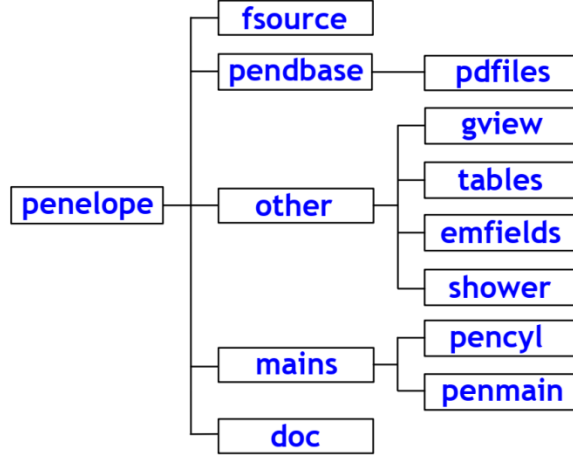
### **PENELOPE**

PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons in matter), maddedeki pozitron ve elektronların penetrasyonu ve enerji kaybı anlamı taşıyan latince ifadenin baş harfleridir. Keyfi malzemelerde pozitron, elektron ve foton taşınması Monte Carlo simülasyonu gerçekleştiren F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea and J. Sempau tarafından geliştirilen bir bilgisayar kod sistemidir. Bu kodun simülasyon algoritması saçılma modeli olup sayısal veritabanları ile analitik kesit modelleri farklı etkileşim mekanizmaları için bileştirir. Bu kod 50 eV- 1 GeV enerji aralığında uygulanabilir. Pozitron, elektron ve foton taşınması sırasında aşağıdaki etkileşimler dikkate alınır.

- 1) Elektronların ve pozitronların elastik saçılması, esnek olmayan çarpışmaları ve Bremsstrahlung emisyonu.
- 2) Pozitron yok olması.
- 3) Fotonların Rayleigh saçılması, Compton saçılması, fotoelektrik soğurulması.
- 4) Elektron-pozitron çift oluşumu.

## PENELOPE-2014

PENELOPE 2014 versiyonunun paket içinde bulunan ana ve yardımcı programlar aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



1) **fsource** (*fortran file source of penelope*): PENELOPE kod sisteminin fortran kaynaklı dosyalarıdır ve aşağıdaki dosyaları içermektedir:

- a) **penelope.f**: Taşıma / fizik simülasyon rutinleri.
- b) **rita.f** : Tek değişkenli dağılımlar için rastgele örnekleme rutinleri.
- c) **Pengeom.f**: Kuadrik geometri paketi.
- d) **Penvard.f**: Varyans azaltma rutinleri.
- e) **Material.f**: Tesir kesit veri dosyasını oluşturan program.
- f) **Timer.f**: Zamanlama rutinleri.

2) **pendbase** (*penelope data base*) PENELOPE veri tabanıdır:

- a) Malzeme tesir kesit veri dosyalarını oluşturmak için gerekli dosyalardır.
- b) PENELOPE'nin etkileşim tesir kesitlerin veri tabanı olan **pdfiles** bu dosya içindedir.
- c) Çalıştırılabilir dosyalar *material.exe*, *tables.exe* ve *shower.exe* **pendbase** içine yerleştirilmelidir.

3) **Other**: Aşağıdaki yardımcı programları içermektedir:

- a) **gview**: Kuadrik geometri görselleştiren ek programdır.
- b) **Shower**: Parçacıkların malzeme içindeki izlerini bilgisayar ekranında görüntüleyen programdır.
- c) **Tables**: Etkileşme tesir kesitleri ve diğer taşıma özelliklerinin (durdurma

gücü, menzil, azalım katsayısı...vs) tabloları oluşturan ve görüntüleyen programdır.

**d) emfields:** Statik elektromanyetik alanlarda radyasyon taşınmasını simüle eden bir paket.

**4) mains:** Aşağıdaki ana programları içermektedir:

### 1) Pencyl

- a) Silindirik geometriler için kullanılan ana programdır.
- b) Çok katmanlı silindirik geometrilerde electron – pozitron – foton taşıma simülasyonu gerçekleştirir.
- c) Kullanılan malzemenin geometresi Z eksenine göre simetriktir.
- d) Birincil parçacık veya foton demetinin başlangıç yönü ve çapı merkezi eksen konisi içinde simetrik olarak örneklenir.
- e) Bu programın (Pencyl) çalıştırılması için gerekli dosyalar, materyal dosyası (**.mat**) ve giriş dosyasıdır (**.in**).
- f) Pencyl ile simülasyon hem iç kaynak (internal) hem dış kaynak (external) için yapılabilir.

### 2) Penmain

- a) Genel kuadrik geometriler için kullanılan ana programdır.
- b) Değişik geometriye sahip olan malzemelerde elektron – pozitron – foton taşınmasını simüle eder.
- c) Kullanılan malzemenin geometrisi Z eksenine göre simetriktir.
- d) Birincil parçacık veya foton demetinin başlangıç yönü ve çapı merkezi eksen konisi içinde simetrik olarak örneklenir.
- d) Pencyl gibi simülasyon hem iç kaynak (internal) hem dış kaynak (external) için yapılabilir.
- e) Bu programın (Penmain) çalıştırılması için gerekli dosyalar, materyal dosyası (**.mat**), giriş dosyasıdır (**.in**) ve geometri (**.geo**) dosyasıdır.

**3) Examples:** Pencyl ve penmain ile ilgili bazı örnekleri içermektedir.

**4) gscripts:** Simülasyon sonuçlarının grafiklerini çizen **Gnuplot** komut dosyalarını içermektedir.

**5) doc:** Kod sisteminin dokümantasyonu. Aşağıdaki dosyaları içermektedir:

- a) tutorial.pdf
- b) Penelope-2014-NEA.pdf.

