

**RADYOTERAPİDE KULLANILAN PROTON VE AĞIR İYONLAR
İÇİN SU, Al₂O₃ (TLD-500) VE AKCİĞERİN
DURDURMA GÜCÜ HESABI**

Rıza DİLEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012
ANKARA**

Rıza DİLEK tarafından hazırlanan ‘RADYOTERAPİDE KULLANILAN PROTON VE AĞIR İYONLAR İÇİN SU, Al₂O₃ (TLD-500) VE AKCİĞERİN DURDURMA GÜCÜ HESABI’ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. A. Güneş TANIR

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

.....

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

Prof. Dr. A.Güneş TANIR

Fizik, Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Mustafa H. BÖLÜKDEMİR

Fizik, Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Niyazi MERİÇ

Fizik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi

.....

Tarih:/..../.....

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

TEZ BİLDİRİMİ

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

Rıza DİLEK

**RADYOTERAPİDE KULLANILAN PROTON VE AĞIR İYONLAR İÇİN
SU, Al₂O₃ (TLD-500) VE AKCİĞERİN
DURDURMA GÜCÜ HESABI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Rıza DİLEK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2012**

ÖZET

Bu çalışmada, radyoterapide kullanılan protonların ve ağır iyon olarak karbon iyonlarının, ortamda hareketleri boyunca birim uzunlukta kaybettikleri enerji (durdurma gücü) su, TLD-500 ve akciğerde iki analitik eşitlik kullanılarak hesaplandı. Bu eşitliklerden birisi Bethe-Bloch (1930-1933) tarafından çıkarılmış, Tsoulfanidis (1995) tarafından modifiye edilerek kullanılmış olan kütle durdurma gücü eşitliği, diğeri ise literatürde elektronlar için kullanılmış olan efektif z (z^*), Z (Z^*) ve I (I^*) değerlerinin Tsoulfanidis'in formülünde yerine konularak elde edilen eşitliktir. Radyoterapide kullanılan protonların ve ağır iyonların enerji aralığı 75-250 MeV olmasına rağmen, bu çalışmada daha düşük ve daha yüksek enerji seviyelerindeki durdurma gücünü görmek amacıyla 0,001-10000 MeV enerji aralığında çalışıldı. Elde edilen sonuçlar "NIST PSTAR Data Base", "SRIM 2011", "MSTAR" ve literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldı.

Bilim Kodu : 202.1.108
Anahtar Kelimeler : Durdurma gücü, TLD-500, Dozimetri, Radyasyon dozu
Sayfa Adedi : 76
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. A. Güneş TANIR

**STOPPING POWER CALCULATIONS OF WATER, Al_2O_3 (TLD-500)
AND LUNG FOR PROTON AND HEAVY IONS USED IN
RADIOTHERAPY**

(M.Sc. Thesis)

Rıza DİLEK

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2012

ABSTRACT

In this study, the energy losses in unit length (or stopping power) of protons and carbons as heavy ions used in radiotherapy, during their movements in the , were theoretically calculated for water, TLD-500 and lung by using two analytical equation. One of these equations is the mass stopping power equation suggested by Bethe-Bloch (1930-1933) and modified by Tsoulfanidis (1995). The other one has been obtained by substituting effective z (z^*), Z (Z^*) and I (I^*) values, which are used for electrons in literature, into equation reported by Tsoulfanidis. Although the energy range of protons and heavy ions is 75-200 MeV in the radiotherapy, in this study 0,001-10000MeV energy ranges was performed to identify the stopping power at lower and higher energy levels. The results are compared with “NIST PSTAR Data Base”, “SRIM 2011”, “MSTAR” and literature.

Science Code : 202.1.108
Key Words : Stopping power, TLD-500, Dosimetry, Radiation dose
Page Number : 76
Adviser : Prof. Dr. A. Güneş TANIR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmama öncülük eden, hoşgörüsünü, eşsiz bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr. A.Güneş TANIR'a, çalışmalarımın her aşamasında değerli önerileri ile beni yönlendiren Doc.Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR'e ve Yrd. Doç. Dr. Kemal KOÇ'a

Medikal fizik alanında kenimi geliştirmeme katkı sağlayan bilgi ve deneyimleri ile her zaman desteğini hissettiğim Sayın Fiz.Müh. Mustafa TUNÇ'a, Fizikçi Fatih ağlar KAHRAMAN'a, Fizikçi Hasan BARUT'a, stajer arkadaşlarıma ve "Atatürk Göğüs Hastalıkları ve Göğüs Cerrahisi Eğitim ve Araştırma Hastanesi" radyoterapi ünitesi çalışanlarına,

Hayatım boyunca her konuda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, öncelikle sevgili annem ve babam olmak üzere, kardeşim Berat DİLEK'e, ağabeyim Ahmet DİLEK'e ve eşi Büşra DİLEK'e,

sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	İV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	İX
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	X
SİMGELER VE KISALTMALAR	XII
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL BİLGİLER	5
2.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşmesi	5
2.1.1. Hafif yüklü parçacıkların (e, e^+) madde ile etkileşmesi	5
2.1.2. Ağır yüklü parçacıkların madde ile etkileşmesi	5
2.2.Radyoterapi	7
2.3. Ağır İyon Tedavisi.....	8
2.3.1. İyon ışını tarihçesi.....	8
2.3.2. Ağır iyon tedavisinin fiziği.....	9
2.3.3. Ağır iyon tedavisinin avantajları ve dezavantajları	10
2.3.4. Radyoterapide kullanılan iyon tipleri.....	11
2.3.5. Işınlama metotları	12
2.4. Durdurma Gücü	15
2.4.1. Durdurma gücü teorisi	17
2.5. Radyoterapide Doz Planlaması	23

Sayfa

2.6. Radyasyon Dozimetreleri.....	24
2.6.1. Al ₂ O ₃ (TLD-500) dozimetresi	24
3. METOTLAR.....	26
3.1. Bethe-Bloch ve Tsoulfanidis Yaklaşımı	26
3.2. Değiştirilmiş Yaklaşımlar	29
4. BULGULAR	31
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	76

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Suyun ESTAR'dan alınmış özellikleri	27
Çizelge 3.2. Al ₂ O ₃ ün ESTAR'dan alınmış özellikleri	28
Çizelge 3.3. Akciğerin ESTAR'dan alınmış özellikleri.....	28
Çizelge 4.1. Proton için suyun kütle durdurma gücü.....	37
Çizelge 4.2. Proton için suyun kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması ..	39
Çizelge 4.3. Proton için Al ₂ O ₃ 'in kütle durdurma gücü hesabı.....	43
Çizelge 4.4. Proton için Al ₂ O ₃ 'in kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması	45
Çizelge 4.5. Proton için akciğerin kütle durdurma gücü hesabı.....	48
Çizelge 4.6. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü hesabı	57
Çizelge 4.7. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması.....	59
Çizelge 4.8. Karbon iyonu için alüminyumoksit (Al ₂ O ₃)'in kütle durdurma gücü hesabı.....	62
Çizelge 4.9. Karbon iyonu için Al ₂ O ₃ 'in kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması	64
Çizelge 4.10. Karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücü hesabı.....	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Yüklü parçacık demetlerinin doz profillerinin fotonlarla karşılaştırılması .	3
Şekil 2.1. Alfa parçacıklarının madde içerisinde ilerlemeleri	6
Şekil 2.2. Avrupa birliğinde tedavi istatistikleri.....	8
Şekil 2.3. Çeşitli radyasyon örneklerinin doku içerisinde derinliğe bağlı doz etkileri	9
Şekil 2.4. Tümörün ve normal dokunun olası etkileşimleri	10
Şekil 2.5. Wobbler metodu ekipmanları	12
Şekil 2.6. Nokta tarama metodu	13
Şekil 2.7. Pediatrik rabdomyosarkom tedavisinde, proton ile IMRT doz dağılımlarının karşılaştırılması.....	14
Şekil 2.8. Bir alfa parçacığının bir atomun elektronuyla etkileşmesi	18
Şekil 2.9. dx boyuna, db kalınlığına ve b yarıçapına sahip silindir	19
Şekil 2.10. α -Al ₂ O ₃ :C örgüsünün sematik gösterimi	25
Şekil 4.1. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan proton için suyun kütle durdurma gücü .	38
Şekil 4.2. Proton için suyun kütle durdurma gücü hesaplamaları	38
Şekil 4.3. Proton için suyun kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı.....	40
Şekil 4.4. 250 MeV enerjiye sahip protonun sudaki Bragg Piki	41
Şekil 4.5. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan proton için Al ₂ O ₃ 'in kütle durdurma gücü.....	44
Şekil 4.6. Proton için Al ₂ O ₃ 'in kütle durdurma gücü hesaplamaları	44
Şekil 4.7. Proton için Al ₂ O ₃ 'in kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı	46
Şekil 4.8. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan proton için akciğerin kütle durdurma gücü.....	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Proton için akciğerin kütle durdurma gücü hesaplamaları	49
Şekil 4.10. Proton için akciğerin kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı.....	50
Şekil 4.11. Eş.3.14 kullanılarak hesaplanan karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü.....	58
Şekil 4.12. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü hesaplamaları	58
Şekil 4.13. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı.....	60
Şekil 4.14. Eş.3.14 kullanılarak hesaplanan karbon iyonu için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü.....	63
Şekil 4.15. Karbon iyonu için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü hesaplamaları	63
Şekil 4.16. Karbon iyonu için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı	65
Şekil 4.17. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücü.....	68
Şekil 4.18. Karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücü hesaplamaları	68
Şekil 4.19. Karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
λ	Dalgaboyu
β	Beta Parçacığı
e	Elektron
T	Kinetik Enerji
c	Işık Hızı (3×10^8 m/s)
N	Hedef Materyalin m^3 ü Başına Atom Sayısı
N_0	Avagadro Sayısı ($6,022 \times 10^{23}$ atom/mol)
ρ	Yoğunluk
I	Ortalama Uyarma Potansiyeli
Z	Atom Numarası
A	Atom Ağırlığı
SP	Durdurma Gücü
h	Planck Sabiti
E	Enerji
γ	Gamma

Kısaltmalar	Açıklama
ICRU	Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu
IMRT	Yoğun Modüllü Radyoterapi
keV	Kilo Elektron Volt
kV	Kilo Volt
LBL	Lawrence Berkeley Laboratuvarı
LET	Lineer Enerji Transferi
LLUMC	Loma Linda Üniversitesi Medikal Merkezi
MeV	Mega (Milyon) Elektron Volt
PSI	Paul Scherrer Enstitüsü
RBE	Radyasyonun Biyolojik Etkisi
SOBP	Bragg pik dağılımı
TLD-500	Alüminyum oksit

1. GİRİŞ

x-ışınları ve nükleer radyasyonların tedavide kullanılmasının temel amacı, başta kötü huylu tümörler olmak üzere istenmeyen dokuların yok edilmesidir. Yeteri kadar doz verilebilirse x-ışınları ile tedavinin pek çok kanseri kontrol altına alabilmesi mümkündür. Ancak bu tedavi şeklinde sağlıklı dokuların doz alması kaçınılmazdır. Radyasyonla tedavide (Radyoterapi), radyasyon enerjisinin maksimumunun tümör üzerinde bırakılması ve sağlam dokuya da en az zararın verilmesi için gerekli planlamanın yapılabilmesi idealdir. Bu durum yüksek lineer enerji transferli (LET) radyasyonların kullanılmasını gündeme getirmiştir [Krane,2001].

Medikal alanda kullanılan fotonlar canlı doku içerisinde ilerlerken baskın olarak Compton ve çift oluşum ($E > 1.02 \text{ MeV}$ ise) yaparak dağılırlar ve kanserli bölgeye ulaşmaya kadar enerjilerinin büyük bir kısmını sağlıklı doku üzerine bırakmış olurlar. Bu durum sağlıklı dokuların tahrip edilmiş olması demektir.

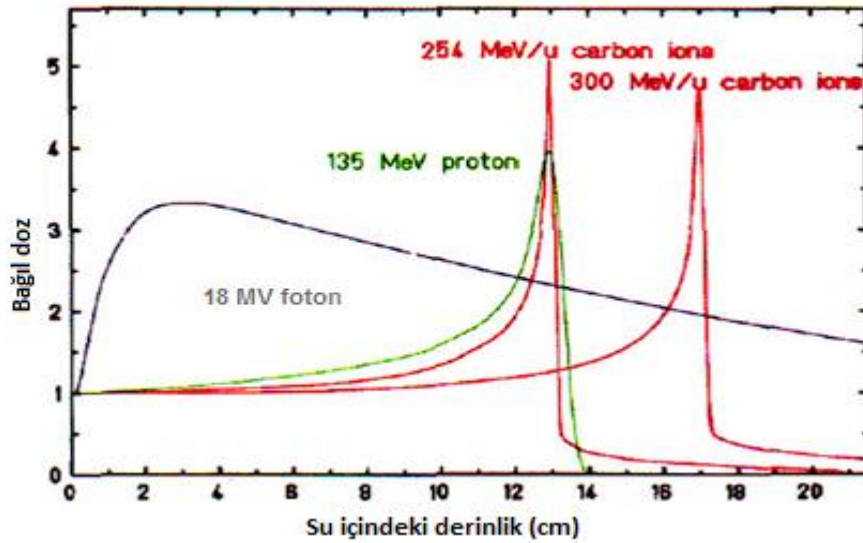
Proton demetleri ise Compton saçılması veya çift oluşum yapmadığından demetin sağlıklı doku içinde ilerlerken enerji kaybı en küçük değerde kalır. Bu da protonların tedavide kullanımlarını gündeme getirmiştir. Protonla tedavide daha yüksek dozlar daha kontrollü olarak hasta dokuya verilebilmekte ve sağlıklı dokunun zarar görmemesi sağlanabilmektedir.

Protonlar kullanarak etkin bir tedavi yöntemi ilk olarak Wilson (1946) tarafından önerilmiştir. İlk tedaviler 1954 yılında Berkeley Radyasyon Laboratuvarında parçacık hızlandırıcısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dünyada ilk proton terapi hastahane merkezi 1990 yılında Loma Linda Üniversitesi Medikal Merkezi (LLUMC), Loma Linda Kaliforniya'da yapılmıştır. Proton terapi, iyonize radyasyon kullanılarak uygulanan dış demet radyoterapisinin bir çeşididir. Proton hızlandırıcısından elde edilen protonlar tümör üzerine gönderilir. Protonların nispeten büyük kütleli olmaları dokuda saçılmaları azaltır. Hedefe gelen proton demeti fazla dağılmadan tümör üzerine odaklanır, böylece sağlam doku çok zarar görmez. Aynı enerjideki tüm protonlar aynı menzile sadece birkaç proton haricinde

ulaşırlar. Böylece dokuya maksimum doz verilir. Dozun derinlikle değişmesine bakıldığında maksimum dozun bırakıldığı noktada bir pik oluşur ve bu pike Bragg piki denir. Tümör yüzeye ne kadar yakınsa gereksinim duyulan proton enerjiside o kadar küçük olur. Proton terapi için tipik olarak 70-250 MeV aralığında enerjilere sahip protonlar kullanılır. 2003 yılında tüm dünyada prostat kanserlerinin yaklaşık % 26 sı proton ile tedavi edilmiştir [Martin,2011]. Ancak proton terapi 40 yıldır uygulanıyor olmasına rağmen hala normal doku ve tümörle etkileşiminin bilgisi tam değildir.

Farklı radyasyon tiplerinin biyolojik doku üzerindeki etkileri farklıdır. Bu etkilerin karşılaştırılmasındaki en kritik faktör ise Lineer Enerji Transferi (LET) dir. LET, radyasyonun doku içinde ilerlerken birim uzunluk başına depoladığı enerjinin bir ölçüsüdür. Benzer bir tanım olan Durdurma Gücü (SP), radyasyonun doku içinde birim uzunlukta kaybettiği enerji olarak tanımlanır. Bremsstrahlung üretimi önemsendiğinde LET, durdurma gücünden farklıdır. Protonlar, alfa parçacıkları ve ağır iyonlar yüksek LET'li radyasyonlardır. Bunlar doku içinde ilerlerken çarpışmalarla büyük enerji kaybettikleri için uzun yollar alamazlar. Küçük LET'li parçacıklar ise elektronlar ve x-ışınlarıdır [Krane,2001,Martin,2011].

Yüklü bir parçacık ortama girdiğinde enerjisini yaklaşık olarak hızının karesiyle ters orantılı olacak şekilde ortama aktarır [Lomax,2009]. Bu yüzden parçacık yavaşlarken ortamdaki atomların iyonizasyon olasılığı da artar ve iyonizasyon olaylarının maksimum olduğu derinliğe maksimum doz aktarılmış olur. Şekil 1.1.'de Bethe-Bloch eşitliği kullanılarak hesaplanan Bragg pikinin yeri görülmektedir [Brown,2004]. Bu pikin arkasına ulaşan parçacık sayısının çok az olması nedeniyle soğurulan dozun pikten sonra keskin şekilde azaldığı görülmektedir.



Şekil 1.1. Yüklü parçacık demetlerinin doz profillerinin fotonlarla karşılaştırılması [Weber,2009]

Megavolt x-ışınları yüklü parçacıklardan farklı olarak böyle bir doz profili göstermezler. Şekil 1.1. den görüldüğü gibi x-ışınları için elektronik dengeye ulaştıktan sonra doku derinliği arttıkça doz azalmaktadır. Bu durum pek çok çalışmada açıklanmaktadır [Ketenci,2011]. Hedef dokunun, genellikle dozun %100'ünü soğurduğu derinliğin tanımı olan d_{max} 'ın yakınında olması istenir. Ancak bu, çevre dokularının da dozun bir kısmını soğuracakları anlamını taşır. Bragg piki oluşumunun tersine doz hem tümörde hem de etrafında depolanır.

Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi Bragg pikleri çok dardır, farklı pik pozisyonlarına sahip çeşitli enerjideki demetler bir Bragg pik dağılımını (SOBP) oluşturmak üzere üstüste binerler [Durante,2010]. Bu, tümöre homojen bir doz dağılımı sağlayan doz platosunu oluşturur.

Yüklü parçacıkların Bragg piki oluşturmalarının tüm avantajlarına rağmen dezavantajları da vardır. Ortamda ilerlerken parçacığın enerjisindeki azalma, Bragg pikinin menziline, pozisyonunu, boyutunu ve şeklini değiştirebilir. Bu etkiler Bragg pik menziline doğruluğunu %1 kadar saptırabilir [Lomaxs,2009]. Ortamın yoğunluğu her bir parçacığın durdurma gücünü değiştireceği için bu etkiyi hesaplamak gereklidir. Özellikle akciğer gibi homojen olmayan bir ortam için fotonla

tedavide, bilgisayarlı tomografi (CT) elektron yoğunluğu bilgisini verebilmektedir ancak bu bilgi doğrudan durdurma gücü ile bir ilişkiye sahip değildir.

Bu çalışmada, suyun, akciğerin ve alüminyum oksitinin (TLD-500) proton ve karbon iyonlarını durdurma gücü farklı iki durdurma gücü formülasyonu kullanarak hesaplanmış ve su için Bragg piki elde edilmiştir. Sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde protonların ve ağır iyonların hedef ile etkileşmeleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde hesaplamalarda kullanılan metodoloji açıklanmıştır. En son Bulgular ve Tartışma verilmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşmesi

Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimini incelerken, hafif yüklü parçacıkların (elektronlar, pozitronlar) ve ağır yüklü parçacıkların (müon, pion, proton, alfa ve diğer ağır iyonlar) etkileşimi olarak iki gruba ayırmak gerekir.

2.1.1. Hafif yüklü parçacıkların (e, e^+) madde ile etkileşmesi

Elektronlar (ve pozitronlar) ağır yüklü parçacıklar gibi Coulomb etkileşmesine uğrarlar. Ancak bazı farklılıkları vardır. Bunlar;

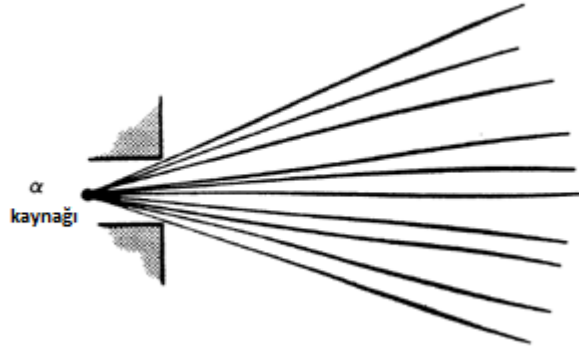
- Özellikle β bozunumundan yayınlanan elektronlar göreceli hızlarda hareket ederler.
- Elektron (veya pozitron) madde içindeki hareketleri esnasında kendisi gibi bir elektronla etkileşme olasılığının büyüklüğünden dolayı büyük sapmalara uğrayarak madde içinde zig-zag çizer. Bunun sonucunda aldığı yol ile menzili (madde içerisinde gidebildiği doğrusal uzaklık) farklı olacaktır.
- Elektron madde içindeki başka bir elektronla kafa-kafaya çarpışması durumunda ilk enerjisinin büyük bir kısmını diğer elektrona aktarır.
- Elektronun enerjisinde (hızında) ve doğrultusunda meydana gelecek değişimler sonucunda büyük bir ivmeye maruz kalabilir ve elektromanyetik radyasyon yayınlamaya başlar. Yayınlanan bu enerjiye Bremsstrahlung veya frenleme radyasyonu denir [Krane,2001].

2.1.2. Ağır yüklü parçacıkların madde ile etkileşmesi

Ağır yüklü parçacıklar proton ve alfa parçacığı gibi $A \geq 1$ olan parçacıklardır [Syed,2007]. Yüklü parçacıklar çekirdek ile de reaksiyon verebilirler. Bu durum

çekirdekten elastik saçılma olarak bilinir ve Rudherford saçılması olarak da ifade edilir, fakat atomun yarıçapı çekirdeğinkinden çok daha büyük olduğundan ve çekirdek, atom hacminin yaklaşık 10^{-15} ini işgal ettiğinden dolayı, parçacığın çekirdekten çok yörüngedeki bir elektronla reaksiyona girme olasılığı 10^{15} kez daha fazladır. Bu nedenle yüklü parçacığın enerjisini kaybetmesindeki en büyük etken atomun elektronlarıyla yaptığı Coulomb saçılmasıdır [Krane,2001].

Ağır yüklü parçacıklar enerjilerini uyarma ve iyonizasyon ile kaybederler. Bir elektron ve bir ağır parçacık arasındaki çarpışmada, ağır parçacık ihmal edilebilir bir açıyla saptırılır. Böylece ağır parçacık hemen hemen bir doğru yol boyunca ilerler.



Şekil 2.1. Alfa parçacıklarının madde içerisinde ilerlemeleri

Coulomb kuvveti sonsuz menzile sahip olduğu için yüklü parçacık aynı anda birçok elektronla etkileşebilir ve böylece enerjisini adım adım fakat sürekli olarak kaybeder. Belli bir mesafeyi kat ettikten sonra enerjisinin tümünü kaybeder. Bu mesafeye parçacığın menzili denir. Menzil parçacığın türüne, materyalin yapısına ve parçacığın enerjisine bağlıdır.

Yüklü parçacıklar doğrudan iyonlaştırıcı özelliğe sahiptir. Atomu iyonlaştırmak için gerekli enerji 10eV civarındadır; yeterli enerji aktarılmadığı durumda atom uyarılmış duruma geçer ve sonra taban duruma geri döner. Elektronların kendileri de çarpışmalarla iyon üretebilirler ve ikincil elektronları oluşturabilirler. Parçacık tarafından kaybedilen enerjiyi ölçmek için, atomik uyarılmalar kadar birincil ve ikincil elektronları da göz önüne almak gerekir [Krane,2001].

Karbon gibi ağır iyonlar da ağır yüklü parçacıklardır. Ancak kütlelerinden dolayı hedef içerisinde, aynı enerjideki protona kıyasla daha düşük bir menzile sahiptirler ve daha önemli fark daha az yanal saçılmalara uğramalarıdır. Dolayısı ile LET'leri daha fazladır [Jäkel,2009].

2.2. Radyoterapi

Radyoterapi, iyonlaştırıcı karaktere sahip yüksek enerjili ışın demetlerini kullanarak kanserli veya seçilmiş doku hücrelerini öldürmeye yönelik bir ışın tedavisidir [Kumaş,2006]. Radyoterapi temelde iki amaca yönelik olarak kullanılır: bunlardan birisi kanserli dokuyu tedavi etmek için küratif olarak, diğeri ise tedavinin mümkün olmadığı durumlarda hastanın yaşam kalitesini artırmak, ağrısını azaltmak veya sağ kalım süresini uzatmak için palyatif olarak kullanılır. Kanserli hastaların yaklaşık %60'ı cerrahi operasyonlar ve kemoterapi tedavisinin yanı sıra radyoterapi de görmektedir [Lauger,1995].

Radyoterapide iyonize radyasyon kullanılır ve elektromanyetik radyasyon (x -ışınları, γ -ışınları) ile parçacık radyasyonu (elektron, proton, ağır iyon ve nötronlar) olmak üzere ikiye ayrılır.

Radyoterapinin 3 şekilde uygulaması yaygındır;

i) Brakiterapi: Yakından yapılan tedavidir. Radyoaktif kaynak tümörün yerine göre; vucut boşluğuna, doku arasına veya cilt üzerine yerleştirilerek yapılır. Tedavide kapalı γ -ışını kaynakları ve β parçacığı kullanılır.

ii) İnternal tedavi: Sıvı ve koloidal radyoizotoplar vücuda uygulanır. Tedavide açık γ -ışını kaynakları ve β parçacığı kullanılır.

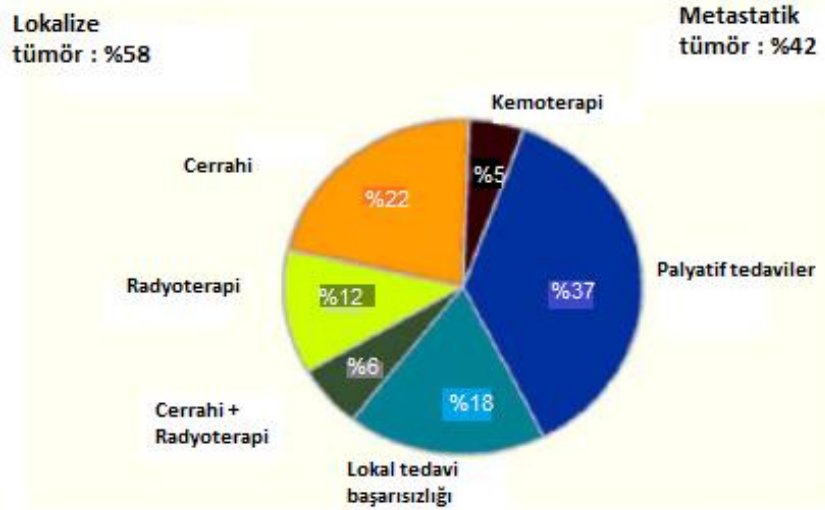
iii) Eksternal tedavi: Uzak mesafeden yapılan tedavidir. Kaynak ile hasta cildi arasındaki uzaklık 5-350 cm'dir. Tedavide x -ışını, γ -ışını, elektron, proton ve ağır iyonlar kullanılır [Dirican,2001].

2.3. Ağır İyon Tedavisi

2.3.1 İyon ışını tarihçesi

Ağır yüklü iyonları radyoterapide kullanma fikri, R.Wilson tarafından 1946'larda öne sürülmüştür. Kanser tedavisinde, proton kullanılması, önerildikten 9 yıl sonra 1954'de Berkeley'de kullanmıştır ve 1955'de aynı tesiste helyum iyonu da kullanmıştır. 1977'de Lawrence Berkeley Laboratuvarı'nda (LBL) kanser tedavisi için, neon, silikon ve argon gibi ağır iyonlar kullanılmış ve pek çok önemli sonuç elde edilmiştir [Jäkel,2009].

Genelde, gelişmiş radyoterapi tekniklerinin kullanımından fayda sağlayan bir çok hasta vardır. Son kanser istatistiklerine göre, gelişmiş radyoterapi teknikleri ile tedavi olabilen hastaların sayısı yaklaşık %20'dir. Bu hastaların geleneksel tekniklerle tedavileri mümkün olmadığından, tedavileri için yeni tekniklerin kullanılabilir olduğu varsayılmıştır.



Şekil 2.2. Avrupa birliğinde tedavi istatistikleri [Jäkel,2009]

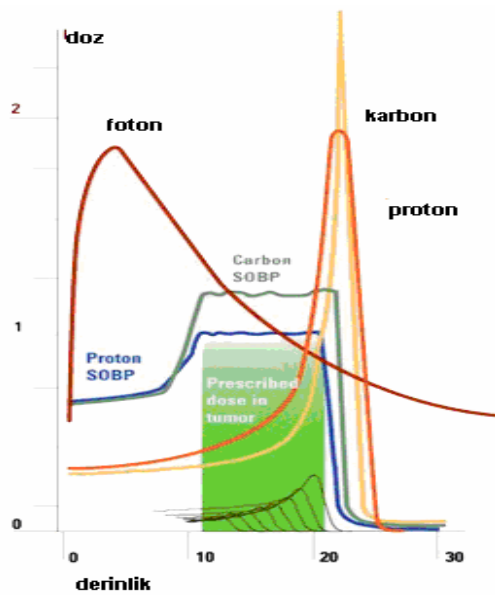
Son zamanlarda proton ve karbon iyonları ile radyasyon tedavisi artan bir ilgi kazanmıştır. 2008 yılının sonunda, dünyada proton ile hasta tedavisi yapan 27 operasyonel terapi ünitesinde 60000 den fazla hasta proton ile tedavi edilmiştir.

Gelecek 5 yıl içerisinde tedaviye başlayacak, yapımı devam eden veya planlanan 20 tesis mevcuttur [Jäkel,2009].

Kullanılabilir ağır iyon radyoterapi merkezi ise şu anda sınırlı sayıdadır. Dünyada karbon iyonu ile tedavi yapan 3 tesis bulunmaktadır. Bunlardan iki tanesi Japonya'da (HIMAC/Chiba, HIBMC/Hyogo) bir tanesi Almanya'dadır (Heidelberg). Ancak özellikle Japonya'da ve Avrupa'da iyon tedavisine ilgi artmaktadır ve Japonya'da (Gunma), Almanya'da ve İtalya'da yeni tesisler inşa edilmektedir. Avusturya ve Fransa ise tesis kurulmasını geliştirme evresindedir [Jäkel,2009].

2.3.2 Ağır iyon tedavisinin fiziği

Yüklü parçacık doku boyunca ilerlerken duracağı ana kadar yavaşlar ve enerjisini aşamalı olarak kaybeder. Parçacığın enerjisindeki bu azalma yol boyunca artar ve menzilin sonunda maksimum enerji kaybına ulaşır. Böylece hedef hacim içerisinde maksimum doz kaybı meydana gelir ve bu nokta Bragg piki olarak bilinir. Bu pikin hemen ötesinde doz hızla sıfıra düşer.

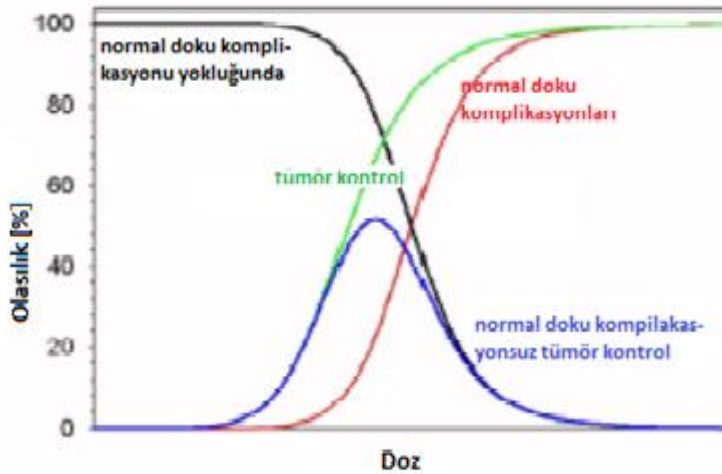


Şekil 2.3. Çeşitli radyasyon örneklerinin doku içerisinde derinliğe bağlı doz etkileri [Vachani,2009]

Şekil 2.3. de gösterildiği gibi tek enerjili Bragg pikleri tedavi hacmini kapsayacak genişlikte değildir. Farklı enerjilerdeki ışın demetlerinin üst üste binmesiyle ‘SOBP’ olarak adlandırılan Bragg pikinin yayılımı oluşturulur. Bu şekilde tüm tedavi hacmine arzu edilen dozun gönderilmesi mümkündür [Jäkel,2006, Kelada,2008].

2.3.3 Ağır iyon tedavisinin avantajları ve dezavantajları

Radyasyon dozunun tümörü çevrelerken çevre dokuları ve kritik organları korumasına *doz konformasyonu* denir. Radyasyon terapi fiziği alanındaki teknik gelişmelerin çoğu bu doz konformasyonunu geliştirmeye yöneliktir.



Şekil 2.4. Tümörün ve normal dokunun olası etkileşimleri [Jäkel,2009]

Şekil 2.4. de görüldüğü gibi, tümöre gönderilen dozun artması normal dokunun radyasyonla ilgili yan etkilerini de arttırmaktadır. Birçok klinik sonuca göre, tümöre, çevredeki normal dokuların tolerans dozu kadar doz gönderilebilir. Ancak ışınlanan hacim azaldıkça tolerans dozunun arttığı bir çok organda görülmüştür. Sonuç olarak doz konformasyonu ile normal dokunun ışınlanan hacmi azaltılabilirse, tümöre daha yüksek doz gönderilebilir ve böylece yan etki riski artmadan daha iyi sonuçlar alınabilir. Şu anda doz konformasyonu ile ilgili en iyi sonuçlar ağır iyonlarla sağlanabilmektedir [Jäkel,2006].

Ağır iyonlar, normal dokunun biyolojik etkinliğini artırmadan durma bölgelerindeki biyolojik etkinliğin artması için tümör dozunda ek bir artış potansiyeli sağlar. Ağır iyonlarda Bragg piki bölgesindeki dozun giriş dozuna oranı protona kıyasla daha büyüktür. Ağır kütleleri sebebiyle serbest enerjileri protona kıyasla ihmal edilebilir [Jkel,2006, Jkel,2009].

Radyoterapide ağır iyon kullanılması aynı zamanda tedavi süresini kısaltır ve bunun sonucu olarak tedavi maliyetini düşürür. Ancak ağır iyon tedavisinde kurulum hatalarının olumsuz etkisi fazladır.

Ağır iyonların tüm avantajlarına rağmen eksiklikleri de yok değildir. Parçacık ortam içinde hareket ederken Bragg pikinin genişliği, keskinliği, mesafesi ve pozisyonu enerji kaybını değiştirebilir ve bunlar doz dağılımlarını olumsuz yönde etkileyebilir. Foton tedavisinde ağır iyonla elde edilen doz dağılımını sağlamak mümkün olmasa da, hesaplanan etki ile gerçek etki arasındaki uyum daha fazladır [Kelada,2008].

Kısaca tüm bunlar göz önüne alındığında ağır iyon radyoterapisinin 3 büyük avantajı vardır. Bunlar;

- i) evre dokuları daha iyi koruması,
- ii) Tümöre daha iyi konsantre olması ve sağ kalım süresini artırmaması,
- iii) Hipo-fraksiyon ile tedavi sresinin kısaltılabilmesidir [Kitagawa,2010].

2.3.4. Radyoterapide kullanılan iyon tipleri

Tedavi için farklı iyon tipleri ile yapılan denemeler oldukça sınırlıdır. 1977 ile 1992 yılların arasında Berkeley’de 433 hasta C, Si, Ar ve Ne işınları kullanılarak tedavi edilmiştir. Diğer tesisler ise radyoterapi için yalnızca C iyonunu tercih etmişlerdir. Radyoterapide kullanılan iyonların, üretilme kolaylığı ve sağlamış oldukları doz konformasyonu iyon seçiminde belirleyici olmaktadır.

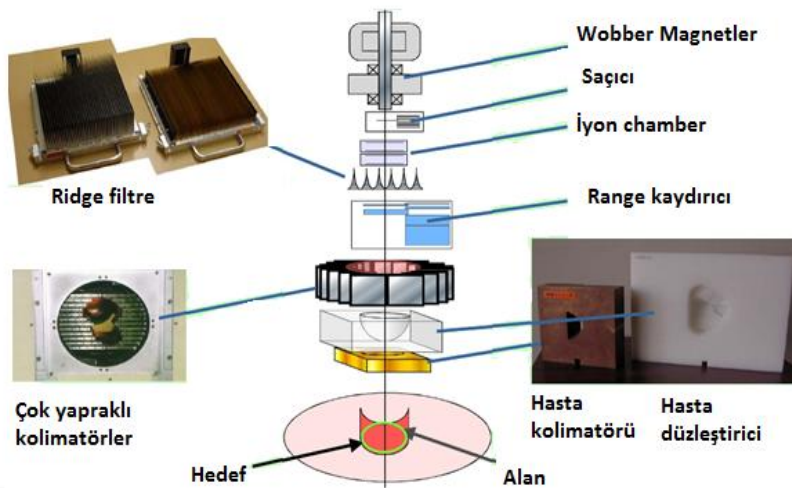
‘Hangi tümör tipine hangi iyonun kullanılması daha etkili olur?’ sorusunun cevabı radyoterapide ihtiyaç duyulan bir bilgidir [Jkel,2009].

2.3.5 Işınlama metotları

Tarih boyunca birçok ışınlama metodu kullanılmasına rağmen, şu anki proton ve ağır iyon tesislerinde kullanılan ışınlama metotları; wobblers metodu ve kalem ışın metodu olarak kabaca iki çeşittir [Kitagawa,2010].

Wobblers Methodu

Wobber methodu LBL'de geliştirilmiştir ve halen Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba'da (HIMAC) günlük klinik tedavi için kullanılmaktadır. Metodun ekipmanları Şekil.2.5'de verilmiştir ve sistemin çalışması basitçe şöyledir:



Şekil 2.5. Wobblers metodu ekipmanları [Kitagawa,2010]

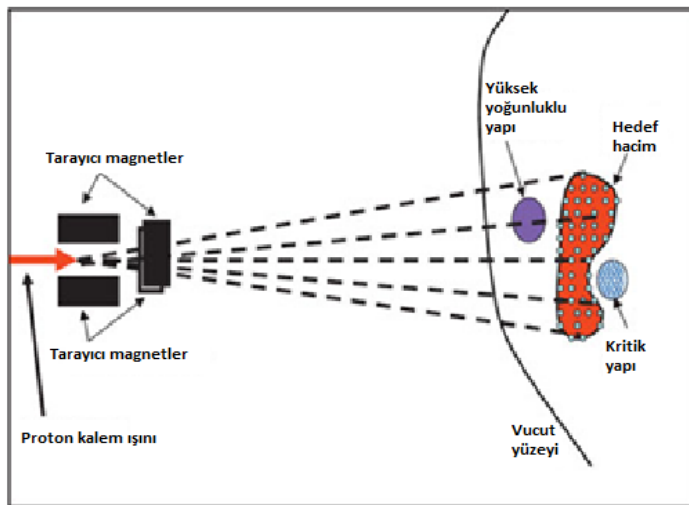
Sistem yanıl yönde homojen doz dağılımını sağlamak için bir çift ortagonal magnet içerir ve saçıcı ile gelen ışının genişliği artırılır. Başlangıçta tek enerjili olan ışın demeti Ridge fitresi ile ayrılır ve Range kaydırıcı filtresine gönderilir. Çok yapraklı kolimatörler tümörün dikey kesitini ayarlamak için kullanılır ve tümörün eğriliğini ayarlamak için hasta kolimatörü ve düzeltiricisi kullanılır.

Burada yol boyunca depo edilen enerji neredeyse tümör hacmine gönderilen enerjiye yakındır. Depo edilen bu enerjiyi azaltmak için bazı tümör tiplerinde layer-stacking Wobblers metodu kullanılmaktadır [Kitagawa,2010].

Her hasta ve her alan için farklı düzleştirici ve kolimatöre gereksinim duyulur. Hedefin tam doğru belirlenmesinin mümkün olmamasından ve zaman tüketiminin çok fazla olmasından dolayı bu metodu kullanmak çok uğraştırıcıdır. Ayrıca saçıcı folyoda meydana gelen inelastik çarpışmalar sonucunda nötronlar meydana gelebilir. Nötronlar biyolojik etkilerinin fazla olmasından dolayı hedefi çevreleyen sağlam dokulara ciddi zararlar verebilirler. Ancak saçıcı folyonun ve tedavi gereçlerinin geliştirilmesiyle veya nokta tarama (spot scanning) metodunun kullanılması ile nötron oluşumu büyük ölçüde önlenir [Kelada,2008].

Kalem ışın tarama metodu

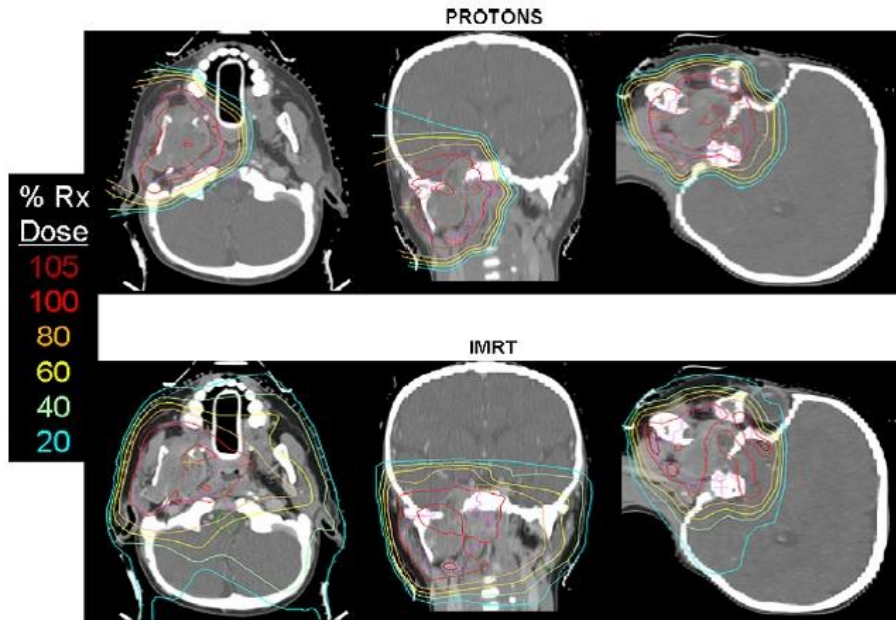
Kalem ışın tarama metodu (pencil beam scanning method); nokta tarama (spot scanning veya active modulation) ve çizgi-çizgi tarama (raster scanning) olmak üzere iki çeşittir. Proton radyoterapisinde nokta tarama metodu, ilk NIRS (National Institute of Radiological Sciences) de geliştirilmiştir. Başlangıçta İsviçre'deki PSI (The Paul Scherrer Institute) hasta masasını hareket ettirerek tek boyutlu nokta tarama metodunu kullanmıştır. Daha sonra proton ve ağır iyon radyoterapisi için Almanya'daki GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) enstitüsü çeşitli enerjilerdeki ışın demetleriyle üç boyutlu çizgi-çizgi tarama metodunu geliştirmiş ve halen günlük klinik tedavilerde kullanılmaktadır [Kitagawa,2010].



Şekil 2.6. Nokta tarama metodu [Kelada,2008]

Şekil.2.6’da görüldüğü gibi bu metot normal dokuya zarar vermeden uygun doz dağılımını sağlamaktadır. Aynı zamanda bu metot Wobblers metoduna kıyasla daha etkindir ve hastaya özel teçhizat kullanımına gerek yoktur. Fakat tedavi esnasında organ konumunun kontrolü oldukça hassastır. Gövde bölgesinde nefes alış-verişine bağlı olarak, organ konumunun kontrolü zor olmasından dolayı homojen doz dağılımını sağlamak kolay olmamaktadır. Bunun yanı sıra, tümördeki daralma, hastanın ağırlığındaki değişme ve cerrahi operasyonlar sonrasındaki şişlikler de Bragg pikinin yerini değiştirebilir ve bunun sonucunda tümör dışında çevre dokulara da zarar verilebilir. Dolayısıyla bu methot genellikle kafa ve diz gibi durgun yapıların tedavilerinde kullanılmaktadır [Kitagawa,2010].

Hedefin veya hastanın pozisyonundaki herhangi bir değişimin, hata oranını arttırdığı proton ve karbon iyonu tedavilerinde deneysel olarak doğrulanmıştır. Nokta tarama metodunun benzeri olarak foton radyoterapisinde IMRT metodu kullanılmaktadır ve aynı durumlar IMRT metodunda da vardır. Bu problemi çözmek için her periyotta tümörün konumu tekrar belirlenmektedir. Ancak ağır iyon radyoterapisi özellikle tek periyotlu tedavilerde (radyocerrahi) daha kesin sonuçlar vermektedir.



Şekil 2.7. Pediatrik rabdomyosarkom tedavisinde, proton ile IMRT doz dağılımlarının karşılaştırılması [Kelada,2008]

Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi pediatrik rabdomyosarkom tedavisinde, proton IMRT ye göre daha iyi doz dağılımı sağlamaktadır.

Çocuklarda ve yetişkinlerde görülen; akciğer, prostat, baş ve boyun kanserlerinde ağır iyon tedavisi foton tedavisine kıyasla daha iyi doz dağılımı sağlamaktadır [Kelada,2008].