### **PENELOPE'nin Çalışması İçin Gerekli Yardımcı Programlar**

- 1) Fortran 90 derleyici (Compiler) veya GNU Fortran derleyici (gfortran Compiler), Win32 ve Win64 sürümleri yandaki linkten indirilebilir. (<http://mingw-w64.sourceforge.net>).
- 2) Sonuçları görselleştirmek için grafik çizim programı olan **Gnuplot** kullanılması önerilir, Windows sürümü yandaki linkten indirilebilir. (<http://www.gnuplot.info>).

### **PENELOPE'nin Çalıştırılması**

PENELOPE'nin çalıştırılması aşağıdaki gibi üç aşamadan oluşur, bunlar:

- 1) Çalışma dizini oluşturulması.
- 2) Materyal dosyası oluşturulması.
- 3) Tables, Pencyl ve Penmain çalıştırılması.

### **Çalışma Dizini Oluşturulması**

Çalışma dizini oluşturmak için aşağıdaki adımlar takip edilmelidir.

- 1) bilgisayarın masaüstünde bir dosya (**work**) oluşturulur ve bu dosya içinde başka bir dosya (**compile**) daha oluşturulur ve sonuçta elde edilen dizin (**\work\compile**) şeklinde olur.
- 2) PENELOPE program paketinden, **fsource** dosyasının (**\penelope\fsource**) içindeki bütün dosyalar (**penelope.f**, **material.f**, **pengeom.f**, **penvared.f**, **rita.f**, **timer.f**) compile dosya içine kopyalanır.

### **Materyal Dosyası Oluşturulması**

Materyal dosyası aşağıdaki adımlar takip edilerek oluşturulur.

- 1) Microsoft Windows komut istemi çalıştırılır ve aşağıdaki komutlar yazılarak **material.exe** uygulaması oluşturulur.

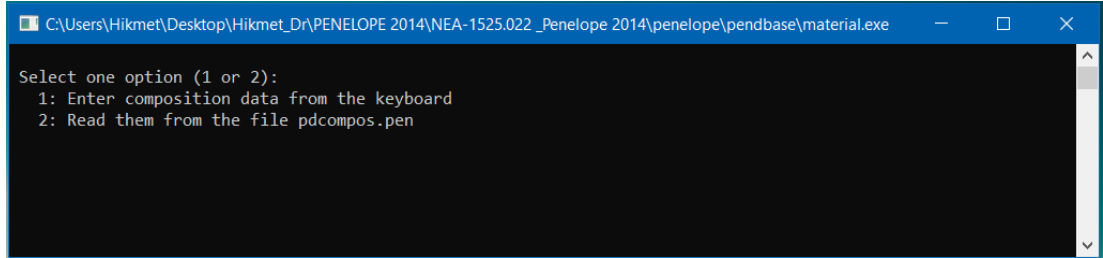
> *cd Desktop\work\compile*

> *gfortran -Os -Wall material.f -o material.exe*

- 2) **material.exe** uygulaması **compile** dosyasından **pendbase** dosyasına

(\penelope\pendbase) alınır.

3) **material.exe** uygulaması çalıştırılınca aşağıdaki gibi ekran açılır.



4) Programın yönlendirmesi ile açılan ekrana ortama (malzeme) ait atom numarası ve yoğunluğu manuel (**klaviyeden**) veya programın kendi materyal listesinde hazır bulunan (**pdcompos.pen**) materyal numarası girilir.

5) En son oluşturulacak materyal dosyasına **isim** verilir (.mat uzantılı olmalı) ve kayıt edilir.

## Tables, Pencyl ve Penmain Çalıştırılması

### Tables Çalıştırılması

Tables, etkileşme tesir kesitleri, durdurma gücü, menzil, azalım katsayısı ve ortalama serbest yol gibi birçok taşıma özelliklerinin tabloları oluşturan ve görüntüleyen bir uygulamadır. Bu uygulamayı çalıştırmak için aşağıdaki adımlar takip edilmelidir.

1) **Tables.f** dosyası (**.\penelope\other\tables**) dizin içinden (**.\work\compile**) dizin içine kopyalanır.

2) Microsoft Windows komut istemi çalıştırılır ve aşağıdaki komutlar yazarak **tables.exe** uygulaması oluşturulur.

> **cd Desktop\work\compile**

> **gfortran -Os -Wall tables.f -o tables.exe**

3) **tables.exe** uygulaması **compile** dosyasından **pendbase** dosyasına (\penelope\pendbase) alınır.

4) Materyal dosyası (**su.mat**) **pendbase** dosyasına (\penelope\pendbase) alınır.

5) **tables.exe** uygulaması çalıştırılınca aşağıdaki gibi ekran açılır.

- 6) Açılan ekrana materyal dosyasının ismi (su.mat) yazılır, materyal işlendikten sonra sonuç tabloları **TAB** dosyalar olarak **pendbase** dosya içinde oluşturulur.
- 7) 4'e basılır ve uygulamadan çıkılır.

### Pencyl Çalıştırılması

- 1) **Pencyl.f** dosyası (**.\penelope\mains\pencyl**) dizin içinden (**.\work\compile**) dizin içine kopyalanır.
- 2) Microsoft Windows komut istemi çalıştırılır ve aşağıdaki komutlar yazarak **pencyl.exe** uygulaması oluşturulur.

```
> cd Desktop\work\compile  
> gfortran -Os pencyl.f -o pencyl.exe
```

- 3) **pencyl.exe** uygulamasını çalıştırmak için masaüstünde başka bir dosya (**deneme**) oluşturulur ve içine **pencyl.exe - materyal dosyası (su.mat) - giris dosyası (giris.in)** gibi dosyalar yerleştirilir.
- 4) Microsoft komut istemi çalıştırılır ve aşağıdaki komutlar yazılır:

```
> cd Desktop\deneme  
> pencyl < giris.in
```

- 5) **pencyl.exe** uygulaması çalıştırılınca aşağıdaki gibi simülasyon işlemi başlatılır.

```
Command Prompt - pencyl
Microsoft Windows [Version 10.0.18362.900]
(c) 2019 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Hikmet>cd Desktop\deneme

C:\Users\Hikmet\Desktop\deneme>pencyl<giris.in
  Initialising PENELOPE ...
  The simulation is started ...
  Number of simulated showers = 8.056000E+03
```

### Penmain Çalıştırılması

- 1) **Penmain.f** dosyası (**.\penelope\mains\penmain**) dizin içinden (**.\work\compile**) dizin içine kopyalanır.
- 2) Microsoft Windows komut istemi çalıştırılır ve aşağıdaki komutlar yazarak **penmain.exe** uygulaması oluşturulur.

> **cd Desktop\work\compile**  
> **gfortran -Os penmain.f -o penmain.exe**

- 3) **pencyl.exe** uygulamasını çalıştırmak için masaüstünde başka bir dosya (**deneme**) oluşturulur ve içine **pencyl.exe** - **materyal dosyası (su.mat)** - **giris dosyası (giris.in)** – **geometri dosyası (geometri.geo)** gibi dosyalar yerleştirilir.
- 4) Microsoft komut istemi çalıştırılır ve aşağıdaki komutlar yazılır:

> **cd Desktop\deneme**  
> **penmain < giris.in**

- 5) **penmain.exe** uygulaması çalıştırılınca aşağıdaki gibi simülasyon işlemi başlatılır.

```
Command Prompt - penmain
Microsoft Windows [Version 10.0.18362.900]
(c) 2019 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Hikmet>cd Desktop\deneme

C:\Users\Hikmet\Desktop\deneme>penmain<giris.in
  Initialising PENELOPE ...
  Initialising PENGEO ...
  The simulation is started ...
  Number of simulated showers = 3.532100E+04
```

## EGSnrc

EGSnrc, değişik ortamlarda iyonlaştırıcı radyasyon taşınmasının Monte Carlo simülasyonunu gerçekleştiren yaygın olarak kullanılan bir bilgisayar kod sistemidir. Homojen malzemelerde 1 keV ile 10 GeV arasında kinetik enerjilere sahip olan Foton, elektron ve pozitronların yayılmasını modeller. EGSnrc, 1970’li yıllarda Stanford Linear Accelerator Center’da (SLAC) geliştirilen Electron Gamma Shower (EGS) yazılım paketinin genişletilmiş ve geliştirilmiş bir versiyonudur. EGSnrc, maddedeki foton, elektron ve pozitronların taşınmasını ve etkileşimlerini simüle eden MORTRAN3 programlama dilinde yazılan genel rutinlerden oluşmaktadır. Her kullanıcının kendi programı yazmaya gerek kalmadan EGSnrc’nin açık kaynaklı pketinde bulunan çeşitli uygulamaların sayesinde çeşitli alanlarda değişik ve kapsamlı hesaplamalar yapılabilmektedir.

### EGSnrc Kurulumu İçin Gerekli Yardımcı Yazılımlar

EGSnrc’yi bilgisayara kurabilmek ve çeşitli uygulamaları çalıştırabilmek için önce aşağıdaki yardımcı programlar kurulmalıdır:

- a) **Fortran** derleyici (Compiler)
- b) **C** derleyici (Compiler)
- c) **C++** derleyici (Compiler)
- d) **GNU make** derleyici (Compiler)
- e) **Tcl/Tk toolkit** (uygulamaları kullanıcı grafik arayüzünde göstermek için )
- f) **Grace plotting tool** (verilerin grafik çizimi için)

Detaylı bilgi için : [Installation overview · nrc-cnrc/EGSnrc Wiki · GitHub](#)

### EGSnrc Uygulamaları

EGSnrc paket programın içinde çeşitli uygulamalar bulunur, bunlar:

- 1) **BEAMnrc**: Lineer hızlandırıcı ve x-ışın sistemlerin modellenmesini gerçekleştirir.
- 2) **DOSXYZnrc**: Vokselize (3D) fantomlarda doz hesaplamaları gerçekleştirir.
- 3) **Silindirik Geometri Uygulamaları**:
  - **DOSRZnrc**: Doz ve kerma hesaplamaları gerçekleştirir.
  - **CAVRZnrc**: İyon odası düzeltme faktörlerini ve ilgili parametreleri hesaplar.
  - **FLURZnrc**: Parçacık akısı hesaplamaları gerçekleştirir.
  - **SPRRZnrc**: Keyfi ortamlar için ortalomalı durdurma gücü oranlarını hesaplar.

#### 4) Küresel Geometri Uygulamaları:

- **CAVSPHnrc**: İyon odası düzeltme faktörlerini ve ilgili parametreleri hesaplar.
- **EDKnrc**: Küresel bir fantomun merkezinde fotonlar veya elektronlar için enerji birikimi hesaplar.

5) **g** : Elektronların yavaşlanmaları nedeni ile radyasyon ile enerji kaybı kesrini hesaplar.

### EGSnrc Dosyaları

EGSnrc kurulumu gerçekleştirildikten sonra iki tane dosya (HEN\_HOUSE ve EGS\_HOME) otomatik olarak oluşturulur.