2.4. Durdurma Gücü

Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu (ICRU) durdurma gücünü, yüklü parçacıklar tarafından bir ortam içinde harcanan ortalama enerji olarak tanımlamıştır [ICRU,1984]. Durdurma gücü parçacığın enerjisini bıraktığı ortamın bir özelliğidir. Her bir yüklü parçacığın hedefin atomları ile nasıl etkileşeceğini tahmin etmek mümkün olmasa da, ortalama enerji kaybı, parçacıkla atomlar arasındaki Coulomb etkileşiminden tahmin edilebilmektedir.

Yüklü parçacıkların ortamdaki parçacıklarla etkileşmesinde elektronik ve nükleer birçok etkileşme vardır. Ancak tüm bu etkileşmelerin en önemli sonucu parçacıkların ortamdaki enerjilerini kaybetmesidir. Temel etkileşme mekanizması oldukça karışık olmasına rağmen, bu enerji kayıp oranları şimdiye kadar geliştirilen yarı-ampirik ifadelerle oldukça doğru tahmin edilebilmektedir.

Materyal içinden geçen yüklü parçacığın enerji kaybı doğal olarak parçacığa ve hedefe bağlıdır. Bu özellik genellikle literatürde materyalin durdurma gücü olarak ifade edilir ve S ile gösterilir. Yüklü parçacıkla hedef materyal arasında, elektronik ve nükleer etkileşimler vardır.

$$S_{top} = -\frac{dE}{dx} \quad (2.1)$$

$$-\frac{dE}{dx} = S_{elektronik} + S_{nükleer} \quad (2.2)$$

Ayrıca nükleer etkileşimler elektronik etkileşimlere kıyasla çok küçük olduğu için ihmal edilmesi pratik hesaplama kolaylığı sağlamaktadır. Dolayısıyla, elektronik durdurma gücü,

$$-\frac{dE}{dx} \approx S_{elektronik} \quad (2.3)$$

yazılabilir. dE/dx , durdurma gücü, spesifik veya diferansiyel enerji kaybı gibi isimlerle de adlandırılmaktadır. Buradaki (-) işareti parçacığın materyal içerisinde enerji kaybettiğini göstermektedir [Syed,2007]. Durdurma gücü hedefin cinsine, gönderilen parçacığın enerjisine (hızına) ve cinsine bağlıdır [Tsoulfanidis,1983].

Durdurma gücü yerine hedefin yoğunluğundan bağımsız olduğu için genellikle kütle durdurma gücü (S/ρ) kullanılır. Durdurma gücünün birimi MeV/cm 'dir, kütle durdurma gücüne çevirildiğinde birimi MeV.cm²/g olur. Yüklü parçacığın elektronik etkileşime maruz kalacağı bilindiğine göre enerji kaybı için ortalama bir değerden bahsedilir. Çünkü her bir çarpışma için enerji kaybını hesaplamak kolay değildir.

Bir elektronun elektromanyetik alanda kaybettiği enerji ile ilgili türetilen ilk başarılı çalışma Neil Bohr tarafından gerçekleştirilmiştir. Bohr basit bir şekilde elektrona etki eden durdurma gücünü 1913'de klasik fizik kanunlarını kullanarak hesaplanmıştır [Syed,2007,Bohr,1913]. Dalga mekaniğinin gelişmesi ile 1930 yılında H.Bethe, 1933 yılında ise F.Bloch durdurma gücünü kuantum mekaniksel yaklaşımlarla hesaplamışlardır. Bu iki çalışmada çok başarılı olmuş ve sonraki birçok çalışmanın temelini oluşturmuştur [Lauger,1995,Arya,1999]. Ancak bu teoriler yüksek enerjili parçacıkların durdurma gücüyle ilgili güzel sonuçlar verirken, düşük enerjilerde çok başarılı olmamıştır. 1954 yılında Lindhard ve Ritchie tarafından geliştirilen dielektrik teoremi düşük enerjili elektronların durdurma gücü hesaplamalarında oldukça önemlidir. Dielektrik teoremi protonların bazı organik metaryellerdeki durdurma gücü hesaplamalarında çok kullanılamamaktadır. Ashley'in geliştirdiği optik veri (optical data) modeli ise, protonların yoğun maddelerdeki durdurma gücü hesaplamaları için geliştirilmiştir. Ayrıca protonlar için Akerman'da yeni bir durdurma gücü ifadesi geliştirmiştir [Tan ve ark., 2008]. Tsoulfanidis ise 1995 yılında durdurma gücü eşitliklerini;

yüklü ağır parçacıklar (proton, döteron ve alfa) için;

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right] \quad (2.4)$$

Elektron için;

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ x \left\{ \ln \left(\frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma-1}}{I} mc^2 \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left[\frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right] \right\} \quad (2.5)$$

Pozitron için;

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ x \left\{ \ln \left(\frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma-1}}{I} mc^2 \right) - \frac{\beta^2}{24} \left[23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3} \right] + \frac{\ln 2}{2} \right\} \quad (2.6)$$

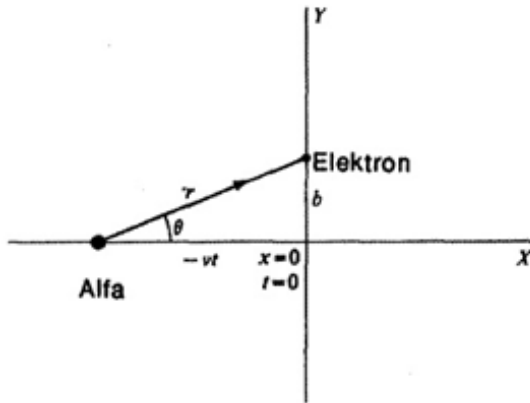
şekilde ifade etmiştir [Tsoulfanidis, 1983].

Kullanılan durdurma gücü ifadelerinin çoğunun temelini, H.Bethe'nin (1930) ve F.Bloch'un (1933) türettiği ifadeler oluşturmaktadır.

2.4.1. Durdurma gücü teorisi

F.Bloch'un (1933) türettiği durdurma gücü ifadesinin klasik görüşe göre türetilmesi ve sonra kuantum mekanik düşüncenin kullanılmasıyla meydana gelecek değişikliklerin tartışılması aşağıdaki yöntemlerle belirlenmiştir [Arya, 1999, Şahin, 1999].

Gelen bir parçacığın kütlesi M , yükü z ve hızı v , soğurucunun kütle numarası A , atom numarası Z ve yoğunluğu ρ olmak üzere; Şekil 2.8'de görüldüğü gibi yüklü parçacığın yolundan b mesafesinde m kütleli bir elektron düşünelim. Aynı zamanda $t = 0$, yüklü parçacığın orijinde bulunduğu zamanı gösterebiliriz [Arya, 1999, Şahin, 1999].



Şekil 2.8. Bir alfa parçacığının bir atomun elektronuyla etkileşmesi

Türetme işlemini basitleştirmek için yapılan bazı kabuller şunlardır;

- i. Gelen parçacık soğurucu içinde düz bir çizgide ilerler ve sadece Coulomb etkileşmesi yapar.
- ii. Soğurucudaki elektron, serbest ve çarpışma başlangıcında durgun haldedir. Aynı zamanda elektronun hareketi o kadar küçüktür ki; elektrik alan, elektron pozisyonundan hiç ayrılmamış gibi hesaplanabilir. Bu ancak yüklü parçacığın hızı atomlardaki elektronik hızlardan oldukça büyük ise doğrudur.

Problemin simetrik yapısından dolayı elektrona verilen itmenin net x-bileşeni sıfırdır. Çünkü; parçacık sifira yaklaştığı zaman impulsun x-bileşenine olan katkı parçacık sifirdan uzaklaştığı zamanki katkıyı götürür. Yani

$$\int_{-\infty}^0 F_x dt = \int_0^{\infty} F_x dt \quad (2.7)$$

dir. Elektrona verilen impulsun (momentumun) y-bişeni

$$P_y = \int_{-\infty}^{\infty} F_y dt = \int_{-\infty}^{\infty} (ze^2/r^2) \sin \theta dt \quad (2.8)$$

olur. Değişkenleri Şekil 2.11'ten ;

$$\sin \theta = b/r \quad (2.9)$$

$$-vt/b = \cot \theta \quad (2.10)$$

$$dt = (b/v) \csc^2 \theta d\theta \quad (2.11)$$

olarak bulunur ve 2.8 bağıntısında yerlerine konulup integral işlemi yapılırsa

$$p_y = 2ze^2 / bv \quad (2.12)$$

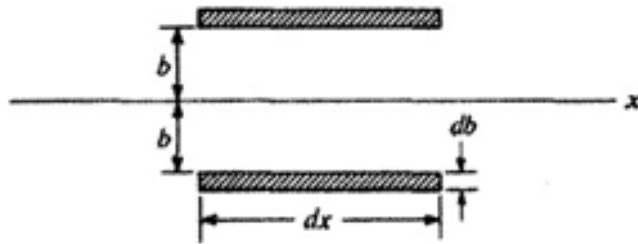
elde edilir. Buradan, b mesafesindeki bir tek elektrona verilen enerji

$$E_e = \frac{p_y^2}{2m} = \frac{2z^2 e^4}{mb^2 v^2} \quad (2.13)$$

dir. N_A avogadro sayısı olmak üzere, soğurucunun birim hacminde $(Z\rho N_A)/A$ sayıda elektron vardır. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi problemin silindirik simetrisinden, yarıçapları b ve b+db, uzunluğu dx olan bir kabuktaki elektron sayısı

$$dN = 2\pi b db dx (Z\rho N_A / A) \quad (2.14)$$

olacaktır.



Şekil 2.9. dx boyuna, db kalınlığına ve b yarıçapına sahip silindir

(2.13) ve (2.14) bağıntıları birleştirilerek, b'de dx uzunluğunda ve db kalınlığındaki bir kabuktaki enerji kaybı

$$-dE(b) = 2\pi b db dx \frac{Z\rho N_A}{A} \frac{2z^2 e^4}{mb^2 v^2} \quad (2.15)$$

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

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_A \rho Z}{mv^2 A} \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{db}{b} = \frac{4\pi z^2 e^4 NZ}{mv^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \quad (2.16)$$

olur. Burada $\rho N_A/A$ yerine N yazılmıştır.

Böylece şayet b_{\min} ve b_{\max} değerlerini hesaplanabilirse durdurma gücü için bir ifade elde edilebilir. Bu, çeşitli yollardan yapılabilir;

Klasik yaklaşım:

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

$$E_e \leq \frac{1}{2} m(2v)^2 = 2mv^2 \quad (2.17)$$

ile verilir. (2.13) ve (2.17) bağıntılarından

$$b_{\min} = ze^2/mv^2 \quad (2.18)$$

olur.

- ii) b 'nin maksimum değeri, çarpışma sırasında elektronu serbest kabul etmenin geçersizliğinden hesaplanabilir. Elektronlar aslında bağlı olup bir miktar minimum ortalama uyarılma enerjileri (I) vardır. Böylece b_{\max} sonsuz olmayıp (2.13) bağıntısından

$$\bar{I} = 2z^2 e^4 / (mb_{\max}^2 v^2) \quad (2.19)$$

veya

$$b_{\max} = ze^2 / v(2 / m\bar{I})^{1/2} \quad (2.20)$$

ile verilir.

Kuantum mekaniksel yaklaşımla

- i) b_{\min} değeri: m kütleli ve v hızlı bir elektrona uyan dalga paketi

$$\lambda = \hbar / p = \hbar \sqrt{1 - \beta^2} / m_0 v \quad (2.21)$$

ile verilir. Klasik düşüncenin geçerli olabilmesi için gelen parçacığın Coulomb alanının, elektronun λ ları üzerinde değişmesi şarttır. Yani $b \geq \lambda$ veya

$$(b_{\min})_{QM} \approx \hbar \sqrt{1 - \beta^2} / m_0 v \quad (2.22)$$

olmalıdır.

- ii) b_{\max} değeri: elektrona, parçacığın yoluna dik istikamette puls verme zamanı (τ) (Rölativistik olarak)

$$\tau = b \sqrt{1 - \beta^2} / v \quad (2.23)$$

dır. ν elektronun frekansı olmak üzere

$$1/\nu > \tau \approx b \sqrt{1 - \beta^2} / v \quad (2.24)$$

veya

$$b_{\max} = v / (\bar{\nu} \sqrt{1 - \beta^2}) \quad (2.25)$$

olmalıdır. Burada \bar{v} elektronun ortalama frekansdır. Bu şekilde elde edilen b_{\max} / b_{\min} oranının klasik düşünceden hareketle elde edilenle aynı olduğu gösterilebilir.

(2.16), (2.18) ve (2.20) bağıntıları birleştirilerek

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} NZ \ln \left(\frac{2mv^2}{I} \right)^{1/2} \quad (2.26)$$

elde edilir.

Kuantum-mekaniksel düşünceler b 'nin limitleri için farklı değerler verir. Bu şekilde elde edilen durdurma gücü ifadesi (2.27) bağıntısıyla verilmiştir (ki bu, \ln terimi hariç öncekinin aynısıdır).

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} NZ \ln \left(\frac{2mv^2}{I} \right) \quad (2.27)$$

şayet yüksek enerjilerde rölativite düzenlemesi dikkate alınırsa ;

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_0 v^2} NZ \left[\ln \left(\frac{2m_0 v^2}{I} \right) - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (2.28)$$

Burada m_0 elektronun durgun kütesidir ve eşitlikte gelen yüklü parçacığın kütlesi bulunmamaktadır [Arya,1999,Şahin,1999].

Yukarıda türetilen ifadeler; alfalar, döteronlar, mezonlar ve benzeri bütün yüklü parçacıklar için doğrudur ancak yavaş hareket eden yüklü parçacıklar için güvenli olmayabilir. Mesela 5 MeV'den küçük enerjili alfa parçacıkları ve 1.3 MeV'den küçük enerjili protonlar için geçerli değildir. Düşük enerjilerde, durdurma gücü için türetilen ifadedeki uyumsuzluğun sebebi, düşük enerjilerde baskın olan elektron yakalaması veya kaybının hesaba katılmamasındandır [Tan ve ark.,2008].

2.5. Radyoterapide Doz Planlaması

Hedefin, parçacıklardan oluşan paralel bir ışın demeti ile ışınlanması durumunda, soğurulan doz D ;

$$D(x) = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{dE}{dx} \right) \Phi(x) \quad (2.29)$$

dir. Burada (x hedef içinde alınan mesafe) ρ hedefin yoğunluğu, $(-dE/dx)$ durdurma gücü ve Φ ise ağır iyon akısıdır ve

$$\Phi(x) = \Phi(0) \exp(-\mu x) \quad (2.30)$$

ifadesine göre x ile değişir. Bu ifadede $\Phi(0)$ giriş akısıdır, μ makroskopik etkileşim tesir kesitidir (lineer azalma katsayısı) ve

$$\mu = N\sigma \quad (2.31)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada N hedefin birim hacmindeki atom sayısıdır, σ ise ağır iyon- doku (hedef) etkileşmesinin toplam mikroskobik etkileşim tesir kesitidir [Bevelacqua,2005].

Radyoterapide Bragg pikinin durumuna göre enerji değiştirilir ve değişik enerjilerdeki Bragg piklerinin üst üste binmesi ile istenilen tümör hacmi ışınlanır.

Aslında toplam doz dağılımını belirlemek için her bir ışının doz dağılımının toplanması gerekmektedir fakat bu toplam yapılırken enerjiye göre değişen radyasyon-madde etkileşimi de düşünülmelidir. Kraft karbon için yaptığı denemesinde yavaşlayan bir ağır iyonun biyolojik etkisinin 2-4 faktöre bağlı olarak arttığını söylemiştir [Kraft,2000]. Dolayısıyla durma noktasında Rölatif Biyolojik Etkinin (RBE) ve iyon-madde etkileşmesinin özellikleri bilinmelidir

Herhangi bir dokunun soğurduğu doz hesaplanırsa, durdurma gücü ve lineer azalma katsayısı parametreleri değiştirilerek başka materyaller içinde soğurulan doz hesaplanabilir.

Doku eşdeğeri hedefler; hidrojen ($5,98 \times 10^{22}$ atom/cm³), oksijen ($2,45 \times 10^{22}$ atom/cm³), karbon ($9,03 \times 10^{21}$ atom/cm³) ve azot ($1,29 \times 10^{21}$ atom/cm³) gibi atomlardan oluşur. Hedefi oluşturan her bir atomun veya elementin azalma katsayısını bularak, hedefin toplam azalma katsayısı;

$$\mu = \sum_i \mu_i N_i \quad (2.32)$$

ifadesi ile bulunur [Bevelacqua,2005].

2.6. Radyasyon Dozimetreleri

Radyasyonun tespit edilmesi ve tanınması için gerekli işlemler sistemine dozimetre denir [Çelebi,1989]. Radyasyon dozimetreleri kullanım amaçlarına göre,

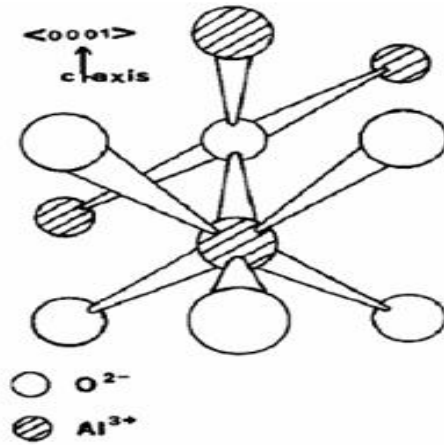
- i) Kişisel dozimetre
- ii) Çevresel dozimetre
- iii) Medikal dozimetre
- iv) Geriye dönük dozimetre

şeklinde sınıflandırılabilir. Al₂O₃ yapısal özellikleri bakımından medikal alanda ve bir çok alanda dozimetre materyali olarak kullanılmaktadır.

2.6.1. Al₂O₃ (TLD-500) dozimetresi

Alüminyum oksit Al₂O₃:Y ve Al₂O₃:Mg olarak iki şekilde üretilirken doz duyarlılığı daha yüksek olan Al₂O₃:C olarak üretilmeye başlanmıştır [Chen,1997]. Doğada korundum (elmastan sonra en sert madde) olarak bilinir ve α-Al₂O₃:C olarak da adlandırılır. Ayrıca deneysel ve sentetik çalışmalar sonucunda γ-Al₂O₃:C ve β - Al₂O₃:C formlarında da bulunur. Fakat bu formlar ısıtılarak α-Al₂O₃:C formuna dönüştürülebilir [Larsen,1999].

Alüminyum oksit geniş bant aralığı, yüksek elektriksel direnç, yüksek erime noktası, iyi ısı iletkenliği, kimyasal direnç ve yapısal radyasyon hasarına karşı gösterdiği direnç nedeniyle tıpta ve bir çok alanda dozimetri materyali olarak kullanılmaktadır.



Sekil 2.10. α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ örgüsünün sematik gösterimi [Summers,1984]

Şekil.2.10'da görüldüğü gibi α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 'nin kristal yapısı, O^{2-} iyonlarının kapalı hexagonal örgüsünün biraz bozulmuş düzeni olarak tanımlanabilir.

Çevresel, kişisel ve daha özel durumlarda kullanılan dozimetrelerde radyasyona kısa süreli maruz kalmalar için karbon doflu alüminyum oksit ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) kullanımı daha uygundur. $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 'nin doz eğrisinin yaklaşık 1 Gy'e kadar lineer olduğu rapor edilir [Chen,1997]. Yaklaşık 20 Gy -30 Gy arasında doygunluğa ulaştıkça lineerliği (supralineer) bozulmaya başlar. Bu nedenle $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ uygun şartlar altında μGy mertebesindeki dozları belirleyebilmekte kullanılabilir [Chen,1997]. TLD-500 olarak adlandırılan α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 'nin TL duyarlılığı, TLD-100 olarak adlandırılan $\text{LiF}:\text{Mg}$ 'a göre yaklaşık 40-60 kat daha fazladır [Summers,1984].

3.METOTLAR

Bu çalışmada, radyoterapide kullanılan 75-250 MeV aralığındaki enerjilere sahip protonların ve karbon iyonlarının, 0,001- 10000MeV aralığındaki enerji değerleri için iki yaklaşım kullanılarak su, Al₂O₃:C (TLD-500) ve akciğerdeki kütle durdurma gücü hesaplanmıştır. Bu yaklaşımlardan birisi Bethe-Bloch (1930-1933) tarafından çıkarılmış, Tsoulfanidis (1995) tarafından modifiye edilerek kullanılmış olan kütle durdurma gücü eşitliği diğeri ise Gümüş'ün [Gümüş,2008] elektronlar için kullanmış olduğu efektif z (z^*), Z (Z^*) ve I (I^*) değerlerinin Tsoulfanidis'in formülünde sırasıyla z , Z ,ve I yerine kullanılarak elde edilen eşitliktir.

3.1. Bethe-Bloch ve Tsoulfanidis Yaklaşımı

Bethe-Bloch (1930-1933) tarafından çıkarılan durdurma gücü,

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

[Arya,1999] Tsoulfanidis tarafından modifiye edilerek ağır yüklü parçacıklar için,

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right] \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Kütle durdurma gücü ise,

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} Z \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right] \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada,

$r_0 = 2.818 \times 10^{-15} m$: klasik elektron yarıçapıdır.

mc^2 : elektronun durgun kütle enerjisi olup 0,511 MeV'dir.

Mc^2 : protonun durgun kütle enerjisi olup 931,5 MeV'dir.

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

A : Hedef materyalin atom ağırlığıdır ve

Z : Hedef materyalin atom numarasıdır.

Burada önemli olan parametrelerden biri, hedefin özelliklerini karakterize eden ortalama iyonlaşma enerjileri I 'dır. I , kuantum mekaniksel yaklaşımların uygulanması ile teorik olarak hesaplanabilir [Arya,1999]. Bu çalışmada kullanılan iyonlaşma enerjileri NIST programından alınmıştır [ESTAR,2009].

Durdurma gücü eşitliklerinde kullanılan ortalama atomik ağırlık,

$$A_{ort} = \sum_i (A_i w_i) \quad (3.3)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır. Efektif atom numarası ise,

$$Z_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i} \right) z_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i} \right) z_i} \quad (3.4)$$

ile tanımlanır. [Tsoulfanidis,1995]. Burada n hedefteki elementlerin numarası, w_i ($w_i = N_i A_i / M$) elementin biyolojik hedefte bulunma yüzdesi, N_i i . elementin atom numarası ve A_i i . elementin atom ağırlığıdır.