#### 1) HEN\_HOUSE:

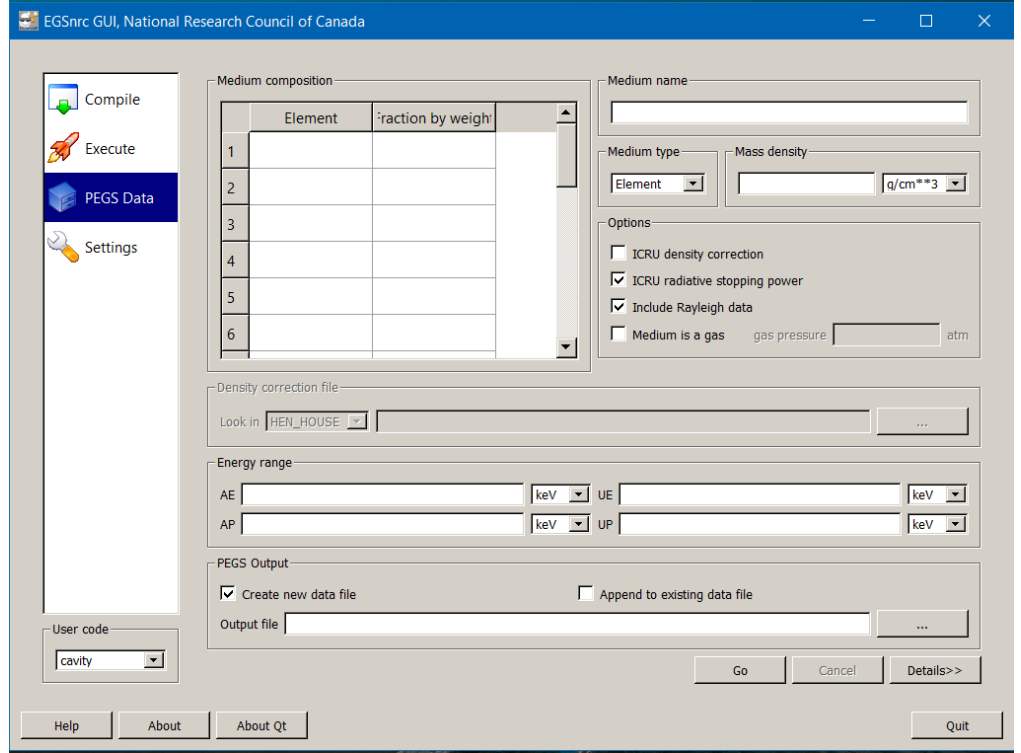
EGSnrc sistemi için tüm kaynak kodu ve veri dosyaları içeren bir dosyadır. Bu dosyanın içeriği ile ilgili genellikle herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır.

#### 2) EGS\_HOME:

Kullanıcı tarafından oluşturulan veya sağlanan tüm uygulamalar ve veriler içeren bir dosyadır. Her uygulamanın kendine özgü bir dosya vardır ve içinde kaynak kodu, Makefile dosyası ve kullanıcının giriş dosyaları bulunur. Uygulamanın çalıştırılması sonucunda elde edilen çıkış dosyaları o uygulamaya ait dosya içine otomatik olarak kayıt edilir. Kullanıcıya ait materyal veri dosyası **/EGS\_HOME/pegs4/data** dizin içine veya **/HEN\_HOUSE/pegs4/data** dizin içine kayıt edilmelidir.

### EGSnrc Materyal Dosyası Oluşturulması

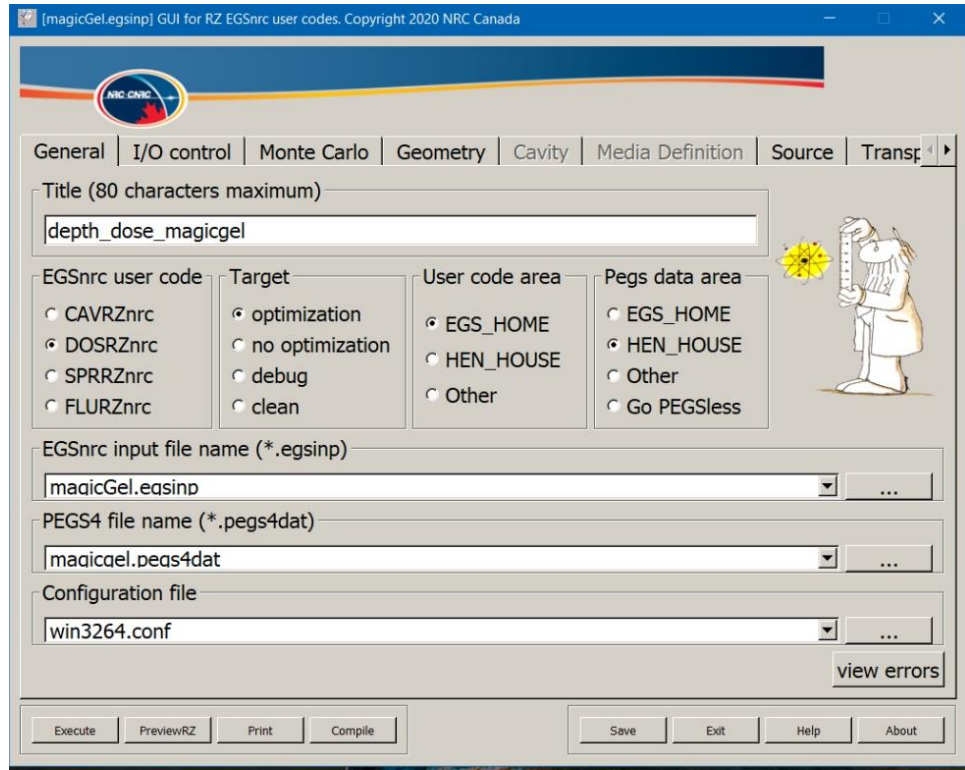
Materyal dosyası, EGSnrc çalışması için gereken veri dosyalarından bir tanesidir. Bu dosya, **EGSnrc GUI** uygulaması ile oluşturulur. EGSnrc GUI çalıştırılınca aşağıdaki gibi açılan ekranda ortam seçilir ve ona ait bazı özellikler (yoğunluk, ağırlık kesri ...vs) girilir ve en son oluşturulacak dosya hangi uygulamada kullanılacak diye kullanıcı kodundan (User Code) bir uygulama seçilir ve **.pegs4dat** uzantılı olarak **/HEN\_HOUSE/pegs4/data** dizin içine kayıt edilir.



## EGSnrc GUI RZ

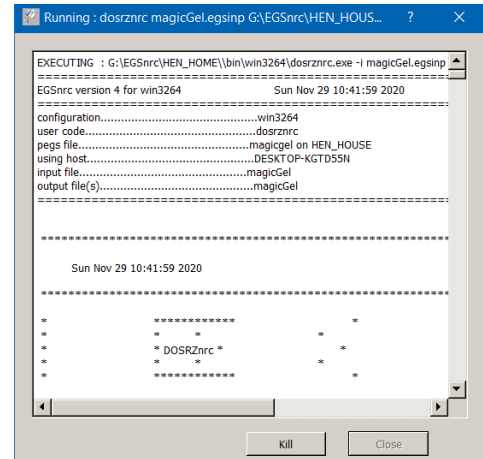
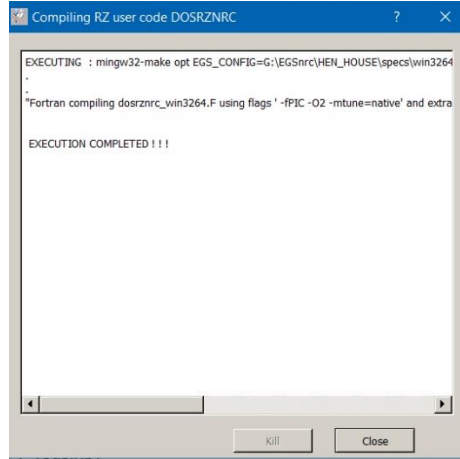
EGSnrc GUI RZ çalıştırmadan önce giriş dosyası oluşturulmalıdır. Bu dosya, EGSnrc GUI RZ uygulaması yardımı ile aşağıdaki aşamaları takip ederek oluşturulur.

- 1) **General:** Burada giriş dosyası için **kullanıcı Kodu (DOSRZnrc)**, **Başlık**, **isim** ve **Materyal** dosyası belirlenir.
- 2) **I/O Control:** Burada doz bölgeleri ve çıkış parametreleri belirlenir.
- 3) **Monte Carlo:** Burada simülasyon ile ilgili süre, tekrarlanma sayısı ve hesaplanacak parametre gibi parametreler belirlenir.
- 4) **Geometry:** Burada ortamın geometrisi ile ilgili kalınlık ve yarıçap gibi parametreler belirlenir.
- 5) **Source:** Burada kaynak ile ilgili enerji ve pozisyon gibi parametreler belirlenir.
- 6) **Transport Parameters:** Burada simülasyonda kullanılan algoritmalar, tesir kesitleri ve kesim enerjisi gibi birçok parametre belirlenir.



7) **Simülasyonun Başlatılması:** Tüm parametreler girildikten sonra aşağıdaki gibi başlatılır:

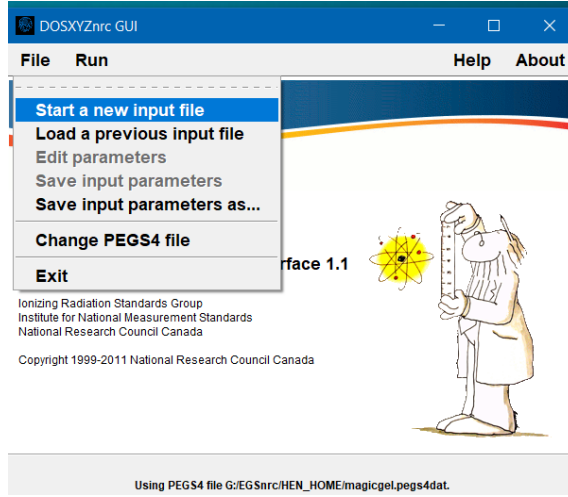
***Save >> Compile >> Execute >> Run***



## DOSXYZnrc GUI

DOSXYZnrc uygulaması aşağıdaki adımları takip ederek çalıştırılır.

1) **File >> Start new input file** (buradan yeni bir giriş dosyası oluşturulur).



2) Materyal veri dosyası (.peg4dat) seçilir.

3) Aşağıdaki gibi açılan ekrandan fantom, kaynak ve simülasyon parametreleri girilir.

**Inputs**

Title: \_\_\_\_\_

**Phantom definition**

If you are using source 2 or 4, you must define the materials in the phantom here first before defining the source.

Define phantom using: ☒ non-CT data input ☐ phantom created from CT data

Global electron cutoff energy - ECUT (MeV): \_\_\_\_\_

Global photon cutoff energy - PCUT (MeV): \_\_\_\_\_

Print summary of highest 20 doses: ☐ no ☒ yes

**Source parameters**

Incident particle:

Source type:

**Simulation parameters**

Number of histories:

IWATCH Output:

Maximum CPU time (hours):

RNG seed 1:

RNG seed 2:

Incident beam size (source 2, 4 or 8):

Run option:

'HOWFARLESS':

Thickness of region outside phantom is:

Medium of region outside phantom:

Phase space output on exiting phantom:

Output restart data:

Range rejection:

ESAVE: range rejection done only below this energy (MeV):

Photon splitting number:

# times to recyle each particle in phase space source:

Buttons: Define Media, Edit EGSnrc Parameters, Close

4) **File >> Save input parameters as...** (Ana ekrandan giriş dosyası .egsinp uzantılı olarak EGS/EGS\_HOME/dosxyznrc dizine kayıt edilir).

5) **Run >> Compile >> Run** (Simülasyon başlatılır).

## EK2. MEPSAR

MEPSAR (Matlab code for Electrons and Positrons Stopping power And Range calculation). MEPSAR, değişik hedef malzemeler için electron ve pozitronların durdurma gücü ile menzil hesaplamaları yapan, tez çalışması kapsamında geliştirilen bir bilgisayar paket programıdır. MEPSAR, MATLAB programlama dili kullanarak geliştirilmiştir. MEPSAR ile 20 eV- 1 GeV enerji aralığında elektron ve pozitronların durdurma gücü, menzil, radyasyon verimi ve soğrulan doz gibi birçok hesaplamalar pratik bir şekilde yapılabilir ve grafikleri de çizilebilmektedir. Hesaplamalar, hem programın kendi veritabanında bulunan 99 element ve 180 bileşik için hem de 2 ile 14 elemente sahip olan programın veritabanında bulunmayan herhangi bir bileşik için de yapılabilir.