Proton ve karbon için yapılan işlemlerde Çizelge 3.1., Çizelge 3.2. ve Çizelge 3.3. den yararlanılmıştır;

Çizelge 3.1. Suyun ESTAR'dan alınmış özellikleri [ESTAR,2009]

Atom numarası	Atom ağırlığı	Yüzde ağırlık	İyonlaşma enerjisi (eV)
1,0	1,0080	0,1119	95,0
8,0	15,9994	0,8881	19,2

Çizelge 3.2. Al₂O₃' ün ESTAR'dan alınmış özellikleri [ESTAR,2009]

Atom numarası	Atom ağırlığı	Yüzde ağırlık	İyonlaşma enerjisi (eV)
13,0	21,8100	0,5293	166,0
8,0	15,9990	0,4708	94,0

Çizelge 3.3. Akciğerin ESTAR'dan alınmış özellikleri [ESTAR,2009]

Atom	Atom numarası	Atom ağırlığı	Yüzde ağırlık	İyonlaşma enerjisi (eV)
H	1,0	1,0080	0,10128	19,2
C	6,0	12,0110	0,10231	81,0
N	7,0	14,0070	0,02865	82,0
O	8,0	15,9994	0,75707	95,0
Na	11,0	22,9900	0,00184	149,0
Mg	12,0	24,3120	0,00073	156,0
P	15,0	30,9740	0,00080	173,0
S	16,0	32,0660	0,00225	180,0
Cl	17,0	35,4530	0,00266	174,0
K	19,0	39,0980	0,00194	190,0
Ca	20,0	40,0780	0,00009	191,0
Fe	26,0	55,8500	0,00037	286,0
Ze	30,0	65,3800	0,00001	330,0

3.2. Değiştirilmiş Yaklaşımlar

Gümüş (2008) elektronlar için, Sugiyama tarafından güncellenmiş Rohrllich ve Carlson'un formüllerine dayalı yeni bir durdurma gücü tanımlamıştır [Gümüş, 2008; Sugiyama,1985; Rohlich ve Carlson,1954]. Tanımlanan bu formülden, gönderilen parçacığın etkin yükü z^* , hedefin etkin elektron sayısı Z^* ve hedefin etkin ortalama iyonlaşma enerjisi I^* olarak tanımları aşağıda verilmiştir:

$$z^* = 1 - \exp(-2200\beta^{1.78}) \quad [\text{Sugiyama,1981}] \quad (3.5)$$

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x+b)}{(x+b)^3} \quad [\text{Sugiyama,1985}] \quad (3.6)$$

$$I^* = 2(13,6)\gamma ZC_0^{-3/2} \exp(\alpha) \quad [\text{Tufan ve ark,2005}] \quad (3.7)$$

Eş. 3.6'da kullanılan b, normalizasyon sabitidir ,

$$b = \left(\frac{8}{\pi}\right)^{2/3} \quad [\text{Cabrera ve ark,1997}] \quad (3.8)$$

olarak verilmiştir ve a;

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{V_0^2}{V^2} Z^{4/3} \quad [\text{Gümüş,2008}] \quad (3.9)$$

olarak verilmiştir. $V_0 = 2,42 \times 10^6 \text{ m/s}$ 'dır V ise ;

$$\beta = \frac{V}{c} \quad (3.10)$$

eşitliğinden bulunur. x ;

$$x = -2\left(\frac{b}{3}\right) + \frac{\left(\frac{b}{3}\right)^3}{\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a\left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{1/3}} + \left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a\left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{-1/3} \quad (3.11)$$

olarak tanımlanmıştır. Eş. 3.7 de kullanılan $C_0 = 0,6064741718$,

$$\alpha = \frac{Z}{2Z^*} \left[x^2(x+3b)\ln x + x(x+b)b + x(\ln 6 - 2)3b^2 + b^3(\ln 6 - 10/3) + (3x+b)b^2 \ln \frac{b^2}{(x+b)^4} - (x+b)^3 \ln(x+b) \right] / (x+b)^3 \quad (3.12)$$

ve γ değeri ise,

$$I_2 = 10,4621 \gamma Z_2 \quad (3.13)$$

ifadesi ile hesaplanmıştır [Gümüş,2008,Tufan,2011].

z , Z ve I yerine Eş. 3.5, Eş. 3.6, Eş. 3.7 ile elde edilen z^* , Z^* ve I^* değerleri sırasıyla kullanılarak oluşturulan kütle durdurma gücü;

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 (z^*)^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} (Z^*) \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{(I^*)} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right] \quad (3.14)$$

şeklinde bulunmuştur.

4.BULGULAR

Parçacıklar için çeşitli hedef materyallerin içindeki durdurma gücü hesabı özellikle tıpta olmak üzere birçok alanda ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin radyoterapide istenilen enerjinin istenilen bölgeye gönderilmesi için durdurma gücü hesabının doğru yapılması gerekir. Bu çalışmada 0,001 MeV- 1000 MeV enerji aralığındaki proton ve ağır iyon olarak karbon için kütle durdurma gücü hesaplanarak yapılmıştır ve diğer çalışmalarla karşılaştırılma yapılmıştır. Proton ve ağır iyon tedavisinde kullanılan parçacıkların enerjileri 75 MeV- 250 MeV aralığında olduğu için, bu enerji aralığında kütle durdurma gücü, su, TLD-500 ve akciğer hedeflerinde incelenip ampirik ifadeler türetilmiştir. Ayrıca protonun su hedefindeki Bragg piki yaklaşık olarak çizilerek ağır yüklü parçacıkların maddeyle etkileşimi hakkındaki teorik bilgiler doğrulanmıştır.

Proton için suyun kütle durdurma gücü hesabı:

Eş.3.2 kullanılarak yapılan hesaplamada Çizelge.3.1'deki değerler kullanılarak Eş.3.3'den $A_{ort} = 14,3216 u$ ve, Eş.3.4'den $Z_{ef} = 6,6011$ olarak hesaplanmıştır, I değeri ise NIST programından 74,60 eV olarak alınmıştır.

Örnek olarak Eş.3.2'yi kullanarak 100 MeV enerjiye sahip bir proton için suyun kütle durdurma gücü hesabı aşağıda verilmiştir.

$I = 74,60 eV$ olarak alınmıştır [ESTAR,2009].

$$\begin{aligned} A_{ort} &= \sum_i (A_i w_i) = A_O w_O + A_H w_H \\ &= (15,9994 \times 0,8881) + (1,0080 \times 0,1119) \\ &= 14,3216 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{ef} &= \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i} \right) z_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i} \right) z_i} = \frac{\left(\frac{w_O}{A_O} z_O^2 \right) + \left(\frac{w_H}{A_H} z_H^2 \right)}{\left(\frac{w_O}{A_O} z_O \right) + \left(\frac{w_H}{A_H} z_H \right)} = \frac{\left(\frac{0,8881}{15,9994} 8^2 \right) + \left(\frac{0,1119}{1,0080} 1^2 \right)}{\left(\frac{0,8881}{15,9994} 8 \right) + \left(\frac{0,1119}{1,0080} 1 \right)} \end{aligned}$$

$$= 6,6011$$

$$\gamma = \frac{(T + Mc^2)}{Mc^2} = \frac{1}{(1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\gamma = \frac{(100 + 931,5)}{931,5} = 1,1074$$

$$\gamma^2 = 1,2262$$

$$\beta^2 = 0,1845$$

$$\beta = 0,4295$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} Z \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4,3,1416 (2,8180 \cdot 10^{-13} \text{ cm})^2 1^2 \frac{0,511}{0,1845} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{14,3216} 6,6011$$

$$\left[\ln \left(\frac{2,0,511}{74,6 \cdot 10^{-6}} 0,1845 \cdot 1,2262 \right) - 0,1845 \right] = 7,8545 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

Eş.3.14 kullanılarak yapılan hesaplamada Eş.3.10, Eş.3.15 ve Eş.3.8 kullanılarak sırasıyla; V , z^* ve b değerleri elde edilmiştir. Daha sonra O ve H'nin her biri için Eş.3.6'dan Z^* , Eş.3.7'den I^* değerleri hesaplanmıştır ve Eş.3.14'de yerlerine yazılarak bulunan kütle durdurma güçleri Çizelge 3.1'de bulunan yüzde ağırlıkları ile çarpılmış ve bulunan değerler toplanarak suyun kütle durdurma gücü hesaplanmıştır. Eş.3.6'da ve Eş.3,7'de bulunan; a , x , α ve γ değerlerini bulmak için Çizelge 3.1, Eş.3.9, Eş.3.11, Eş.3.12 ve Eş.3.13'den yararlanılmıştır.

Örnek olarak Eş.3.14'ü kullanarak 100 MeV enerjiye sahip bir proton için suyun kütle durdurma gücü hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\beta = V / c$$

$$V = 0,4295 \cdot 2,9979 \cdot 10^8 = 129 \cdot 10^6 \text{ m / s}$$

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

$$z^* = 1 - \exp(-2200.0,4295^{1,78}) = 1$$

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

Oksijen için;

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{V_0^2}{V^2} Z^{4/3} = \frac{1,8648^2}{0,60647} \frac{(2,42 \times 10^6)^2}{(129 \times 10^6)^2} 8^{4/3} = 0,0324$$

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

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

$$x = -2\left(\frac{1,8648}{3}\right) + \frac{\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}{\left[\frac{0,0324}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,0324}{2}\right)^2 + 0,0324\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{1/3}} +$$

$$\left[\frac{0,0324}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,0324}{2}\right)^2 + 0,0324\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{1/3}$$

$$= 0,0092$$

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x+b)}{(x+b)^3} = 8 \frac{1,8648^2(3 \cdot 0,0092 + 1,8648)}{(0,0092 + 1,8648)^3} = 7,9994$$

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

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

$$\alpha = \frac{8}{2 \times 7,9994} \left[0,0092^2 (0,0092 + 3,1,8648) \ln 0,0092 + 0,0092 (0,0092 + 1,8648) 1,8648 \right. \\ \left. + 0,0092 (\ln 6 - 2) 3,1,8648^2 + 1,8648^3 (\ln 6 - 10/3) \right. \\ \left. + (3,0,0092 + 1,8648) 1,8648^2 \ln \frac{1,8648^2}{(0,0092 + 1,8648)^4} - \right. \\ \left. (0,0092 + 1,8648)^3 \ln (0,0092 + 1,8648) \right] / (0,0092 + 1,8648)^3 = -1,7058$$

$$I_2 = 10,4621 \gamma Z_2$$

$$\gamma = \frac{95,0000}{10,4621 \times 8} = 1,1351$$

$$I^* = 2 (13,6) \gamma Z C_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$I^* = 2 (13,6) 1,1351 \cdot 8,0,6065^{-3/2} \exp(-1,7058) = 94,9822 \text{ eV}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 (z^*)^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} (Z^*) \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I^*} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4,3,1416 \cdot (2,8180 \cdot 10^{-13} \text{ cm})^2 1^2 \frac{0,511}{0,1845} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{15,9994} 7,9994 \\ \left[\ln \left(\frac{2,0,511}{94,9822 \times 10^{-6}} 0,1845 \cdot 1,2262 \right) - 0,1845 \right] = 6,3097 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

Hidrojen için;

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{V_0^2}{V^2} Z^{4/3} = \frac{1,8648^2}{0,60647} \frac{(2,42 \cdot 10^6)^2}{(129 \cdot 10^6)^2} 1^{4/3} = 0,0020$$

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

$$x = -2\left(\frac{1,8648}{3}\right) + \frac{\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}{\left[\frac{0,0020}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,0020}{2}\right)^2 + 0,0020\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{1/3}} +$$

$$\left[\frac{0,0020}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,0020}{2}\right)^2 + 0,0020\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{1/3}$$

$$= 0,0006$$

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x+b)}{(x+b)^3} = 1 \frac{1,8648^2(3 \cdot 0,0006 + 1,8648)}{(0,0006 + 1,8648)^3} = 1,0000$$

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

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

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot 1,0000} \left[0,0006^2(0,0006 + 3 \cdot 1,8648) \ln 0,0006 + 0,0006(0,0006 + 1,8648)1,8648 \right.$$

$$\left. + 0,0006(\ln 6 - 2)3 \cdot 1,8648^2 + 1,8648^3(\ln 6 - 10/3) \right.$$

$$\left. + (3 \cdot 0,0006 + 1,8648)1,8648^2 \ln \frac{1,8648^2}{(0,0006 + 1,8648)^4} - \right.$$

$$\left. (0,0006 + 1,8648)^3 \ln(0,0006 + 1,8648) \right] / (0,0006 + 1,8648)^3 = -1,7055$$

$$I_2 = 10,4621 \gamma Z_2$$

$$\gamma = \frac{19,2000}{10,4621 \cdot 1} = 1,8352$$

$$I^* = 2(13,6)\gamma Z C_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$I^* = 2(13,6)1,8352 \cdot 1,0,6065^{-3/2} \exp(-1,7055) = 19,2000 \text{ eV}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 (z^*)^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} (Z^*) \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{(I^*)} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} &= 4.3,1416 \cdot (2,8180 \cdot 10^{-13} \text{ cm})^2 \cdot 1^2 \cdot \frac{0,511}{0,1845} \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{1,0080} \cdot 1,0000 \\ &\left[\ln \left(\frac{2 \cdot 0,511}{19,2000 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,1845 \cdot 1,2262 \right) - 0,1845 \right] = 15,2131 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g} \end{aligned}$$

Su için;

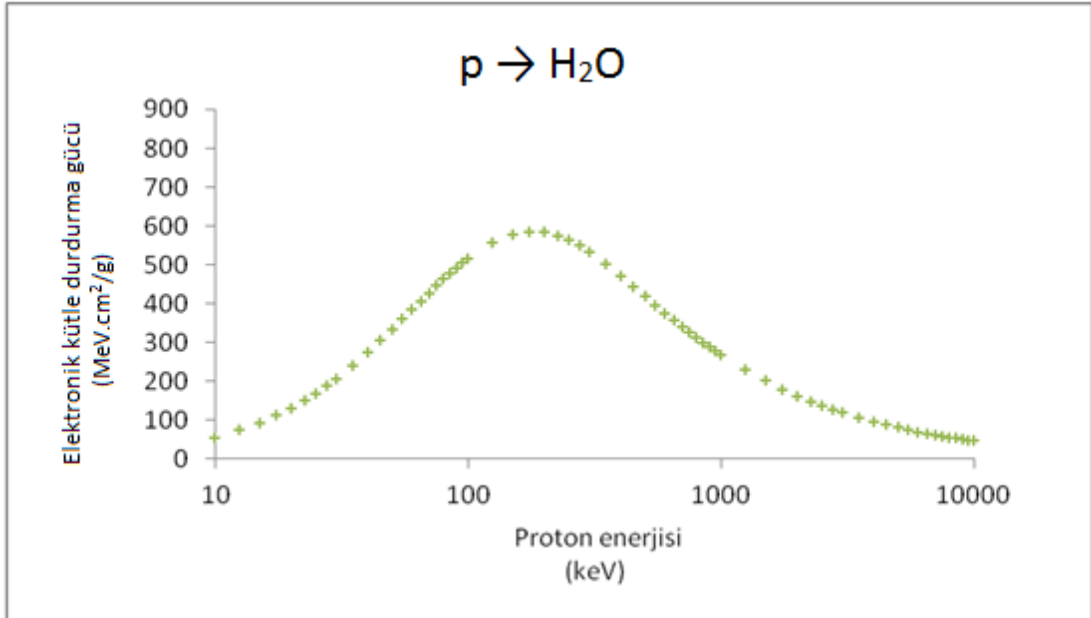
$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{H_2O} = w_O \left(\frac{dE}{dx} \right)_O + w_H \left(\frac{dE}{dx} \right)_H$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{H_2O} &= (0,8881 \cdot 6,3097) + (0,1119 \cdot 15,2131) \\ &= 7,3060 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g} \end{aligned}$$

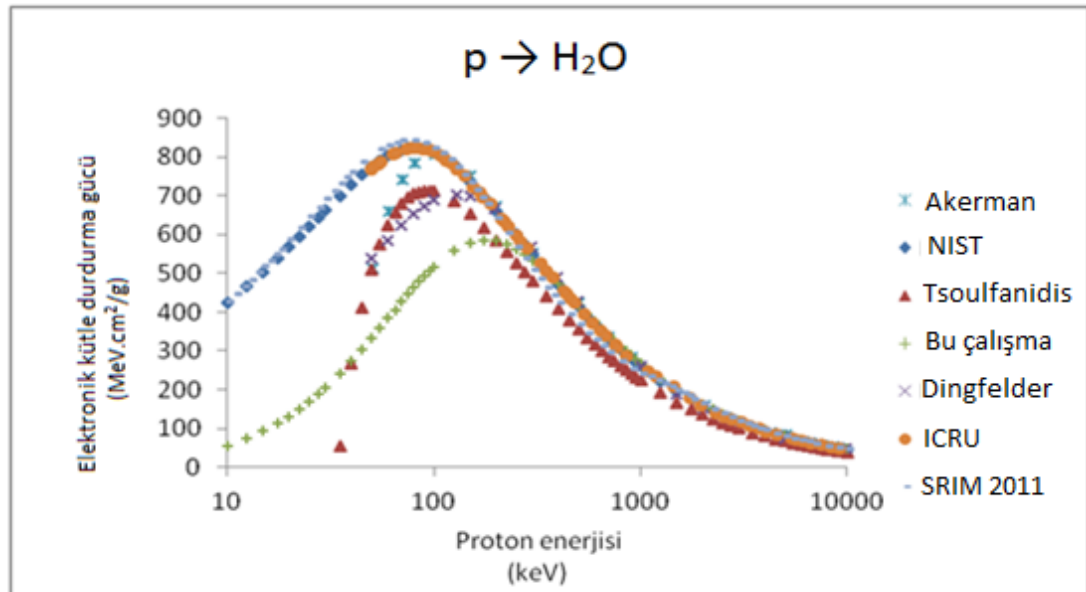
Çizelge 4.1. Proton için suyun kütle durdurma gücü

T (MeV)	β^2	z^*	$Z^*(O)$	$I^*(O)$	$Z^*(H)$	$I^*(H)$	Tsoulfanidis eşitliği ile hesaplanan kütle durdurma gücü (MeVcm ² /g)	z^*,Z^*,I^* kullanarak hesaplanan kütle durdurma gücü (MeVcm ² /g)
1E-03	2,15E-06	0.019655	0,352730	0,854046	0,212225	1,40784	-	1,5985487
0,01	2,15E-05	0.142801	1,327186	5,082392	0,576269	6,41299	-	54,3815457
0,02	4,29E-05	0.248394	1,900811	8,443559	0,708798	9,18943	-	131,0200120
0,04	7,51E-05	0.374908	2,491001	12,520260	0,805269	11,68537	54,64934	240,7479620
0,07	0,000150	0.581335	3,379299	19,867890	0,898033	14,63796	679,98720	426,7703530
0,08	0,000172	0.624893	3,568144	21,627990	0,911815	15,14176	705,01130	462,7373640
0,09	0,000193	0.663412	3,738658	23,280360	0,922856	15,56136	712,94300	492,4548780
0,10	0,000215	0.697576	3,893982	24,839160	0,931864	15,91545	711,10200	516,7052630
0,15	0,000322	0.820129	4,510019	31,555670	0,959380	17,07618	652,27330	578,6588140
0,20	0,000429	0.890950	4,955472	36,992370	0,972870	17,70191	584,05300	583,1850390
0,50	0,001073	0.993306	6,295145	57,023130	0,993700	18,79360	354,55180	418,4882280
1,00	0,002144	0.999906	7,080776	72,393380	0,998168	19,06928	223,12400	267,2561120
5,00	0,010650	1.000000	7,888832	93,766200	0,999915	19,19264	66,21389	80,3286507
25,00	0,051591	1.000000	7,993163	97,671360	0,999996	19,19962	17,99966	21,8519666
65,00	0,126202	1.000000	7,998779	97,934580	0,999999	19,19993	8,36946	10,1528430
75,00	0,143479	1.000000	7,999050	97,948350	1,000000	19,19995	7,49086	9,0860120
8000	0,151926	1.000000	7,999151	97,953520	1,000000	19,19995	7,12903	8,6466942
90,00	0,168449	1.000000	7,999307	97,961610	1,000000	19,19996	6,51912	7,9062413
100,00	0,184494	1.000000	7,999420	97,967570	1,000000	19,19997	6,02459	7,3059225
125,00	0,222632	1.000000	7,999600	97,977140	1,000000	19,19998	5,11818	6,2057555
150,00	0,258156	1.000000	7,999701	97,982670	1,000000	19,19998	4,50121	5,4570029
175,00	0,291299	1.000000	7,999765	97,986180	1,000000	19,19999	4,05385	4,9141598
200,00	0,322270	1.000000	7,999807	97,988560	1,000000	19,19999	3,71466	4,5026008
225,00	0,351254	1.000000	7,999838	97,990270	1,000000	19,19999	3,44876	4,1800057
250,00	0,378418	1.000000	7,999860	97,991540	1,000000	19,19999	3,23490	3,9205420
275,00	0,403911	1.000000	7,999877	97,992520	1,000000	19,19999	3,05931	3,7075276
300,00	0,427867	1.000000	7,999890	97,993290	1,000000	19,19999	2,91272	3,5296986
500,00	0,576569	1.000000	7,999939	97,996180	1,000000	19,20000	2,27209	2,7525719
1000,00	0,767418	1.000000	7,999966	97,997780	1,000000	19,20000	1,83506	2,2222399
10000,00	0,992739	1.000000	7,999979	97,998640	1,000000	19,20000	1,91731	2,3186269

Eş.3.2 ve Eş.3.14 kullanılarak oluşturulan Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi, iki formülde de kullanılan z , Z , ve I değerlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle kütle durdurma gücü sonuçlarında farklılık görülmektedir.



Şekil 4.1. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan proton için suyun kütle durdurma gücü



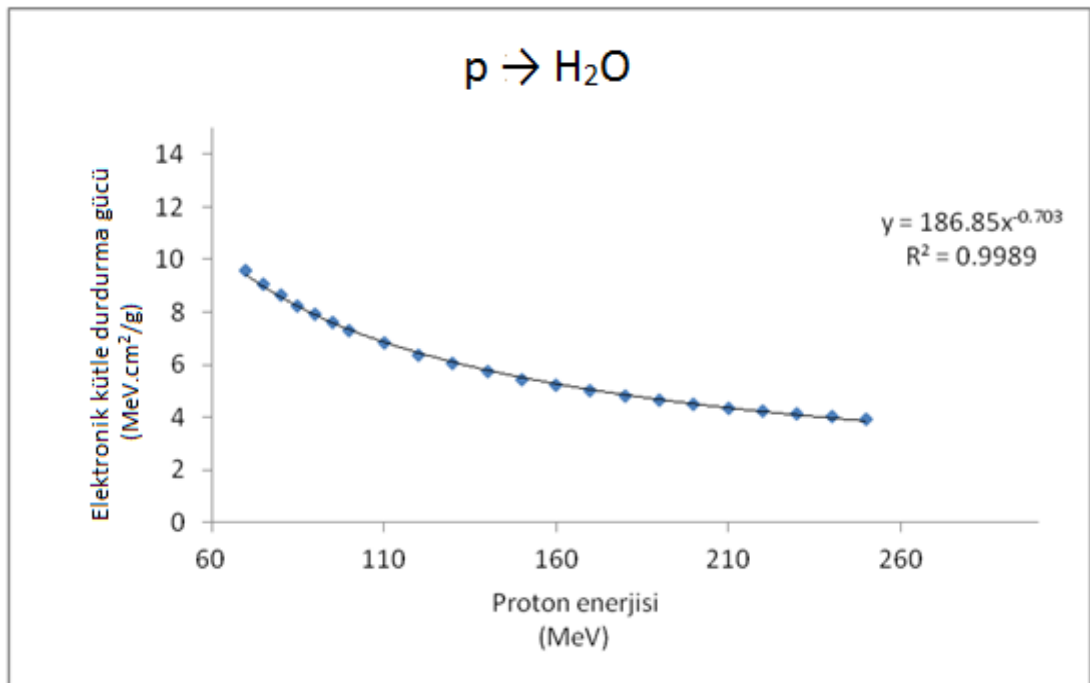
Şekil 4.2. Proton için suyun kütle durdurma gücü hesaplamaları

Çizelge 4.2. Proton için suyun kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması

Enerji (MeV)	Tsoulfandis (MeV.cm ² /g)	Bu çalışma (MeV.cm ² /g)	PSTAR (MeV.cm ² /g)	Akerman (MeV.cm ² /g)	Dingfelter (MeV.cm ² /g)
0,001	-	1,599	133,700	-	-
0,010	-	54,382	422,900	-	-
0,035	44,579	240,748	698,900	-	-
0,080	700,605	462,737	(max) 824,100	790,000	655,000
0,095	(max) 709,226	505,217	819,000	796,000	660,000
0,100	707,578	516,705	814,500	804,000	669,000
0,125	683,745	557,966	780,100	(max) 807,000	(max) 703,000
0,175	615,157	(max) 585,500	695,900	752,000	700,000
0,500	353,850	418,490	412,800	667,000	660,000
1,000	222,770	267,260	260,600	280,000	285,000
10,000	37,930	46,100	45,640	43,000	40,000
65,000	8,360	10,150	10,120	11,000	10,000
100,000	6,020	7,310	7,290	8,000	7,200
250,000	3,230	3,920	3,910	3,920	3,900
500,000	2,270	2,750	2,740	2,750	2,700
1000,000	1,830	2,220	2,210	2,200	2,200

Yukarıda Şekil.4.2 ve Çizelge.4.2’de, Eş.3.2 (Tsoulfanidis) ve Eş.3.14 (bu çalışma) ile hesaplanan kütle durdurma gücü değerleri SRIM 2011, PSTAR NIST, Akerman ve Dingfelter’in hesapladığı değerlerle karşılaştırılmıştır. Akerman ile Dingfelter’in hesapladığı değerler ENGAUGE grafik analiz programı ile elde edildiğinden yaklaşık değerlerdir [Akerman.2001,Dingfelter,2000].

Bu karşılaştırmalara göre, küçük enerji değerlerine Eş.3.14 , PSTAR NIST ve SRIM 2011 cevap verirken Tsoulfanidis’in eşitliği 0,035 MeV enerjisinden itibaren cevap vermektedir. Maksimum kütle durdurma gücü değerlerine baktığımızda Eş.3.14 ün daha düşük bir maksimuma sahip olduğu, diğer çalışmaların ise birbirlerine daha yakın değerlerde oldukları söylenebilir. Tedavi aralığı olan 75 MeV-250 MeV enerjilerine ve daha yüksek enerji değerlerine bakıldığında Tsoulfanidis dışındakilerin tamamen birbiri ile uyum içerisinde olduğu, Tsoulfanidis’in ise bunlara yakın değerler verdiği söylenebilir. Hastanelerde kullanılan lineer hızlandırıcılarda, SRIM verilerinin kullanılması sebebiyle, tedavi enerjilerindeki bu uyum önemlidir [Physics data,2012].



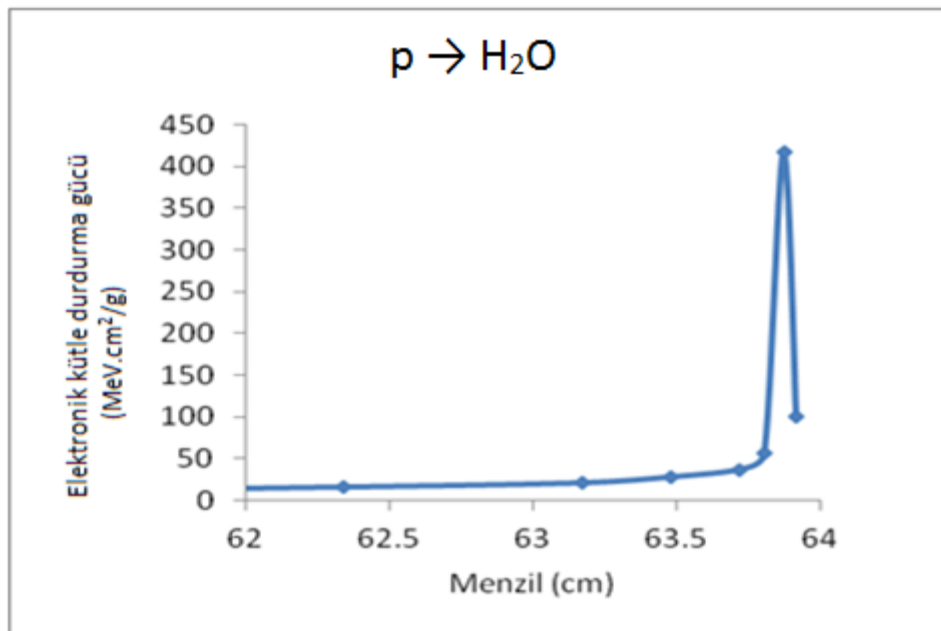
Şekil 4.3. Proton için suyun kütle durdurma gücünün enerjiye bağılılığı

70 MeV – 250 MeV enerji aralığında protonun Eş. 3.14 kullanılarak sudaki durdurma gücü hesaplanmış ve Şekil 4.3'deki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik fit edilerek proton için suyun kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığını veren

$$(1/\rho)S = 186,85E^{-0,703} \quad (4.1)$$

ampirik ifadesi türetilmiştir. Bu ifade ile tedavi aralığındaki istenilen enerjideki bir proton için suyun durdurma gücü pratik bir şekilde hesaplanabilir.

Ayrıca bu çalışmada küçük enerji yaklaşımı ile su için protonun Bragg Pik'i oluşturulmuştur. 250 MeV enerjiye sahip bir protonun su içindeki küçük enerji kayıplarına karşılık menzilleri ve her kaybedilen enerjiye karşılık gelen menzilleri toplanarak aldığı toplam yol bulunmuştur. Daha sonra kütle durdurma gücü – menzil grafiği çizilerek Bragg Pik'i oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. 250 MeV enerjiye sahip protonun sudaki Bragg Piki

Bragg pikini oluşturabilmek için dE/dx integralinin çözülmesi gerekmektedir. R.D.Ilic (2002) Monte Carlo programı ile yaptığı hesaplamada 250 MeV enerjiye sahip bir protonun Bragg pikini oluşturmuş ve tepe noktasının menzilini yaklaşık 34

cm olarak bulunmuştur [Beebe ve ark,2002]. Bu çalışmada ise küçük enerji yaklaşımı ile Bragg pikinin tepe noktasının menziline yaklaşık 63,8 cm olarak bulunmuştur. Aradaki farkın sebebi ise Bragg pikini dE/dx integralini çözmek yerine yaklaşım kullanarak bulmamızdan kaynaklanmaktadır.

Proton için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü hesabı:

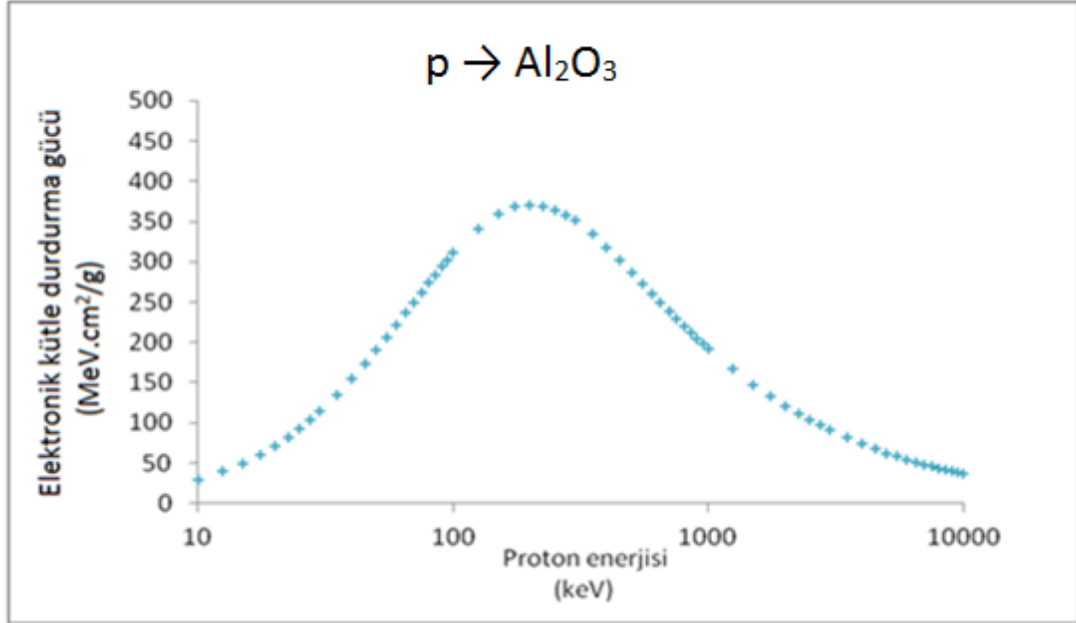
Eş.3.2 kullanılarak yapılan hesaplamada Çizelge.3.2 deki değerler kullanılarak Eş.3.3' den $A_{ort} = 21,81$ u olarak, Eş.3.4 den $Z_{ef} = 10,60$ olarak hesaplanmıştır, I değeri ise NIST programından 145,20 eV olarak alınmıştır

Eş.3.14 kullanılarak yapılan hesaplamada Eş.3.10, Eş.3.15 ve Eş.3.8 kullanılarak sırasıyla; V, z^* ve b değerleri bulunmuştur. Daha sonra O ve Al un her biri için Eş.3.6 dan Z^* , Eş.3.7 den I^* değerleri hesaplanmış ve Eş.3.14 de yerlerine konarak bulunan kütle durdurma güçleri Çizelge 3.2 de bulunan yüzde ağırlıkları ile çarpılmış ve bulunan değerler toplanarak Al_2O_3 ün kütle durdurma gücü hesaplanmıştır. Eş.3.6 da ve Eş.3,7 de bulunan; a, x, α ve γ değerlerini bulmak için Çizelge 3.2, Eş.3.9, Eş.3.11, Eş.3.12 ve Eş.3.13 den yararlanılmıştır.

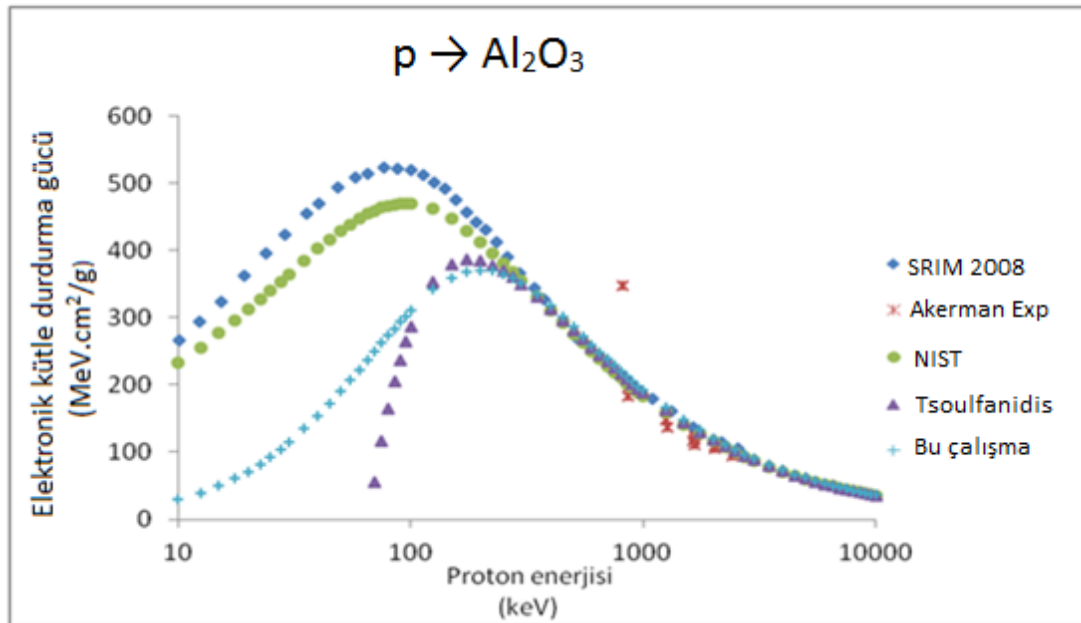
Çizelge 4.3. Protonlar için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü hesabı

T (Mev)	β^{*2}	z^*	$Z^*(O)$	$I^*(O)$	$Z^*(Al)$	$I^*(Al)$	Tsoulfanidis eşitliği ile hesaplanan kütle durdurma gücü (MeVcm ² /g)	z^*,Z^*,I^* kullanarak hesaplanan kütle durdurma gücü (MeV cm ² /g)
1E-03	2,15E-06	0,019655	0,352730	0,85405	0,38551	0,861871	-	0,931523
5E-03	1,07E-05	0,079784	0,906820	3,00921	1,01661	3,089555	-	10,886170
6,5E-03	0,000140	0,557412	3,276719	18,94189	3,99472	20,797120	-	236,229200
0,07	0,000150	0,581335	3,379299	19,86789	4,13467	21,885370	55,75110	249,552400
0,15	0,000322	0,820129	4,510019	31,55567	5,754428	36,202030	379,21940	359,385400
0,18	0,000376	0,860224	4,748588	34,40269	6,11696	39,863620	386,28780	368,281500
0,20	0,000429	0,890950	4,955472	36,99237	6,43828	43,258950	384,42490	370,889800
0,23	0,000483	0,914630	5,137278	39,36599	6,72641	46,427810	378,11240	369,223000
70,00	0,134905	1,000000	7,998928	97,94213	12,99389	165,681500	7,59568	7,796147
80,00	0,151926	1,000000	7,999151	97,95352	12,99514	165,742800	6,86423	7,043476
95,00	0,176530	1,000000	7,999368	97,96480	12,99636	165,804100	6,03850	6,194073
150,00	0,258156	1,000000	7,999701	97,98267	12,99826	165,902300	4,36208	4,470708
200,00	0,322270	1,000000	7,999807	97,98856	12,99888	165,935100	3,60916	3,697250
250,00	0,378418	1,000000	7,999860	97,99154	12,99918	165,951900	3,14895	3,224669
1000,00	0,767418	1,000000	7,999966	97,99778	12,99980	165,987200	1,80579	1,845422
10000,00	0,992739	1,000000	7,999979	97,99864	12,99988	165,992100	1,92192	1,957299

Eş.3.2 ve Eş.3.14 kullanılarak oluşturulan Çizelge 4.3 de görüldüğü gibi, iki formülde de kullanılan z , Z , ve I değerlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle kütle durdurma gücü sonuçlarında farklılık görülmektedir.



Şekil 4.5. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan proton için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü



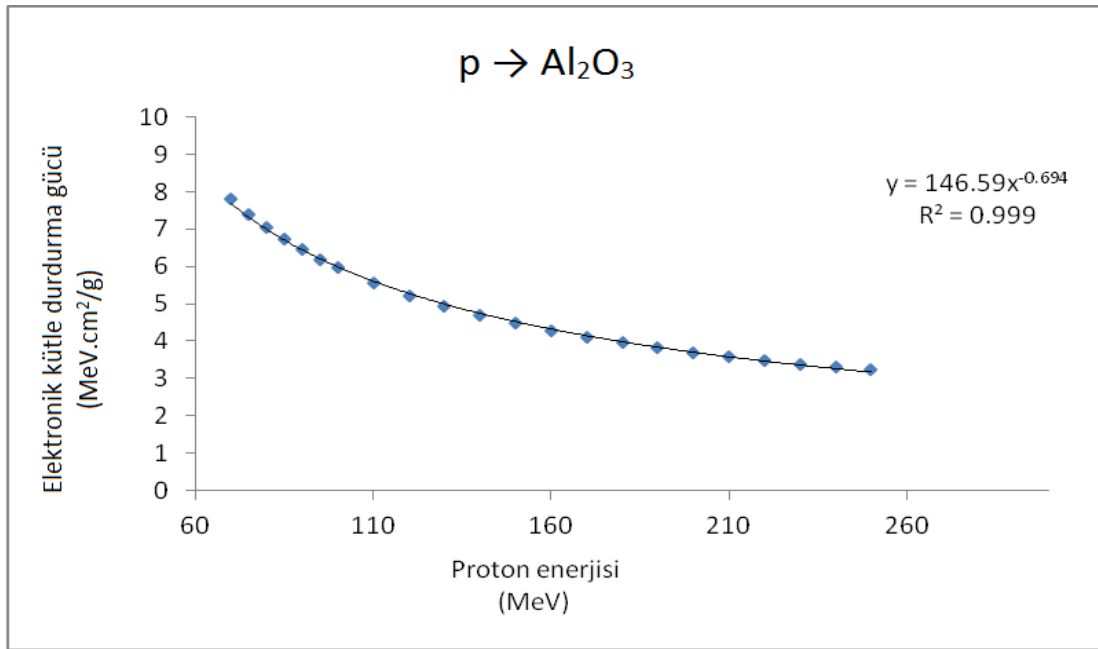
Şekil 4.6. Proton için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü hesaplamalar

Çizelge4.4.Proton için Al₂O₃'in kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması

Enerji (MeV)	Tsoulfandis (MeV.cm ² /g)	Bu çalışma (MeV.cm ² /g)	PSTAR (MeV.cm ² /g)	Akerman (MeV.cm ² /g)
0,050	-	190,070	429,000	-
0,070	55,750	249,550	459,600	-
0,095	264,530	302,410	470,200	-
0,175	386,290	368,280	430,100	-
0,200	384,430	370,890	412,700	-
0,800	259,990	311,140	210,200	-350,000
1,000	188,950	191,780	183,200	-175,000
10,000	35,330	36,390	35,410	-35,000
65,000	8,040	8,250	8,140	-8,000
100,000	5,820	5,960	5,890	-6,000
250,000	3,150	3,230	3,190	-3,000
500,000	2,220	2,280	2,240	-2,300

Yukarıda Şekil.4.6 ve Çizelge.4.4'de, Eş.3.2 (Tsoulfanidis) ve Eş.3.14 (bu çalışma) ile hesaplanan kütle durdurma gücü değerleri SRIM 2008, PSTAR NIST ve Akerman'ın hesapladığı değerlerle karşılaştırılmıştır. Akerman'ın hesapladığı değerler ENGAUGE grafik analiz programı ile elde edildiğinden yaklaşık değerlerdir [PSTAR,2009,Akerman,2001,Dingfelder,2000].

Bu karşılaştırmalara göre, küçük enerji değerlerine Eş.3.14 , PSTAR NIST ve SIRIM 2008 cevap verirken Tsoulfanidis'in eşitliği 0,070 MeV enerjisinden itibaren cevap vermektedir. Maksimum kütle durdurma gücü değerlerine baktığımızda Eş.3.2 ile Eş.3.14 ün daha düşük bir maksimuma daha yüksek bir enerjide sahip olduğu, PSTAR NIST ve SRIM 2008 in ise daha yüksek bir maksimuma daha düşük enerjilerde ulaştıkları söylenebilir. Akerman'ın bu çalışmasında küçük enerji değerleri ve maksimum kütle durdurma gücü hakkında bir bilgiye ulaşamıyoruz. Tedavi aralığı olan 75 MeV-250 MeV enerjilerine ve daha yüksek enerji değerlerine bakıldığında çalışmaların hepsinin uyum içinde olduğu söylenebilir.



Şekil 4.7. Proton için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücünün enerjiye bağılılığı

70 MeV – 250 MeV enerji aralığında protonun Eş. 3.14 kullanılarak Al_2O_3 'deki durdurma gücü hesaplanmış ve Şekil 4.7'deki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik fit edilerek, protonun Al_2O_3 'deki kütle durdurma gücünün enerjiye bağılılığını veren

$$(1/\rho)S = 146,59E^{-0,694} \quad (4.2)$$

ampirik ifadesi türetilmiştir. Bu ifade ile tedavi aralığındaki istenilen enerjideki bir protonun Al_2O_3 'deki durdurma gücü pratik bir şekilde hesaplanabilir.

Proton için akciğerin kütle durdurma gücü hesabı:

Eş.3.2 kullanılarak yapılan hesaplamada Çizelge.3.3 deki değerler kullanılarak Eş.3.3 den $A_{\text{ort}} = 14,20$ u olarak, Eş.3.4 den $Z_{\text{ef}} = 6,02$ olarak hesaplanmıştır, I değeri ise NIST programından 75,30 eV olarak alınmıştır.

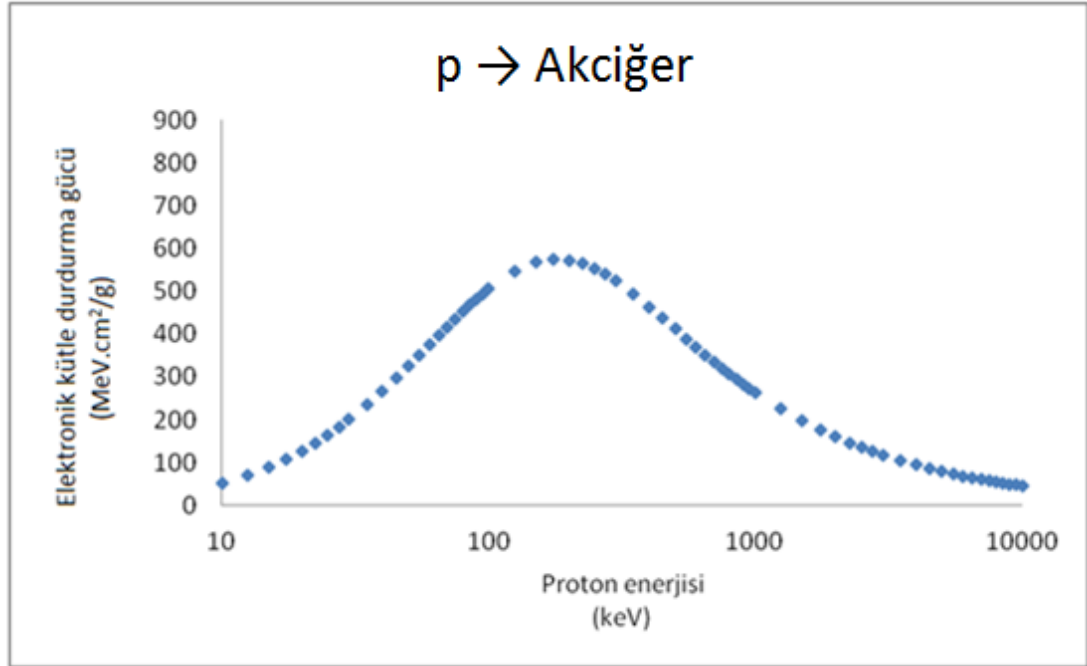
Eş.3.14 kullanılarak yapılan hesaplamada Eş.3.10, Eş.3.15 ve Eş.3.8 kullanılarak sırasıyla; V, z^* ve b değerleri bulunmuştur. Daha sonra H, C, N, O, Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Fe ve Ze nin her biri için Eş.3.6'dan Z^* , Eş.3.7'den değerler hesaplanmış

ve Eş.3.14'de yerlerine konarak bulunan kütle durdurma güçleri Çizelge 3.3'de bulunan yüzde ağırlıkları ile çarpılmış ve bulunan değerler toplanarak akciğerin kütle durdurma gücü hesaplanmıştır. Eş.3.6'da ve Eş.3,7'de bulunan; a , x , α ve γ değerlerini bulmak için Çizelge 3.3, Eş.3.9, Eş.3.11, Eş.3.12 ve Eş.3.13'den yararlanılmıştır.