MEPSAR  
a Code System for Electrons and Positrons Stopping power And Range Calculation

**List of Materials**  
☒ Element  
☐ Composition  
☐ New Composition

**Selection of Material**  
Select an element ▼ Select a compos... ▼ ? Select number of... ▼

**Material Parameters**  
Z: 0.0000 A: 0.0000  
p (g/cm<sup>3</sup>): 0.0000 I (eV): 0.0000

**Atomic Numbers (Z) and Weight by Fractions (W) of Elements in New Composition**

|    |   |    |   |     |   |     |   |
|----|---|----|---|-----|---|-----|---|
| Z1 | 0 | W1 | 0 | Z8  | 0 | W8  | 0 |
| Z2 | 0 | W2 | 0 | Z9  | 0 | W9  | 0 |
| Z3 | 0 | W3 | 0 | Z10 | 0 | W10 | 0 |
| Z4 | 0 | W4 | 0 | Z11 | 0 | W11 | 0 |
| Z5 | 0 | W5 | 0 | Z12 | 0 | W12 | 0 |
| Z6 | 0 | W6 | 0 | Z13 | 0 | W13 | 0 |
| Z7 | 0 | W7 | 0 | Z14 | 0 | W14 | 0 |

**Incident Particle**  
Particle type: Select a particle ▼

**Calculating and Plotting**  
Calculate SP Plot SP  
Calculate RY Plot RY  
Calculate R Plot R  
Calculate Dose Plot Dose

**Create Material File**  
Density (g/cm<sup>3</sup>): 0 File name: Create

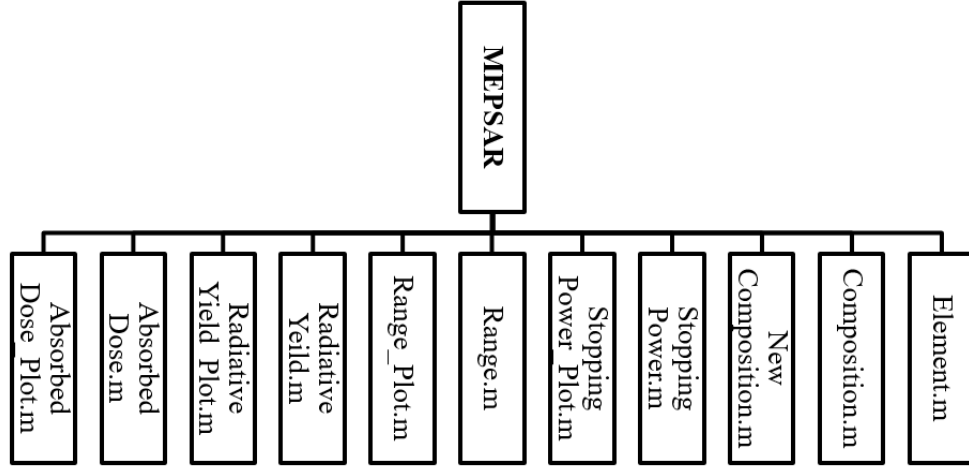
**Load Material File**  
Load

Developers: H. OSMAN & H. GUMUS - Ondokuz Mayıs University - Faculty of Art and Science - Department of Physics - Samsun/ Turkey

MEPSAR paket programın çalışma ekranı

## MEPSAR Paket Programın Dosyaları

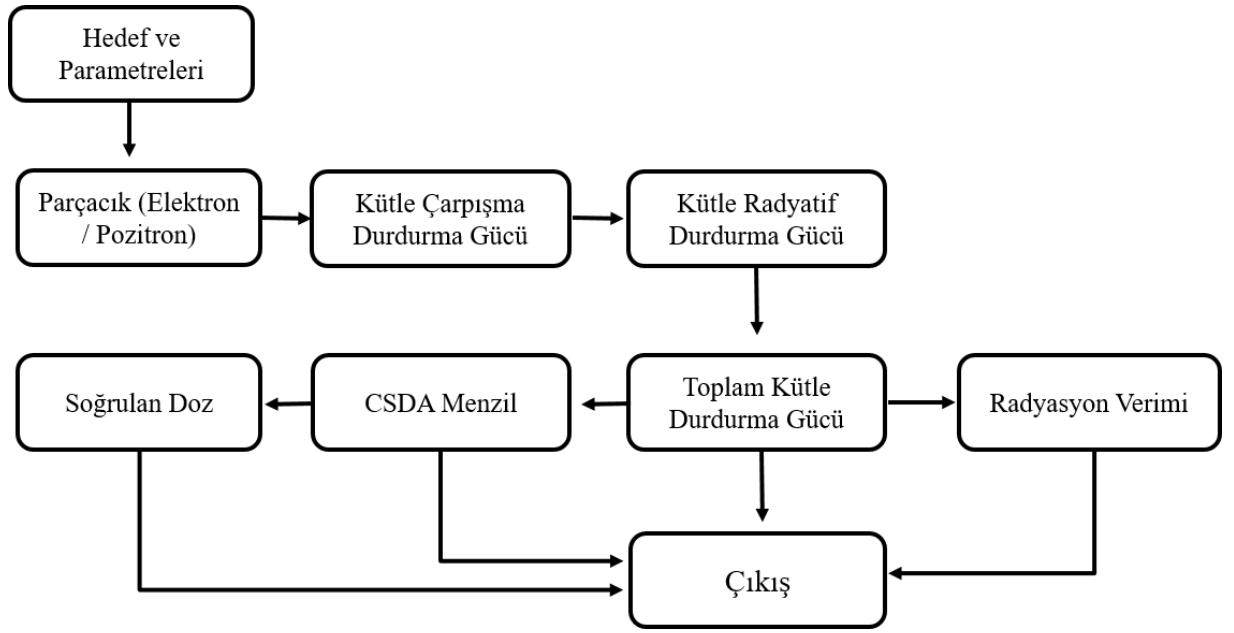
MEPSAR paket programın içinde bulunan dosyalar aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