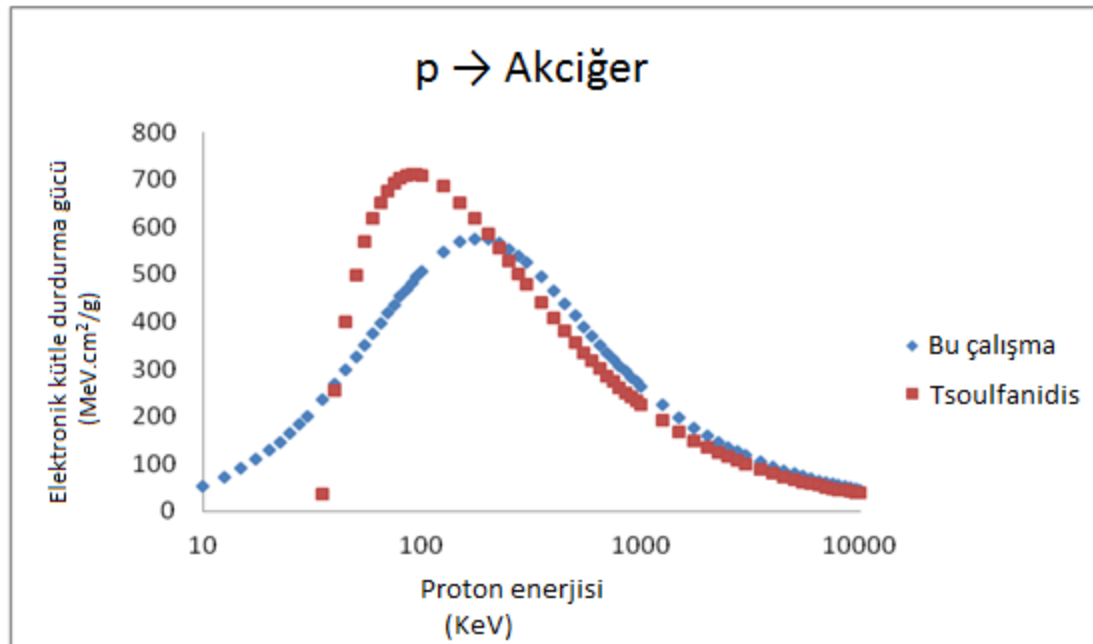
Çizelge 4.5. Proton için akciğerin kütle durdurma gücü hesabı

T (Mev)	B ²	z*	Z*(C)	I*(C)	Z*(N)	I*(N)	Tsoulfanidis eşitliği ile hesaplanan kütle durdurma gücü (MeVcm ² /g)	z*,Z*,I* kullanarak hesaplanan kütle durdurma gücü (MeV cm ² /g)
0,001	2,15E-06	0,019655	0,333326	0,95696	0,34372	0,94873	-	1,56371
0,010	2,15E-05	0,142801	1,217962	5,57638	1,27644	5,59333	-	52,99200
0,030	6,44E-05	0,336100	2,074942	12,10080	2,20396	12,27330	-	201,03180
0,035	7,51E-05	0,374908	2,221742	13,41634	2,36530	13,63535	37,29605	235,20770
0,090	0,000193	0,663412	3,235795	24,23946	3,50222	25,03261	710,58680	482,66250
0,095	0,000204	0,681001	3,298029	25,01155	3,57342	25,85913	710,94210	495,26690
0,100	0,000215	0,697576	3,357272	25,75929	3,64137	26,66136	709,42240	506,62260
0,150	0,000322	0,820129	3,827812	32,16950	4,18748	33,61375	652,28500	568,17880
0,175	0,000376	0,860224	4,004951	34,81840	4,39633	36,52807	617,55070	575,19250
0,200	0,000429	0,890950	4,156123	37,19207	4,57616	39,16157	584,66380	573,16770
1,000	0,002144	0,999906	5,546436	65,90320	6,33309	73,23772	223,92050	263,56740
50,000	0,099290	1,000000	5,999309	80,95851	6,99880	94,42933	10,34323	12,33929
75,000	0,143479	1,000000	5,999665	80,97904	6,99941	94,46417	7,52917	8,97958
80,000	0,151926	1,000000	5,999701	80,98116	6,99948	94,46778	7,16555	8,54553
100,000	0,184494	1,000000	5,999796	80,98690	6,99964	94,47755	6,05564	7,22080
150,000	0,258156	1,000000	5,999895	80,99303	6,99982	94,48803	4,52464	5,39386
200,000	0,322270	1,000000	5,999932	80,99541	6,99988	94,49211	3,73412	4,45074
250,000	0,378418	1,000000	5,999951	80,99661	6,99991	94,49417	3,25193	3,87553
500,000	0,576569	1,000000	5,999979	80,99847	6,99996	94,49737	2,28421	2,72127
1000,000	0,767418	1,000000	5,999988	80,99911	6,99998	94,49847	1,84498	2,19722
10000,000	0,992739	1,000000	5,999993	80,99946	6,99999	94,49906	1,92814	2,29340

Eş.3.2 ve Eş.3.14 kullanılarak oluşturulan Çizelge 4.5’de görüldüğü gibi, iki formülde de kullanılan z , Z , ve I değerlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle kütle durdurma gücü sonuçlarında farklılık görülmektedir.



Şekil 4.8. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan proton için akciğerin kütle durdurma gücü

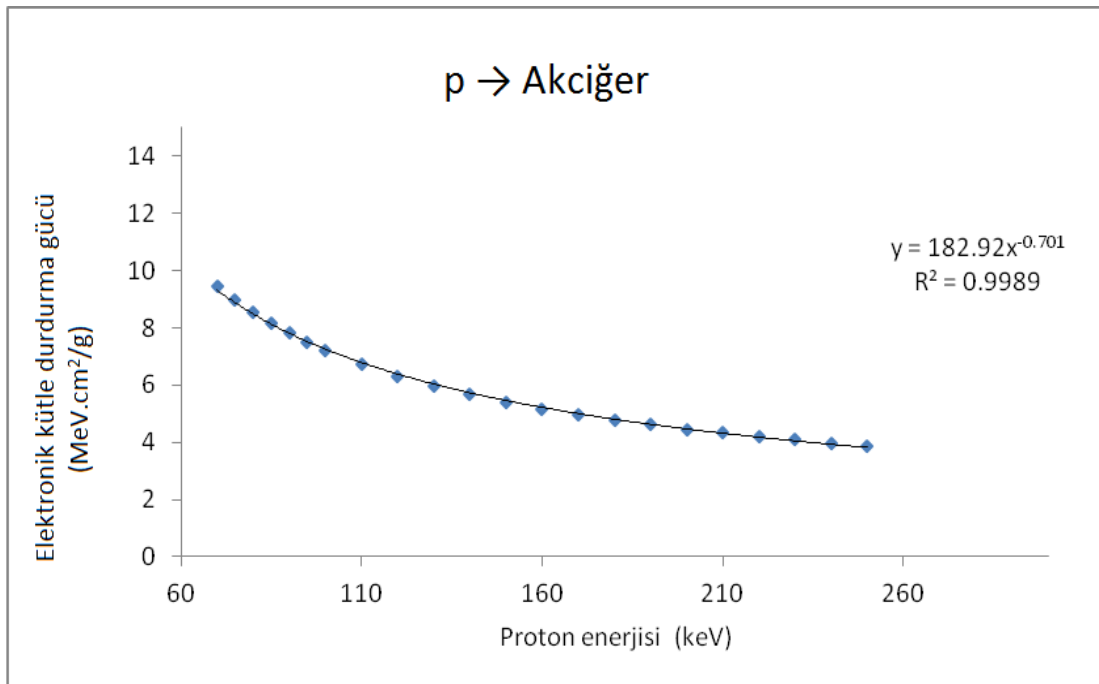


Şekil 4.9. Proton için akciğerin kütle durdurma gücü hesaplamaları

Yukarıda Şekil.4.9 ve Çizelge.4.5’de, Eş.3.2 (Tsoulfanidis) ve Eş.3.14 (bu çalışma) ile hesaplanan kütle durdurma gücü değerleri karşılaştırılmıştır.

Bu karşılaştırmalara göre, küçük enerji değerlerine Eş.3.14 ile yapılan hesaplamalar cevap verirken Tsoulfanidis’in eşitliği ile 0,035 MeV enerjiden sonra değerler alınabilmektedir. Maksimum kütle durdurma gücü değerlerine baktığımızda Eş.3.14’ün daha düşük bir maksimuma daha yüksek bir enerjide sahip olduğu, Eş.3.2 nin ise daha yüksek bir maksimuma daha düşük enerjilerde ulaştıkları söylenebilir. Tedavi aralığı olan 75 MeV-250 MeV enerjilerine ve daha yüksek enerji değerlerine bakıldığında iki çalışmanın da birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir.

Ayrıca su ve akciğer için bulunan sonuçların birbirinden çok farklı olmadığını söylenebilir. Bu sonuç suyun yaklaşık doku eşdeğeri olarak kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.10. Proton için akciğerin kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı

70 MeV – 250 MeV enerji aralığında protonun Eş. 3.14 kullanılarak akciğerdeki durdurma gücü hesaplanmış ve Şekil 4,10’daki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bu

grafik fit edilerek, protonun akciğerdeki kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığını veren

$$(1/\rho)S = 182,92E^{-0,701} \quad (4.3)$$

ampirik ifadesi türetilmiştir. Bu ifade ile tedavi aralığındaki istenilen enerjideki bir protonun akciğerdeki durdurma gücü pratik bir şekilde hesaplanabilir.

Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü hesabı:

Eş.3.2 kullanılarak yapılan hesaplamada Çizelge.3.1'deki değerler kullanılarak Eş.3.3 den $A_{ort} = 14,3216 u$ olarak, Eş.3.4 den $Z_{ef} = 6,6011$ olarak hesaplanmıştır, I değeri ise NIST programından 74,60 eV olarak alınmıştır.

Örnek olarak Eş.3.2'yi kullanarak 100 MeV enerjiye sahip bir karbonun sudaki kütle durdurma gücü hesabı aşağıda verilmiştir.

$I = 74,60 eV$ olarak alınmıştır. [ESTAR,2009]

$$A_{ort} = \sum_i (A_i w_i) = A_O w_O + A_H w_H$$

$$= (15,9994 \cdot 0,8881) + (1,0080 \cdot 0,1119)$$

$$= 14,3216 u$$

$$Z_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i} \right) z_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{A_i} \right) z_i} = \frac{\left(\frac{w_O}{A_O} z_O^2 \right) + \left(\frac{w_H}{A_H} z_H^2 \right)}{\left(\frac{w_O}{A_O} z_O \right) + \left(\frac{w_H}{A_H} z_H \right)} = \frac{\left(\frac{0,8881}{15,9994} 8^2 \right) + \left(\frac{0,1119}{1,0080} 1^2 \right)}{\left(\frac{0,8881}{15,9994} 8 \right) + \left(\frac{0,1119}{1,0080} 1 \right)}$$

$$= 6,6011$$

$$\gamma = \frac{(T + Mc^2)}{Mc^2} = \frac{1}{(1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\gamma = \frac{(100 + 12.931,5)}{12.931,5} = 1,0090$$

$$\gamma^2 = 1,0180$$

$$\beta^2 = 0,0177$$

$$\beta = 0,1329$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} Z \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4,3,1416 \cdot (2,8180 \cdot 10^{-13} \text{ cm})^2 6^2 \frac{0,511}{0,0177} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{14,3216} 6,6011$$

$$\left[\ln \left(\frac{2,0,511}{74,6 \cdot 10^{-6}} 0,0177 \cdot 1,0180 \right) - 0,0177 \right] = 1583,7477 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

Eş.3.14 kullanılarak yapılan hesaplamada Eş.3.10, Eş.3.15 ve Eş.3.8 kullanılarak sırasıyla; V, z^* ve b değerleri bulunmuştur. Daha sonra O ve H in her biri için Eş.3.6' dan Z^* , Eş.3.7'den I^* değerleri hesaplanmış ve Eş.3.14'de yerlerine yazılarak bulunan kütle durdurma güçleri Çizelge 3.1'de bulunan yüzde ağırlıkları ile çarpılmış ve bulunan değerler toplanarak suyun kütle durdurma gücü hesaplanmıştır. Eş.3.6'da ve Eş.3.7'de bulunan; a, x, α ve γ değerlerini bulmak için Çizelge 3.1, Eş.3.9, Eş.3.11, Eş.3.12 ve Eş.3.13'den yararlanılmıştır.

Örnek olarak Eş.3.14'ü kullanarak 100 MeV enerjiye sahip bir protonun sudaki kütle durdurma gücü hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\beta = V / c$$

$$V = 0,1329 \cdot 2,9979 \cdot 10^8 = 39,8340 \cdot 10^6 \text{ m / s}$$

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

$$z^* = 1 - \exp(-2200 \cdot 0,1329^{1,78}) = 1$$

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

Oksijen için;

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{V_0^2}{V^2} Z^{4/3} = \frac{1,8648^2}{0,60647} \frac{(2,42 \cdot 10^6)^2}{(39,8340 \cdot 10^6)^2} 8^{4/3} = 0,3386$$

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

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

$$x = -2 \left(\frac{1,8648}{3} \right) + \frac{\left(\frac{1,8648}{3} \right)^3}{\left[\frac{0,3386}{2} + \left(\frac{1,8648}{3} \right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,3386}{2} \right)^2 + 0,3386 \left(\frac{1,8648}{3} \right)^3} \right]^{1/3}} +$$

$$\left[\frac{0,3386}{2} + \left(\frac{1,8648}{3} \right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,3386}{2} \right)^2 + 0,3386 \left(\frac{1,8648}{3} \right)^3} \right]^{-1/3} = 0,0887$$

$$Z^* = Z \frac{b^2 (3x+b)}{(x+b)^3} = 8 \frac{1,8648^2 (3 \cdot 0,0887 + 1,8648)}{(0,0887 + 1,8648)^3} = 7,9520$$

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

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

$$\alpha = \frac{8}{2 \cdot 7,9520} \left[0,0887^2 (0,0887 + 3 \cdot 1,8648) \ln 0,0887 + 0,0887 (0,0887 + 1,8648) 1,8648 \right.$$

$$\left. + 0,0887 (\ln 6 - 2) 3 \cdot 1,8648^2 + 1,8648^3 (\ln 6 - 10/3) \right.$$

$$\left. + (3 \cdot 0,0887 + 1,8648) 1,8648^2 \ln \frac{1,8648^2}{(0,0887 + 1,8648)^4} - \right.$$

$$\left. (0,0887 + 1,8648)^3 \ln(0,0887 + 1,8648) \right] / (0,0887 + 1,8648)^3 = -1,7260$$

$$I_2 = 10,4621 \gamma Z_2$$

$$\gamma = \frac{95,0000}{10,4621.8} = 1,1351$$

$$I^* = 2(13,6)\gamma Z C_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$I^* = 2(13,6)1,1351.8.0,6065^{-3/2} \exp(-1,7260) = 96,0155 \text{ eV}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 (z^*)^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} (Z^*) \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{(I^*)} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4.3,1416.(2,8180.10^{-13} \text{ cm})^2 (1)^2 \frac{0,511}{0,0177} \frac{6,02.10^{23}}{14,3216} 7,9520$$

$$\left[\ln \left(\frac{2.0,511}{96,0155.10^{-6}} 0,0177.1,0180 \right) - 0,0177 \right] = 45,2660 \text{ MeV.cm}^2 / \text{ g}$$

Hidrojen için;

$$a = \frac{b^2}{0,60647} \frac{V_0^2}{V^2} Z^{4/3} = \frac{1,8648^2}{0,60647} \frac{(2,42.10^6)^2}{(39,8340.10^6)^2} 1^{4/3} = 0,0212$$

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

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

$$x = -2\left(\frac{1,8648}{3}\right) + \frac{\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}{\left[\frac{0,0212}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,0212}{2}\right)^2 + 0,0212\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{1/3}} +$$

$$\left[\frac{0,0212}{2} + \left(\frac{1,8648}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,0212}{2}\right)^2 + 0,0212\left(\frac{1,8648}{3}\right)^3}\right]^{1/3} = 0,0061$$

$$Z^* = Z \frac{b^2(3x+b)}{(x+b)^3} = 1 \frac{1,8648^2(3 \cdot 0,0061 + 1,8648)}{(0,0061 + 1,8648)^3} = 1,0000$$

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

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

$$\alpha = \frac{8}{2 \cdot 1,0000} \left[0,0061^2(0,0061 + 3 \cdot 1,8648) \ln 0,0061 + 0,0061(0,0061 + 1,8648)1,8648 \right.$$

$$\left. + 0,0061(\ln 6 - 2)3 \cdot 1,8648^2 + 1,8648^3(\ln 6 - 10/3) \right.$$

$$\left. + (3 \cdot 0,0061 + 1,8648)1,8648^2 \ln \frac{1,8648^2}{(0,0061 + 1,8648)^4} - \right.$$

$$\left. (0,0061 + 1,8648)^3 \ln(0,0061 + 1,8648) \right] / (0,0061 + 1,8648)^3 = -1,7057$$

$$I_2 = 10,4621 \gamma Z_2$$

$$\gamma = \frac{19,2000}{10,4621 \cdot 1} = 1,8350$$

$$I^* = 2(13,6)\gamma Z C_0^{-3/2} \exp(\alpha)$$

$$I^* = 2(13,6)1,8350 \cdot 1 \cdot 0,6065^{-3/2} \exp(-1,7057) = 19,1971 eV$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 (z^*)^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_0}{A} (Z^*) \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{(I^*)} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 4.3,1416 \cdot (2,8180 \cdot 10^{-13} \text{ cm})^2 (1)^2 \frac{0,511}{0,0177} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{14,3216} 1$$

$$\left[\ln \left(\frac{2.0,511}{19,1971 \cdot 10^{-6}} 0,0177 \cdot 1,0180 \right) - 0,0177 \right] = 118.1443 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

➤ Su için;

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{H_2O} = w_O \left(\frac{dE}{dx} \right)_O + w_H \left(\frac{dE}{dx} \right)_H$$

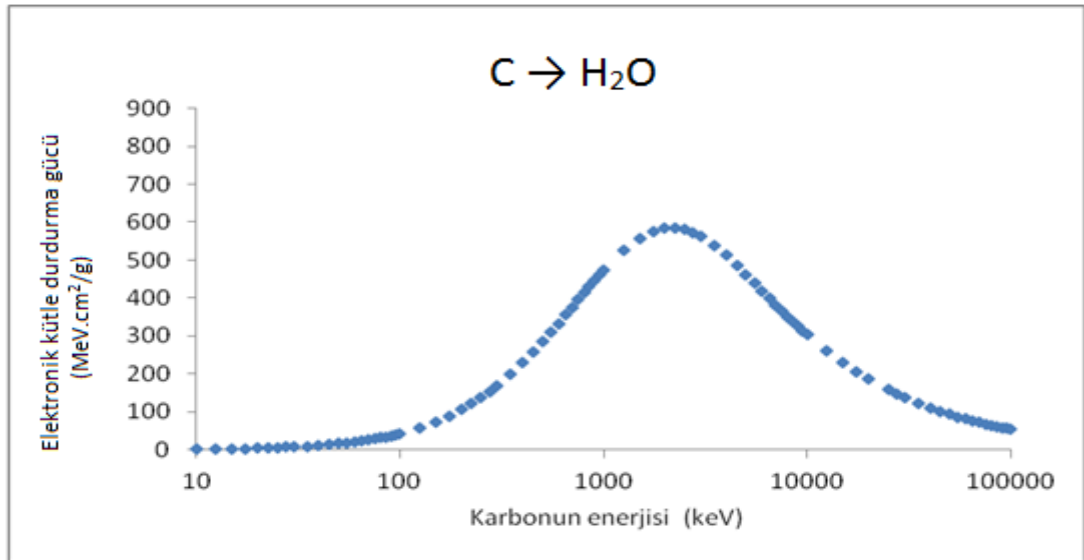
$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{H_2O} = (0,8881.45,2660) + (0,1119.118,1443)$$

$$= 53,4207 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

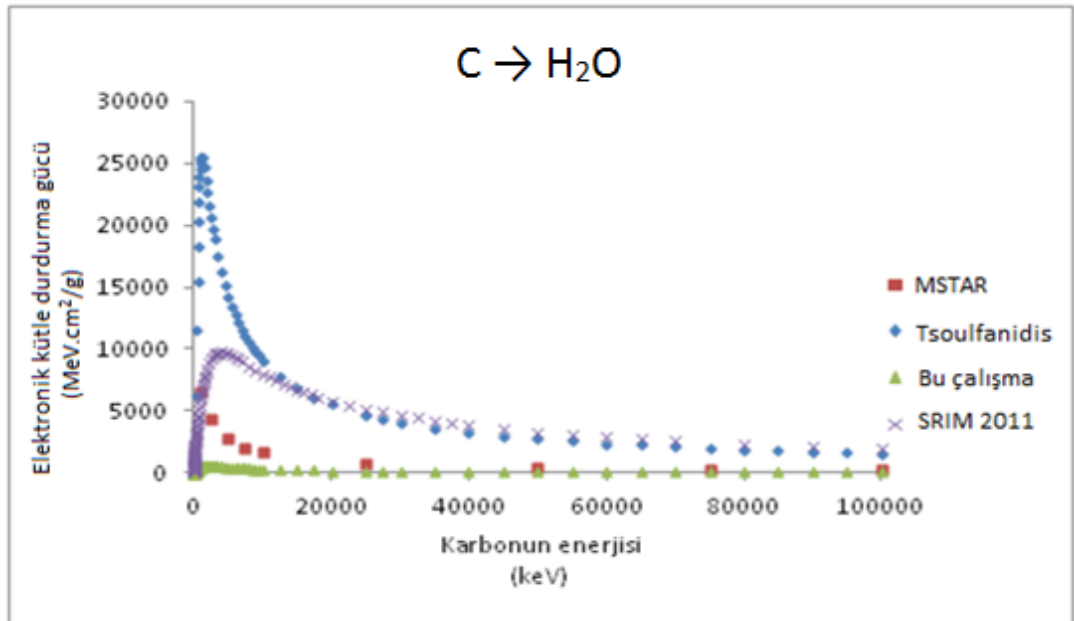
Çizelge 4.6. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü hesabı

T (Mev)	β^2	z^*	$Z^*(O)$	$I^*(O)$	$Z^*(H)$	$I^*(H)$	Tsoulfanidis eşitliği ile hesaplanan kütle durdurma gücü (MeVcm ² /g)	z^*,Z^*,I^* kullanarak hesaplanan kütle durdurma gücü (MeV cm ² /g)
1E-03	1,79E-07	0,002172	0,074448	0,11453	0,05245163	0,21026	-	0,009069
0,10	1,79E-05	0,122787	1,202945	4,43412	0,54113776	5,77786	-	42,390510
0,40	7,16E-05	0,362303	2,434893	12,10565	0,79750398	11,46596	-	229,337800
0,45	8,05E-05	0,393233	2,571846	13,12775	0,81599779	11,99467	6201,614	257,434500
0,95	0,000170	0,621466	3,553158	21,48565	0,91078325	15,10330	25333,700	459,989900
1,00	0,000179	0,638256	3,626845	22,18997	0,91575929	15,28993	25527,640	473,297900
1,25	0,000224	0,710664	3,954801	25,46378	0,93513907	16,04701	25505,710	525,369900
2,00	0,000358	0,848037	4,672984	33,48469	0,96484204	17,32404	22634,200	584,432700
2,25	0,000402	0,876595	4,855524	35,72684	0,97022351	17,57539	21610,480	585,254500
2,50	0,000447	0,899531	5,018596	37,80586	0,97444030	17,77795	20650,070	580,973900
10,00	0,001787	0,999623	6,900365	68,53681	0,99744449	19,02222	9117,317	302,721300
75,00	0,013285	1,000000	7,922378	94,93292	0,99994516	19,19512	1995,588	67,286350
90,00	0,015911	1,000000	7,942634	95,66692	0,99996159	19,19651	1724,063	58,147450
100,00	0,017655	1,000000	7,951988	96,01545	0,99996873	19,19713	1583,748	53,420670
150,00	0,026308	1,000000	7,976239	96,95779	0,99998582	19,19864	1140,121	38,461660
200,00	0,034847	1,000000	7,985767	97,35062	0,99999189	19,19920	901,877	30,421760
250,00	0,043274	1,000000	7,990483	97,55293	0,99999473	19,19947	751,786	25,355610
1000,00	0,157488	1,000000	7,999209	97,95651	0,99999960	19,19995	248,777	8,381352
10000,00	0,721415	1,000000	7,999961	97,99750	0,99999998	19,20000	68,889	2,317566

Eş.3.2 ve Eş.3.14 kullanılarak oluşturulan Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi, iki formülde de kullanılan z , Z , ve I değerlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle kütle durdurma gücü sonuçlarında farklılık görülmektedir.