MEPSAR paket programın ana dosyaları

- 1) **Element.m** : 99 elemente ait atom numarası, kütle numarası ve yoğunluk gibi parametreleri içeren bir veri dosyasıdır.
- 2) **Composition.m** : 180 bileşiğe ait yoğunluk, her bileğin içerdiği elementler ile ağırlık oranları gibi parametreleri içeren bir veri dosyasıdır.
- 3) **New Composition.m** : Programın kendi veritabanında bulunmayan yeni bileşikler için materyal dosyasını oluşturan bir kod dosyasıdır.
- 4) **Stopping Power.m** : Durdurma gücü hesaplamalarında kullanılan yöntem ile metod ve ilgili denklemler içeren bir kod dosyasıdır.
- 5) **Stopping Power\_Plot.m** : Durdurma gücü sonuçlarının grafiklerini çizen bir kod dosyasıdır.
- 6) **Range.m** : Menzil hesaplamalarında kullanılan yöntem ile metod ve ilgili denklemler içeren bir kod dosyasıdır.
- 7) **Range\_Plot.m** : Menzil sonuçlarının grafiklerini çizen bir kod dosyasıdır.
- 8) **Radiative Yield.m** : Radyasyon verimi hesaplamalarında kullanılan yöntem ile metod ve ilgili denklemler içeren bir kod dosyasıdır.
- 9) **Radiative Yield\_Plot.m** : Radyasyon veriminin sonuçlarının grafiklerini çizen bir kod dosyasıdır.
- 10) **Radiation Dose.m** : Radyasyon dozu (Soğrulan doz) hesaplamalarında kullanılan yöntem ile metod ve ilgili denklemler içeren bir kod dosyasıdır.
- 11) **Radiation Dose\_Plot.m** : Radyasyon dozu (Soğrulan doz) sonuçlarının grafiklerini çizen bir kod dosyasıdır.

#### MEPSAR Programın Blok Diyagramı



MEPSAR paket programın farklı modüllerinin ve hesaplamalarının blok diyagramı

### MEPSAR Programın Çalıştırılması

MEPSAR'ın çalıştırılması çok kolay ve pratiktir ve aşağıdaki adımları takip ederek çalıştırılabilir:

- 1) Hedef materyal seçilir (Element / Composition / New Composition).
- 2) Gelen parçacık seçilir (Electron / Positron).
- 3) Hesaplanacak parametre seçilir (Durdurma gücü, ... vs).

### Yeni Materyal (New Composition ) Dosyası Oluşturulması

Programın kendi veritabanında bulunmayan yeni bileşikler için materyal dosyası aşağıdaki adımları takip ederek oluşturulabilir:

- 1) **New Composition** seçilir.
- 2) Yeni bileşikteki element sayısı belirlenir.
- 3) Yeni bileşikteki elementlere ait atom numrası ile ağırlık oranları girilir.
- 4) Yeni bileşiğin yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ ) olarak girilir.
- 5) Yeni bileşiğe bir isim verilir.
- 6) En son **Creat** butonuna basarak materyal dosyası oluşturulur ve aynı dizin içinde kayıt edilmiş olur.

Daha önce oluşturulmuş bir materyal dosyası çağırmak ve yeniden hesaplamalarda kullanmak için **Load** butonuna basarak açılan pencereden seçilebilir.

### **MEPSAR'ın Çıkış Dosyaları**

MEPSAR'ın çalıştırılması sonucunda ve hesaplanan parametrelere göre aşağıdaki çıkış dosyaları otomatik olarak aynı dizin içinde oluşturulur.

**Element\_SP.dat** : Seçilen element için electron veya pozitronların durdurma gücü sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**Composition\_SP.dat** : Seçilen bileşik için electron veya pozitronların durdurma gücü sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**New Composition\_SP.dat** : Yeni bir bileşik için electron veya pozitronların durdurma gücü sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**Element\_R.dat** : Seçilen element için electron veya pozitronların menzil sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**Composition\_R.dat** : Seçilen bileşik için electron veya pozitronların menzil sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**New Composition\_R.dat** : Yeni bir bileşik için electron veya pozitronların menzil sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**Element\_RY.dat** : Seçilen element için electron veya pozitronların radyasyon veriminin sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**Composition\_RY.dat** : Seçilen bileşik için electron veya pozitronların radyasyon veriminin sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**New Composition\_RY.dat** : Yeni bir bileşik için electron veya pozitronların radyasyon veriminin sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**Element\_D.dat** : Seçilen element için electron veya pozitronların soğrulan doz sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

**Composition\_D.dat** : Seçilen bileşik için electron veya pozitronların soğrulan doz sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