Şekil 4.11. Eş.3.14 kullanılarak hesaplanan karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü



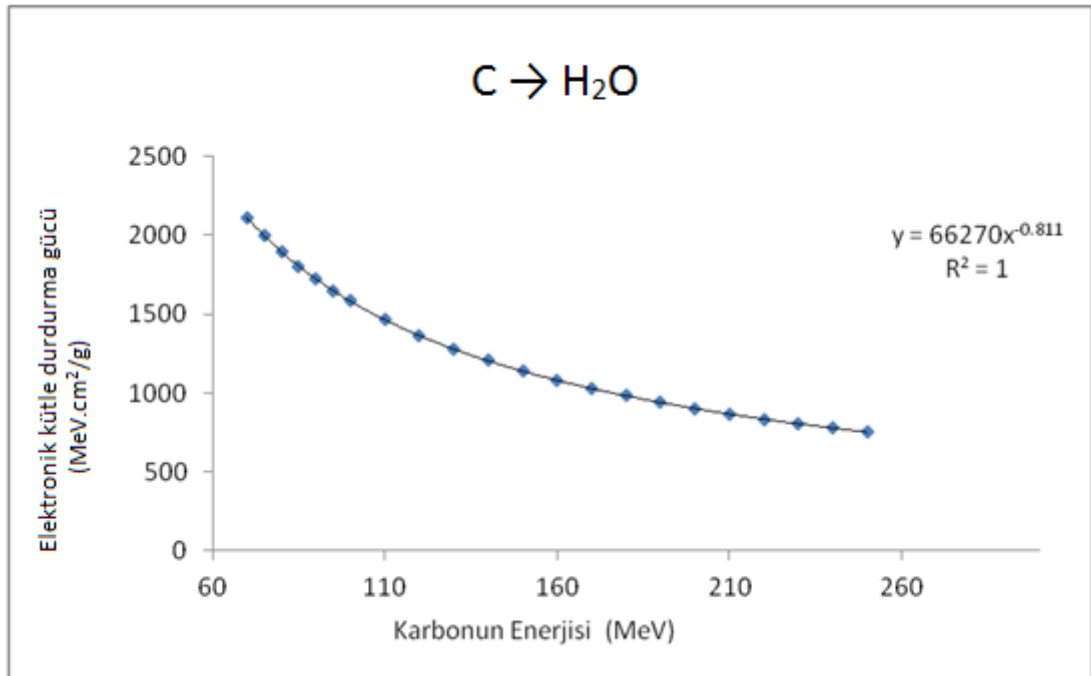
Şekil 4.12. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü hesaplamaları

Çizelge 4.7. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması

Enerji (MeV)	Tsoulfandis (MeV.cm ² /g)	Bu çalışma (MeV.cm ² /g)	SRIM 2011 (MeV.cm ² /g)	MSTAR (MeV.cm ² /g)
11E-04	-	0,01	178,40	581,81
0,01	-	1,17	564,10	1926,65
0,40	-	229,34	3422,00	(max) 8565,04
0,45	6201,61	257,44	3660,00	8369,77
1,00	25527,64	473,30	5839,00	6586,63
1,10	(max) 25674,32	496,86	6179,00	6363,64
1,20	25599,67	516,71	6504,00	6152,66
2,00	22634,20	584,43	8474,00	4888,52
2,25	21610,48	(max) 585,26	8866,00	4596,92
2,50	20650,07	580,98	9168,00	4337,52
3,75	16847,89	525,95	9754,00	3387,17
4,00	16254,84	512,84	(max) 9757,00	3244,86
5,00	14276,41	462,42	9599,00	2779,81
10,00	9117,32	302,72	8025,00	1639,72
25,00	4699,05	157,54	5137,00	782,68
50,00	2752,86	92,71	3311,00	448,23
100,00	1583,75	53,42	2016,00	262,61
200,00	901,88	30,42	1111,00	161,99
500,00	428,50	14,45	516,50	99,11
700,00	327,96	11,05	393,90	87,71
1000,00	248,78	8,38	297,80	80,01

Yukarıda Şekil.4.12 ve Çizelge.4.7’de, Eş.3.2 (Tsoulfanidis) ve Eş.3.14 (bu çalışma) ile hesaplanan kütle durdurma gücü değerleri SRIM 2011 ve MSTAR dan alınan değerlerle karşılaştırılmıştır. [SRIM,2011,MSTAR,2004].

Bu karşılaştırmalara göre, küçük enerji değerlerine Eş.3.14 , MSTAR ve SIRIM 2011 cevap verirken Tsoulfanidis’in eşitliği 0,45 MeV enerjisinden itibaren cevap vermektedir. Küçük enerjilere karşılık gelen kütle durdurma gücü ve maksimum kütle durdurma gücü değerlerine baktığımızda bu dört sonucunda birbirinden tamamen farklı olduğu görülmektedir. Fakat maksimum durdurma gücüne ulaştıkları enerjilerin birbirinden çok farklı olmadığı görülmektedir. Yüksek enerji değerlerine bakıldığında Tsoulfanidis ile SRIM 2011’in, Eş.3.14 ile MSTAR’ın kendi aralarında birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Hastanelerde kullanılan lineer hızlandırıcılarda, SIRIM verilerinin kullanılması sebebiyle, tedavi enerjilerinde Tsoulfanidis’in formülünün kullanılabileceği söylenebilir.[Physics data,2012].



Şekil 4.13. Karbon iyonu için suyun kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığı

70 MeV – 250 MeV enerji aralığında karbonun Eş. 3.2 kullanılarak sudaki durdurma gücü hesaplanmış ve Şekil.4.13'deki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik fit edilerek, karbonun sudaki kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığını veren

$$(1/\rho)S = 66270E^{-0,811} \quad (4.4)$$

ampirik ifadesi türetilmiştir. Bu ifade ile tedavi aralığındaki istenilen enerjideki bir karbonun sudaki durdurma gücü pratik bir şekilde hesaplanabilir.

Karbon iyonu için Al_2O_3 'ün kütle durdurma gücü hesabı:

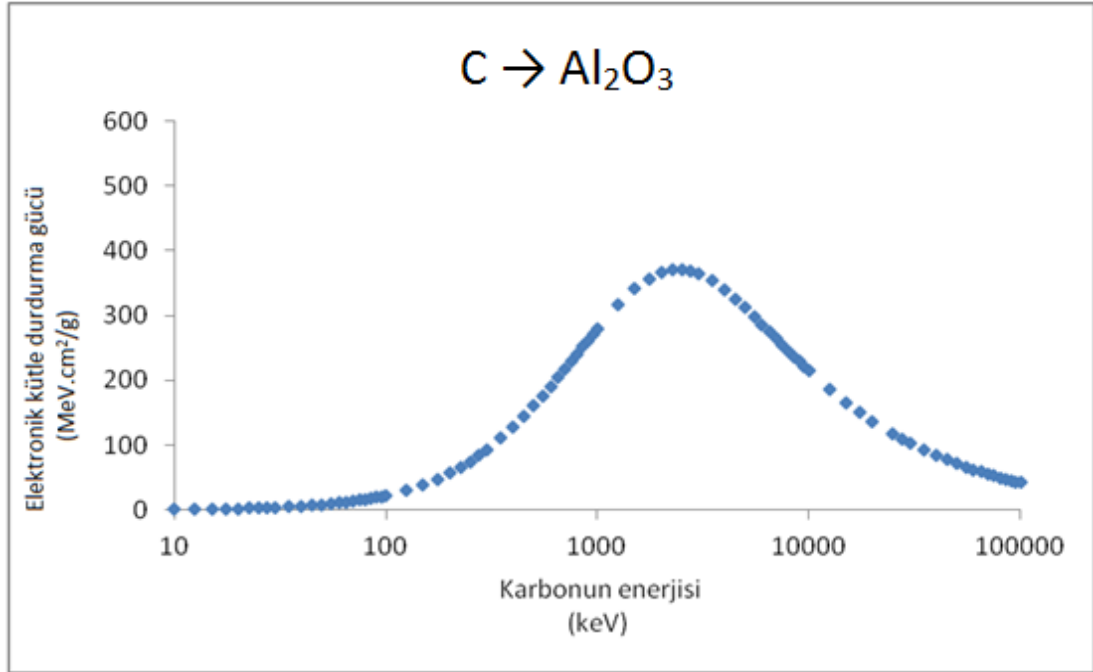
Eş.3.2 kullanılarak yapılan hesaplamada Çizelge.3.2'deki değerler kullanılarak Eş.3.3'den $A_{ort} = 21,81$ u ve Eş.3.4 den $Z_{ef} = 10,60$ olarak hesaplanmıştır, I değeri ise NIST programından 145,20 eV olarak alınmıştır.

Eş.3.14 kullanılarak yapılan hesaplamada Eş.3.10, Eş.3.15 ve Eş.3.8 kullanılarak sırasıyla; V, z^* ve b değerleri bulunmuştur. Daha sonra O ve Al un her biri için Eş.3.6 dan Z^* , Eş.3.7 den I^* değerleri hesaplanmış ve Eş.3.14'de yerlerine yazılarak bulunan kütle durdurma güçleri Çizelge 3.2'de bulunan yüzde ağırlıkları ile çarpılmış ve bulunan değerler toplanarak Al_2O_3 ün kütle durdurma gücü hesaplanmıştır. Eş.3.6'da ve Eş.3.7'de bulunan; a, x, α ve γ değerlerini bulmak için Çizelge 3.2, Eş.3.9, Eş.3.11, Eş.3.12 ve Eş.3.13'den yararlanılmıştır.

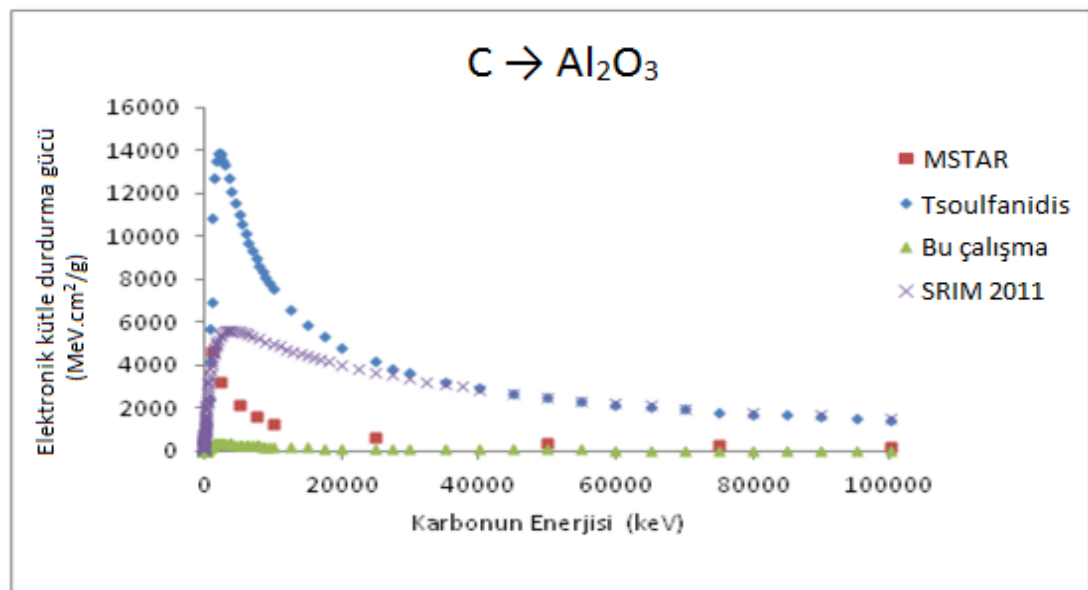
Çizelge 4.8 Karbon iyonu için alüminyumoksit (Al_2O_3)'in kütle durdurma gücü hesabı

T (MeV)	β^2	z^*	$Z^*(O)$	$I^*(O)$	$Z^*(H)$	$I^*(H)$	Tsulfanidis eşitliği ile hesaplanan kütle durdurma gücü ($MeVcm^2/g$)	z^*,Z^*,I^* kullanarak hesaplanan kütle durdurma gücü (MeV cm^2/g)
1E-03	1,789E-07	0,002172	0,074448	0,11453	0,079771	0,11414	-	0,014266
0,10	1,789E-05	0,122787	1,202945	4,43412	1,364158	4,59012	-	22,546350
0,75	0,0001342	0,544863	3,223108	18,46622	3,921983	20,24062	-	229,189955
0,80	0,0001431	0,565556	3,311578	19,25421	4,042159	21,16345	276,04044	240,781071
2,00	0,0003577	0,848037	4,672984	33,48469	6,001172	38,67499	13868,94895	366,134635
2,25	0,0004025	0,876595	4,855524	35,72684	6,282203	41,59182	13900,30723	370,229995
2,50	0,0004472	0,899531	5,018596	37,80586	6,537684	44,33874	13776,22882	370,728369
2,75	0,0004919	0,918018	5,165495	39,74291	6,771637	46,93618	13565,00406	368,636926
10,00	0,0017868	0,999623	6,900365	68,53681	9,930092	91,25718	7612,87024	214,674904
75,00	0,0132854	1,000000	7,922378	94,93292	12,653615	153,25006	1835,27050	52,466931
90,00	0,0159106	1,000000	7,942634	95,66692	12,735148	155,92671	1593,35300	45,570183
100,00	0,0176550	1,000000	7,951988	96,01545	12,774223	157,25358	1467,59206	41,979521
150,00	0,0263077	1,000000	7,976239	96,95779	12,881148	161,07617	1066,38983	30,504451
200,00	0,0348466	1,000000	7,985767	97,35062	12,926250	162,80637	848,46069	24,262401
250,00	0,0432736	1,000000	7,990483	97,55293	12,949544	163,74277	710,16620	20,300000
1000,00	0,1574877	1,000000	7,999209	97,95651	12,995464	165,75900	239,64639	6,830113
10000,00	0,7214146	1,000000	7,999961	97,99750	12,999771	165,98562	67,69184	1,922126

Eş.3.2 ve Eş.3.14 kullanılarak oluşturulan Çizelge 4.8'de görüldüğü gibi, iki formülde de kullanılan z , Z , ve I değerlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle kütle durdurma gücü sonuçlarında farklılık görülmektedir.



Şekil 4.14. Eş.3.14 kullanılarak hesaplanan karbon iyonu için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü



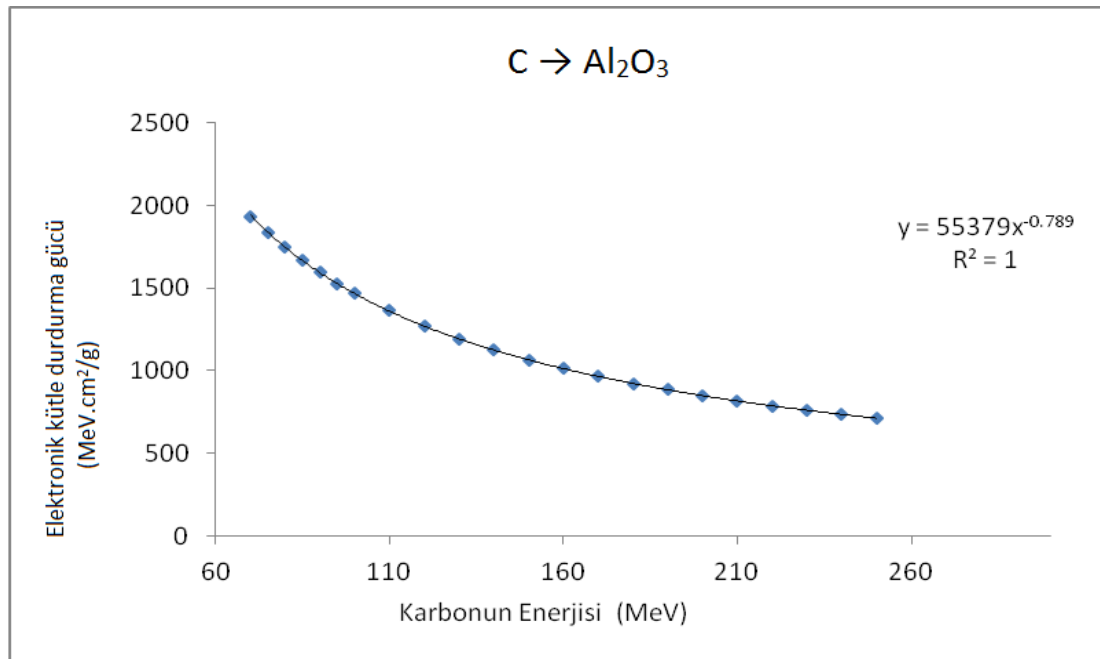
Şekil 4.15. Karbon iyonu için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü hesaplamaları

Çizelge 4.9. Karbon iyonu için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücü hesaplarının karşılaştırılması

Enerji (MeV)	Tsoulfandis (MeV.cm ² /g)	Bu çalışma (MeV.cm ² /g)	SRIM 2011 (MeV.cm ² /g)	MSTAR (MeV.cm ² /g)
1,1E-03	-	0,02	129,20	419,01
0,01	-	0,67	389,50	1349,29
0,70	5412,63	216,88	3371,00	(max) 5161,88
0,80	2760,40	240,78	3618,00	4982,74
2,00	1868,95	336,14	5215,00	3593,44
2,25	13900,95	370,23	5358,00	3395,85
2,50	(max) 13776,23	(max) 370,30	5465,00	3218,67
2,75	13565,00	368,64	5541,00	3058,52
3,50	12728,44	353,47	5649,00	2661,45
3,75	12432,75	346,88	(max) 5658,00	2551,03
4,00	12140,59	339,98	5658,00	2449,50
10,00	7612,87	214,68	5011,00	1273,78
25,00	4153,13	117,78	3695,00	620,94
50,00	2503,59	71,36	2522,00	359,73
100,00	1467,59	41,98	1542,00	212,64
200,00	848,46	24,26	873,60	132,08
500,00	409,28	11,68	416,80	81,36
700,00	314,59	8,97	319,20	71,98
1000,00	239,65	6,83	242,30	35,60

Yukarıda Şekil.4.15 ve Çizelge.4.9’da, Eş.3.2 (Tsoulfanidis) ve Eş.3.14 (bu çalışma) ile hesaplanan kütle durdurma gücü değerleri SRIM 2011 ve MSTAR dan alınan değerlerle karşılaştırılmıştır. [SRIM,2011, MSTAR,2004].

Bu karşılaştırmalara göre, küçük enerji değerlerine Eş.3.14 , MSTAR ve SIRIM 2011 cevap verirken Tsoulfanidis’in eşitliği 0,7 MeV enerjisinden itibaren cevap vermektedir. Küçük enerjilere karşılık gelen kütle durdurma gücü ve maksimum kütle durdurma gücü değerlerine baktığımızda bu dört sonucunda birbirinden tamamen farklı olduğu görülmektedir. Fakat maksimum durdurma gücüne ulaştıkları enerjilerin birbirinden çok farklı olmadığı görülmektedir. Yüksek enerji değerlerine bakıldığında Tsoulfanidis ile SRIM 2011’in, Eş.3.14 ile MSTAR’ın kendi aralarında birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16. Karbon iyonu için Al_2O_3 'in kütle durdurma gücünün enerjiye bağıllığı

70 MeV – 250 MeV enerji aralığında karbonun Eş. 3.2 kullanılarak Al_2O_3 'deki durdurma gücü hesaplanmış ve Şekil.4.16'daki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik fit edilerek, karbonun Al_2O_3 'deki kütle durdurma gücünün enerjiye bağıllığını veren

$$(1/\rho)S = 55379E^{-0,789} \quad (4.5)$$

ampirik ifadesi türetilmiştir. Bu ifade ile tedavi aralığındaki istenilen enerjideki bir karbonun Al_2O_3 'deki durdurma gücü pratik bir şekilde hesaplanabilir.

Karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücü hesabı:

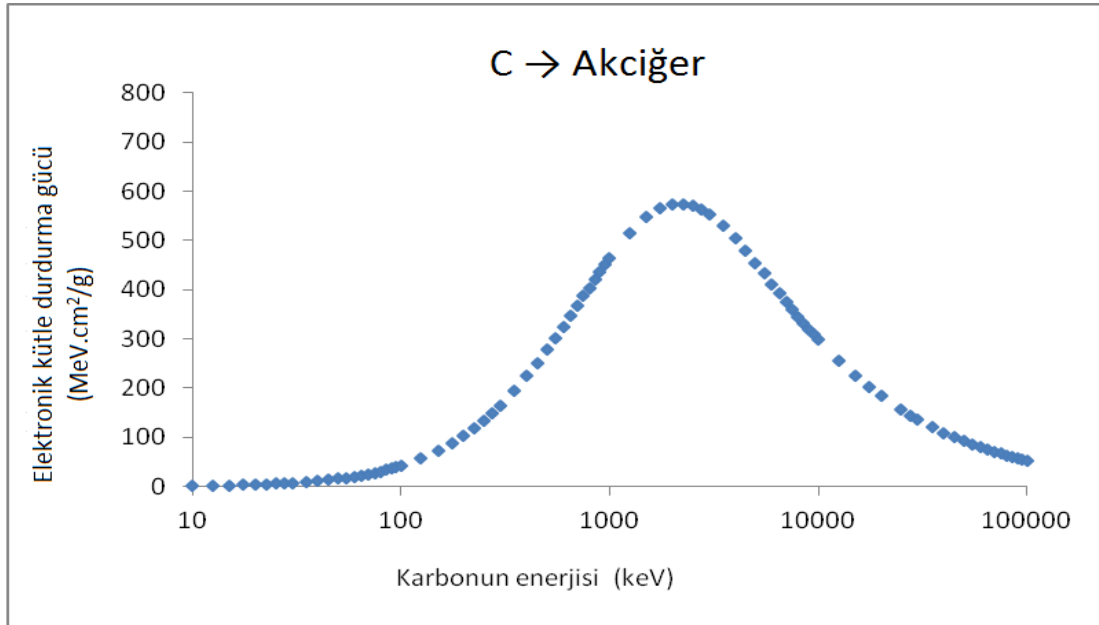
Eş.3.2 kullanılarak yapılan hesaplamada Çizelge.3.3'deki değerler kullanılarak Eş.3.3 den $A_{ort} = 14,20$ u ve Eş.3.4 den $Z_{ef} = 6,02$ olarak hesaplanmıştır, I değeri ise NIST programından 75,30 eV olarak alınmıştır

Eş.3.14 kullanılarak yapılan hesaplamada Eş.3.10, Eş.3.15 ve Eş.3.8 kullanılarak sırasıyla; V, Z^* ve b değerleri bulunmuştur. Daha sonra H, C, N, O, Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Fe ve Ze nin her biri için Eş.3.6 dan Z^* , Eş.3.7 den I^* değerleri hesaplanmış ve Eş.3.14'de yerlerine yazılarak bulunan kütle durdurma güçleri Çizelge 3.3'de bulunan yüzde ağırlıkları ile çarpılmış ve bulunan değerler toplanarak akciğerin kütle durdurma gücü hesaplanmıştır. Eş.3.6'da ve Eş.3,7'de bulunan; a, x, α ve γ değerlerini bulmak için Çizelge 3.3, Eş.3.9, Eş.3.11, Eş.3.12 ve Eş.3.13'den yararlanılmıştır.

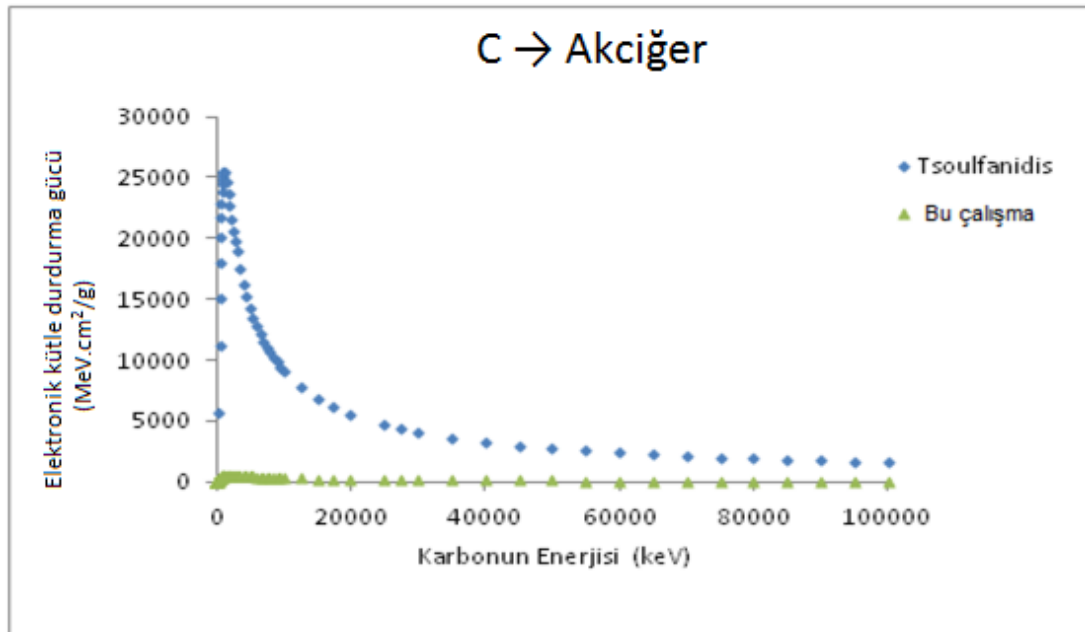
Çizelge 4.10. Karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücü hesabı

T (MeV)	β^2	z^*	$Z^*(C)$	$I^*(C)$	$Z^*(N)$	$I^*(N)$	Tsoufanidis eşitliği ile hesaplanan kütle durdurma gücü (MeVcm ² /g)	z^*,Z^*,I^* kullanarak hesaplanan kütle durdurma gücü (MeV cm ² /g)
1E-03	1,789E-07	0,002172	0,071344	0,12950	0,073003	0,12774	-	0,0110830
0,10	1,789E-05	0,122787	1,107539	4,87721	1,158632	4,88528	-	41,2727793
0,40	7,157E-05	0,362303	2,174606	12,98744	2,313412	13,19073	-	223,8535090
0,45	8,051E-05	0,393233	2,289431	14,04314	2,439948	14,28606	5646,265550	251,3652550
1,00	0,0001789	0,638256	3,147667	23,16916	3,401706	23,88993	25422,115200	463,3649410
1,25	0,0002236	0,710664	3,404535	26,36490	3,695700	27,31241	25453,563600	514,7461570
1,50	0,0002683	0,767440	3,616310	29,18090	3,940539	30,35531	24694,859100	547,0282540
2,00	0,0003577	0,848037	3,949135	33,96876	4,330314	35,59053	22644,101400	573,5268480
2,25	0,0004025	0,876595	4,083379	36,03638	4,489435	37,87672	21628,752300	574,5485180
2,50	0,0004472	0,899531	4,201782	37,93061	4,630779	39,98537	20674,135700	570,5308380
10,00	0,0017868	0,999623	5,442819	63,14777	6,192388	69,72808	9148,422710	298,1459530
75,00	0,0132854	1,000000	5,969682	79,59782	6,949610	92,24231	2004,657950	66,3580747
90,00	0,0159106	1,000000	5,977936	79,95176	6,963041	92,79723	1732,003370	57,3507751
100,00	0,0176550	1,000000	5,981683	80,11653	6,969192	93,05817	1591,093790	52,6917433
150,00	0,0263077	1,000000	5,991170	80,54978	6,984951	93,75402	1145,541250	37,9455957
200,00	0,0348466	1,000000	5,994786	80,72412	6,991050	94,03905	906,231031	30,0189700
250,00	0,0432736	1,000000	5,996545	80,81208	6,994043	94,18434	755,453608	25,0237237
1000,00	0,1574877	1,000000	5,999721	80,98238	6,999512	94,46986	250,052849	8,2840713
10000,00	0,7214146	1,000000	5,999986	80,99900	6,999976	94,49828	69,259799	2,3049721

Eş.3.2 ve Eş.3.14 kullanılarak oluşturulan Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi, iki formülde de kullanılan z , Z , ve I değerlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle kütle durdurma gücü sonuçlarında farklılık görülmektedir.



Şekil 4.17. Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanan karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücü

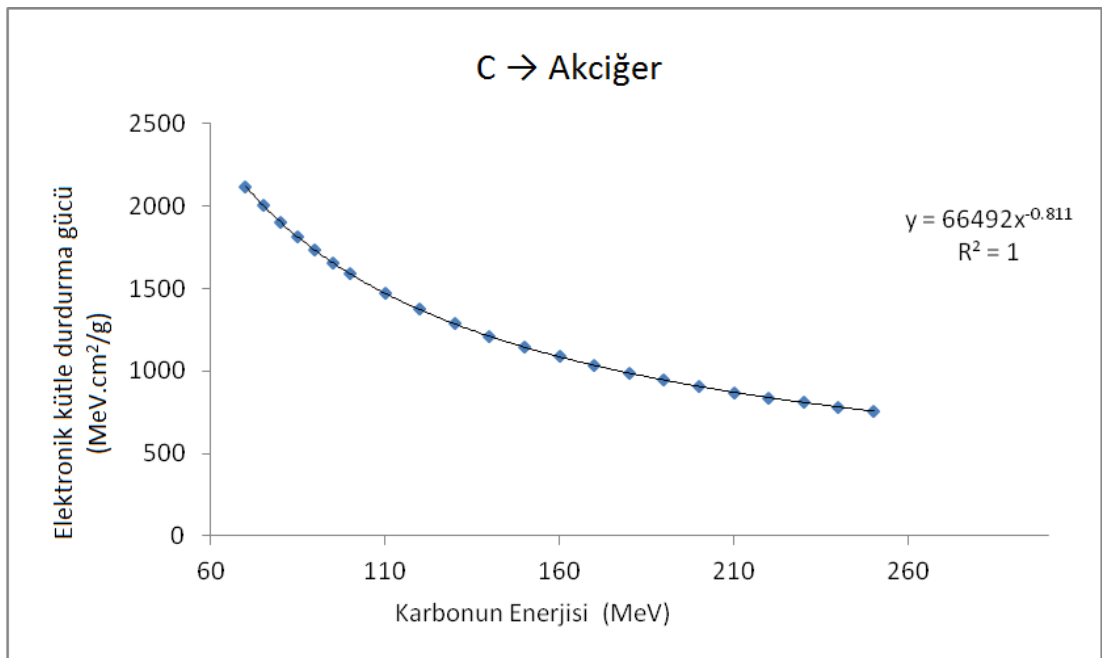


Şekil 4.18. Karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücü hesaplamaları

Yukarıda Şekil.4.18 ve Çizelge.4.10'de, Eş.3.2 (Tsoulfanidis) ve Eş.3.14 (bu çalışma) ile hesaplanan kütle durdurma gücü değerleri karşılaştırılmıştır.

Bu karşılaştırmalara göre, küçük enerji değerlerine Eş.3.14 ile yapılan hesaplamalar cevap verirken Tsoulfanidis'in eşitliği ile 0,45 MeV enerjiden den sonra değerler alabiliyoruz. Küçük enerjilere karşılık gelen kütle durdurma gücü ve maksimum kütle durdurma gücü değerlerine baktığımızda bu iki sonucun birbirinden tamamen farklı olduğu görülmektedir. Fakat maksimum durdurma gücüne ulaştıkları enerjilerin birbirinden çok farklı olmadığı görülmektedir. Yüksek enerji değerlerinde ise kütle durdurma güçlerinin birbirine yaklaştığı söylenebilir.

Ayrıca su ve akciğer için bulunan sonuçların birbirinden çok farklı olmadığını söyleyebiliriz. Bu sonuç suyun yaklaşık doku eşdeğeri olarak kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.19. Karbon iyonu için akciğerin kütle durdurma gücünün enerjiye bağılılığı

70 MeV – 250 MeV enerji aralığında karbonun Eş 3.2 kullanılarak akciğerdeki durdurma gücü hesaplanmış ve Şekil 4.19'daki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik fit edilerek, karbonun akciğerdeki kütle durdurma gücünün enerjiye bağlılığını veren

$$(1/\rho)S = 66492E^{-0,811} \quad (4.6)$$

ampirik ifadesi türetilmiştir. Bu ifade ile tedavi aralığındaki istenilen enerjideki bir karbonun akciğerdeki durdurma gücü pratik bir şekilde hesaplanabilir.

Genel olarak proton ve karbon için kütle durdurma gücü sonuçlarına bakıldığında, benzer enerji değerlerinde karbonun durdurma gücünün protona kıyasla çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bu sonuç karbonun LET'inin protona kıyasla daha büyük olduğunun bir göstergesidir [Jäkel,2009]. Ayrıca bu sonuca birlikte, farklı hedef materyallerde farklı durdurma gücü sonuçları elde etmemiz, durdurma gücünün gönderilen parçacığın cinsine ve enerjisine hedefin ise cinsine bağlı olduğunu doğrulamış olmaktadır.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Proton ve ağır iyon tedavisi yüksek enerjili parçacıklarla yapılmaktadır. Parçacıkların enerjileri, hedef hacminin derinliği, hedef için gereken doz miktarı ve çevre organların klinik olarak kabul edilen doz miktarı ile belirlenir. Yanlış enerji seçimi hedefin bir kısmının alan dışında kalmasına ve çevre dokuların zarar görmesine neden olabilir. Protonların ve ağır iyonların sahip oldukları Bragg piki sebebiyle tedavi için doğru enerji seçimi çok daha önemlidir ve durdurma gücü hesabının doğru yapılması gerekmektedir.

Protonların ve karbon iyonu için su, TLD-500 ve akciğer hedeflerinin durdurma gücü iki farklı yöntemle hesaplanmış ve durdurma gücünün, gelen parçacığın cinsine ve enerjisine, hedefin yoğunluğuna ve cinsine bağlı olduğu gözlenmiştir.

Tablo ve grafiklerden de görüldüğü gibi protonlar için suyun ve akciğerin durdurma gücü yaklaşık 0.95 MeV e kadar, TLD-500'in yaklaşık 0,175 MeV e kadar enerji arttıkça artmaktadır ve maksimum değere ulaştıktan sonra enerji arttıkça azalmaktadır. Benzer şekilde karbon iyonları için suyun ve akciğerin durdurma gücü yaklaşık 1,1 MeV e kadar, TLD-500'in yaklaşık 2,5 MeV e kadar enerji arttıkça artmaktadır ve maksimum değere ulaştıktan sonra enerji arttıkça azalmaktadır.

Bu çalışmada proton için elde edilen sonuçlar NIST PSTAR Data Base, SRIM 2011 ve daha önce benzer çalışmaları yapmış olan diğer araştırmacıların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Eş.3.14 ile yapılan hesaplamalar tedavide kullanılan enerji aralığı olan 75-250 MeV de SRIM 2011 ile uyum içerisinde olduğundan dolayı bu eşitlikten elde edilen sonuçlarla, durdurma gücü-enerji ilişkisini veren ampirik ifade türetilmiştir. Benzer şekilde karbon için elde edilen sonuçlar MSTAR, SRIM 2011 ve daha önce benzer çalışmaları yapmış olan diğer araştırmacıların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Eş.3.2 ile yapılan hesaplamalar tedavide kullanılan enerji aralığı olan 75-250 MeV'de SRIM 2011 ile uyum içerisinde olduğundan dolayı bu eşitlikten elde edilen sonuçlarla durdurma gücü-enerji ilişkisini veren ampirik ifade türetilmiştir. Elde edilen bu ifadeler medikal alanda kullanım pratikliği sağlayabilir.

Ayrıca bu çalışmada NIST PSTAR verilerini kullanarak 250 MeV enerjisindeki protonun sudaki Bragg piki, dE/dx integralini çözmeden yaklaşım kullanarak oluşturulmuştur. Ancak sonucun integral çözümünden elde edilen sonuçla çok tutarlı olmaması sebebiyle, yaklaşım metodunun kullanılmasının uygun olmayacağını söylenebilir.

Sonuç olarak bu çalışmada elde edilen durdurma gücü hesaplarından medikal fizik alanında hayati öneme sahip doz hesaplamalarında faydalanılabilir.

KAYNAKLAR

Akkerman, A., “Calculation of proton stopping power in the region of its maximum value for several organic materials and Water”, *Radiat.Phys. Chem.*, 61,333-335 (2001).

Arya, A.P., “Fundamentals of nuclear physics” , Çeviri Editörü/Editörleri,Şahin Y, “*Allyn and Bacon*”, Michigan Universty, 183-246 (1999).

Beebe-Wang,J.J,Dilmanian,F.A.,Peggs,G.S., “Feasibility of positron emission tomography of dose distribution in proton-beam cancer therapy”, *Brookhaven National Laboratory*, NY , 11973 (2002).

Bevelacqua, J.J., “Systematics of Heavy Ion Radiotherapy”, *Bevelacqua Resources*, WA 99352 (343):5-6 (2005).

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

Brown, A., Suit, H., “The centenary of the discovery of the Bragg Peak”, *Radiother. oncol.*,73(3):265-8 (2004)

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

Chen, R., Mckeever, S.W.S., “Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena”, *World Scientific Publishing*, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, 283-292, 297-298(1997).

Çelebi, G., “Biyofizik”, *Çaglayan Kitabevi*, İstanbul, 426(1989).

Dingfelter, M., “İnelastic-collision cross section of liquid water for interaction of energetic protons ”, *Radiat.Phys. Chem.*,59,255-275 (2000).

Dirican, B., *1.Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi TAEK*, Ankara, (2001).

Durante, M, Loeffler,J.S., “Charged particles in radiation oncology” *Nut. Rev. Clin. Oncol.*,7(1):37-43.(2010).

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

ICRU Report 37, “International Commission on Radiation Units and Measurements”,*ICRU*, Bethesda, MD, (1984).

İnternet: NIST Physics Laboratory home page, “Estar, 2003: Stopping Power and Range Tables for Electron”
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (2009).

İnternet: NIST PSTAR “Stopping Power and Range Tables for Protons in Various Materials”, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html> (2009).

İnternet: Oncolink, Vachani, C., “Proton Therapy: The Basics”, Sinohara, E., “Module 1: An Introduction to Proton Therapy”, *The Abramson Cancer Center of the University of Pennsylvania*
<http://www.oncolink.org/treatment/article.cfm?id=433&s=70&c=9> (2009).

Jäkel, O., “Ion beam Science solved and unsolved problems,1 ” Sigmund P., *Invited lectures presented at a symposium arranged by the Royal Danish Academy of Sciences and Letters*, Copenhagen, 37-57 (2006).

Jäkel, O., “Radiotherapy with protons and ion beams”, *AIP conf. proc.*, 1231(1):3-40 (2009).

Kelada, O. J., “The potential advantages and disadvantages of cancer therapy using charged particles compared with megavoltage x-rays” *Particle Therapy Cancer Research Institute*, Volume 20-Issue 7:555–563 (2008).

Ketenci, F.S., “Lineer hızlandırıcıda X-ışınları kullanılarak doku eşdeğeri hedeflerin doz kalınlık ilişkisinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 33-65, (2011).

Kitagawa, A., “Review on heavy ion radiotherapy and related ion sources”, *AIP review of scientific instrument*, volume 81 (02B909): 1-8 (2010).

Kitagawa, A., “Review on heavy ion radiotherapy facilities and related ion sources”, *National Institute of Sciences*, 14 (2010).

Kraft, G., “Tumor Therapy with Heavy Charged Particles”, *Progress in Particle and Nuclear Physics* 45, S473 (2000).

Krane, K.S., “Nükleer Fizik 1”, Şarer B., *Palme Yayıncılık*, Ankara, 192-201 (2001).

Kumaş, A., “Radyasyon Fiziği ve Tıbbi Uygulamaları”, 1.basım, Ankara, 50-51 (2006).

Larsen, N.A., “Dosimetry Based on Thermally and Optically Stimulated Luminescence”, *Risø National Laboratory*, Roskilde, Denmark, 89-91(1999).

Lauger, A., “Radiation Technics at Canser”, Uzal, C., *Öncü Limited Yayınevi*, Ankara, 1,31,38,42 (1995).

Lomax, A.J., “Charged Particle therapy The Physics of interaction”, *Cancer j*, 15(4):285-91 (2009)

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

Physics Data Sample Index: “Specific Stopping Power Ratios”, *Ataturk Göğüs Hastalıkları ve Göğüs Cerrahisi Eğitim ve Araştırma Hastanesi Radyoterapi, PET-BT ve Nükleer Tıp Ünitesi XIÖ Tedavi Planlama Bilgisayarı*, (2012)

Rohrlich, F., Carlson, B.C., “Positron–electron differences in energy loss and multiple scattering”, *Phys. Rev.*, 93: 38–44 (1954).

Schinder, A and Paull, H., “calculates electronic stopping powers for heavy ions” , **Program-MSTAR VERSION 3.12** (2004)

Sugiyama, H., “Stopping power formula for intermediate energy electrons” *Phys. Med. Biol.*, 30 (4): 331–335 (1985).

Sugiyama, H., “ Z_1^3 and Z_1^2 corrections to the electronic stopping formula”, *Radiat. Effects*, 81, 57-70 (1984).

Summers, G.P., Thermoluminescence In Single Crystal α -Al₂O₃. Radiation Protection Dosimetry, *Nuclear Technology Publishing*, 8: 69-80(1984).

Syed, N.A., “Physics and Engineering of Radiation Detection, first edition”, *academic press is an imprint of Elsevier ,USA*,105-111 (2007).

Tan, Z.Y., Xia, Y. Y., Zhao, M.W., Liu, X.D., Zhang, L.M., “Electronic stopping power for 0.05-10 MeV protons in a group of organic materials”, *Chin. Phys. Lett.*, 25(6): 2023, (2008).

Tsoufanidis, N., “Measurement and Dedection of Radiation”, *Hemisphere Publishing Corporation*, Washington New York London, 118-126, (1983).

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

Tufan, M.Ç.,Köroğlu,A.,Gümüş,H., “A study on the calculation of stopping power and CSDA Range for incident positrons”, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 412,308-314 (2011).

Ziegler, J.F, “The stopping and range of ions in matter”, *SRIM version*, SRIM-2011.08 (2011).

Weber, U.,Kratt,G., “Comparision of carbon ions versus protons”, *Cancer J*,15(4):325-32 (2009).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : DİLEK, Rıza
Uyruğu : T. C.
Doğum tarihi ve yeri : 28.05.1985, Kızılcahamam
Medeni Hali : Bekâr
Telefon : 0 (539) 6091111
E-posta : rdilek.physics@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik Anabilimdalı	-
Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü	2007
Lise	Ankara Fatih Sultan Mehmet Lisesi	2005

Yabancı Dil

İngilizce

Deneyimler

Yıl	Yer	Görev
2010-2011	Geçiş Dergisi Dersaneleri	Öğretmen
2011-2012	Ataturk Göğüs Hastalıkları ve Göğüs Cerrahisi Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Radyoterapi Ünitesi	Stajyer

Hobiler

Futbol, otomobil.