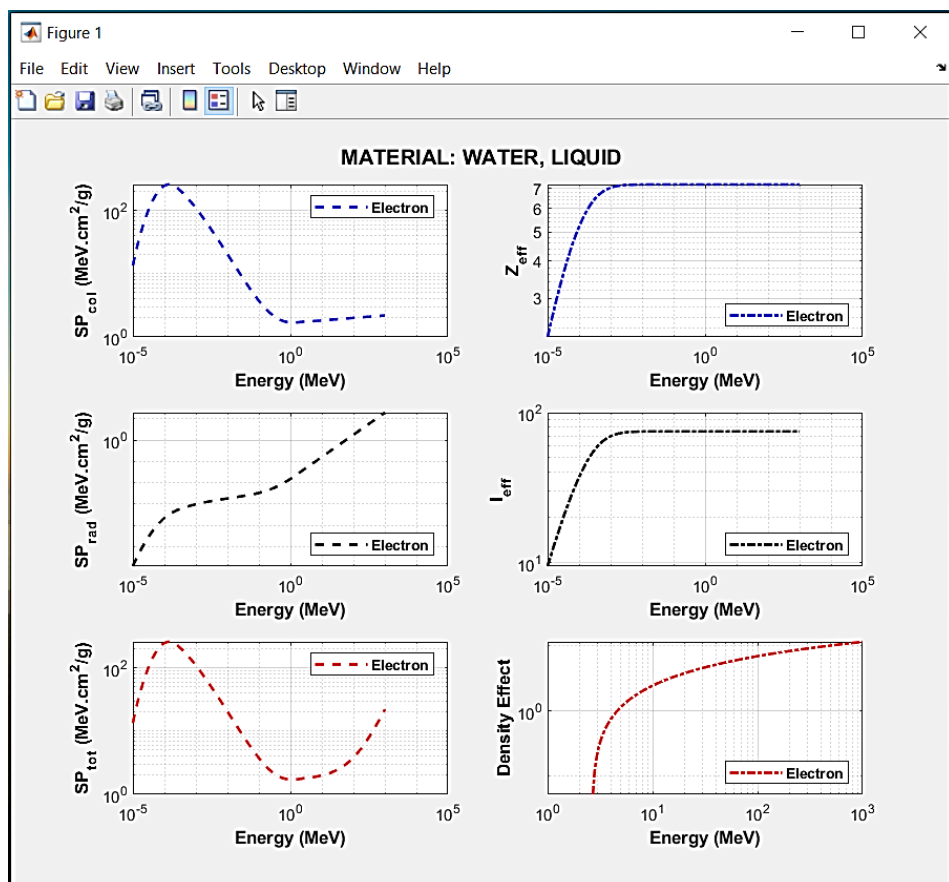
**New Composition\_D.dat** : Yeni bir bileşik için electron veya pozitronların soğrulan doz sonuçları içeren bir veri dosyasıdır.

```

*Composition_SP - Notepad
File Edit Format View Help

%===== MEPSAR =====
% 1. Column: Particle Energy(MeV).
% 2. Column: Mass Collision Stopping Power(MeV.cm^2/g).
% 3. Column: Mass Radiative Stopping Power(MeV.cm^2/g).
% 4. Column: Total Mass Stopping Power(MeV.cm^2/g).
% 5. Column: Density Effect Parameter.
% 6. Column: Effective Atomic Number.
% 7. Column: Effective Mean Ionisation Energy(eV).
% Particle: Electron.
% Material: WATER, LIQUID.
%===== MEPSAR =====
1.000e-05 1.3461e+01 1.2143e-06 1.3461e+01 0.0000e+00 2.2317e+00 9.4844e+00
1.100e-05 1.6965e+01 1.6834e-06 1.6965e+01 0.0000e+00 2.3323e+00 1.0126e+01
1.200e-05 2.0653e+01 2.2357e-06 2.0653e+01 0.0000e+00 2.4269e+00 1.0745e+01
1.300e-05 2.4495e+01 2.8726e-06 2.4495e+01 0.0000e+00 2.5161e+00 1.1342e+01
1.400e-05 2.8465e+01 3.5949e-06 2.8465e+01 0.0000e+00 2.6004e+00 1.1920e+01
1.500e-05 3.2540e+01 4.4031e-06 3.2540e+01 0.0000e+00 2.6805e+00 1.2481e+01
1.600e-05 3.6699e+01 5.2970e-06 3.6699e+01 0.0000e+00 2.7568e+00 1.3025e+01
1.700e-05 4.0926e+01 6.2762e-06 4.0926e+01 0.0000e+00 2.8296e+00 1.3554e+01
1.800e-05 4.5202e+01 7.3398e-06 4.5202e+01 0.0000e+00 2.8992e+00 1.4070e+01
1.900e-05 4.9516e+01 8.4869e-06 4.9516e+01 0.0000e+00 2.9658e+00 1.4572e+01
...
9.000e+02 2.1745e+00 1.7655e+01 1.9829e+01 1.1350e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.100e+02 2.1754e+00 1.7858e+01 2.0033e+01 1.1372e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.200e+02 2.1762e+00 1.8061e+01 2.0237e+01 1.1394e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.300e+02 2.1771e+00 1.8264e+01 2.0442e+01 1.1416e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.400e+02 2.1779e+00 1.8468e+01 2.0646e+01 1.1437e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.500e+02 2.1787e+00 1.8671e+01 2.0850e+01 1.1458e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.600e+02 2.1795e+00 1.8875e+01 2.1054e+01 1.1479e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.700e+02 2.1803e+00 1.9079e+01 2.1259e+01 1.1500e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.800e+02 2.1811e+00 1.9282e+01 2.1463e+01 1.1520e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
9.900e+02 2.1819e+00 1.9486e+01 2.1668e+01 1.1541e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
1.000e+03 2.1827e+00 1.9690e+01 2.1872e+01 1.1561e+01 7.2167e+00 7.5000e+01
%===== MEPSAR =====
% Authors: H.OSMAN & H.GUMUS
Ln 23, Col 70 100% Windows (CRLF) UTF-8

```



## ÖZ GEÇMİŞ

Hıkmət OSMAN, Rakka ilinde AL-Maari Lisesi’ni 2005 yılında bitirdi. AL-Furat Üniversitesi Fen Fakültesi’nden 2009 yılında mezun oldu. 2015 yılında Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsünde Yüksek Lisans (Sağlık Fizigi) programını bitirdi. 2017 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsünde tezli doktora başladı. 2014 yılından beri Ankara 17 Febrayır Libya Lisesi’nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli iki çocuk babasıdır.

### İletişim Bilgileri

ORCID ID: 0000-0003-1115-0277

### Yayınlar:

1. Osman, H., and Gümüş, H. (2022). Stopping power and CSDA range calculations of electrons and positrons over the 20 eV–1 GeV energy range in some water equivalent polymer gel dosimeters. *Applied Radiation and Isotopes*, 179, 110024.

### Kazanılan Burslar

1. Suriye Arap Cumhuriyeti yurt dışı bursu (2012).
2. Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı bursu (2017).