

**TIPTA KULLANILAN BETA RADYOAKTİF KAYNAKLARDAN
YAYINLANAN BREMSSTRAHLUNG'UN (FRENLEME IŞINI)
İNCELENMESİ**

Metin KÖMSÖKEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012
ANKARA**

Metin KÖMSÖKEN tarafından hazırlanan “TIPTA KULLANILAN BETA RADYOAKTİF KAYNAKLARDAN YAYINLANAN BREMSSTRAHLUNG' UN (FRENLEME IŞINI) İNCELENMESİ” 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.

Doç. Dr. Niyazi MERİÇ

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. A. Güneş TANIR

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Şeref OKUDUCU

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 08/06/2012

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.

Metin KÖMSÖKEN

**TIPTA KULLANILAN BETA RADYOAKTİF KAYNAKLARDAN
YAYINLANAN BREMSSTRAHLUNG'UN (FRENLEME IŞINI)
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Metin KÖMSÖKEN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2012**

ÖZET

Tıpta yüksek enerjili yüklü parçacıkların tanı ve tedavi için kullanılmaları yaygınlaşmaktadır. Yüklü parçacıkların dokularla etkileşimleri sonucu ortaya çıkan Bremsstrahlung' un ihmal edilmemesi gerektiği son yıllarda yapılan çalışmaların ana temalarından biridir. Bu çalışmada radyoterapide kullanılan lineer hızlandırıcıdan (LINAC) elde edilen elektron enerjileri ve pozitron emisyon tomografide (PET) kullanılan β^+ kaynaklarının enerji değerlerinde akciğer, beyin, deri, kas, kemik (kortikal) ve su hedefleri için nükleer durdurma gücü (Bremsstrahlung) hesaplanmıştır. Hesaplamalar Tsoulfanidis (1995), Bethe Bloch (1930) eşitliği modifiye edilerek yapılmıştır ve sonuçlar klasik Bethe Bloch ve klasik Tsoulfanidis eşitliği kullanılarak National Institute of Standards and Technology (NIST-ESTAR)'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 202.1.108
Anahtar Kelimeler : β yayınlayan kaynaklar, bremsstrahlung, radyofarmasitler
Sayfa Adedi : 92
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. A. Güneş TANIR

**INVESTIGATION OF BREMSSTRAHLUNG (BRAKING RADIATION)
FROM BETA-EMITTING RADIATIVE SOURCES USED IN MEDICAL
FIELDS**

(M.Sc. Thesis)

Metin KÖMSÖKEN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2012

ABSTRACT

Usage of high energy charged particles for diagnosis and treatment has been widespread in medicine. The main purpose is to investigate that Bremsstrahlung which occurs by tissue interactions with charged particles should not be neglected. Nuclear stopping power (Bremsstrahlung) was calculated for lung, brain, skin, muscle, bone (cortical) and water targets for the energies of electrons obtained from LINAC used in radiotherapy and of β^+ sources used in positron emission tomography (PET). These calculations were done by using the four different analytical functions including classical Bethe Bloch, Tsoulfanidis, modified Bethe Bloch and modified Tsoulfanidis equations. The results were compared with that of National Institute of Standards and Technology (NIST-ESTAR).

Science Code	: 202.1.108
Key Words	: β - emitting source, bremsstrahlung, therapeutic radionuclides
Page Number	: 92
Adviser	: Prof. Dr. A. Güneş TANIR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. A. Güneş TANIR' a ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Hocam Doç. Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR'e ayrıca Fizik Mühendisi Mustafa TUNÇ hocama ve T.C. Sağlık Bakanlığı Atatürk Göğüs Hastalıkları ve Göğüs Cerrahisi Eğitim ve Araştırma Hastanesi görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Hüseyin KÖMSÖKEN'e, annem Canan KÖMSÖKEN'e, ağabeyim Murat KÖMSÖKEN'e sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
2.TEMEL BİLGİLER.....	4
2.1.Elektronun Hedefle Etkileşmesi.....	4
2.2.1. Yumuşak Çarpışma ($b \gg a$).....	5
2.2.2. Sert Çarpışma ($b \approx a$).....	6
2.2.3 Coulomb Kuvveti ile Dış Nükleer Alan Etkileşimleri($b < a$).....	6
2.3. Frenleme Işınımı (Bremsstrahlung).....	7
2.4. Beta Bozunumu.....	8
2.5. PET Görüntülemeye Kullanılan Radyoizotoplar.....	9
2.6. Durdurma Gücü.....	11
2.6.1.Durdurma Gücü Teorisi.....	13
3.HESAPLAMALAR.....	19
3.1. Ortalama Atomik Kütle ve Etkin Atom Numarasının Hesaplanması.....	19
3.2. Modifiye Atom Numarasının Hesaplanması.....	20
3.3. Modifiye Uyarma Enerjisi (I^*)' ın Hesaplanması	22
3.4. Gönderilen Parçacığın Modifiye Atom Numarasının Hesaplanması	23

Sayfa

3.5. Klasik Bethe-Bloch İle Bremsstrahlung' un Hesaplanması.....	23
3.6. Modifiye Bethe- Bloch ile Bremsstrahlung'un Hesaplanması.....	20
3.7.Klasik Tsoulfanidis ile Bremsstrahlung'un Hesaplanması.....	25
3.8. Modifiye Tsoulfanidis ile Bremsstrahlung'un Hesaplanması.....	27
4. SONUÇLAR.....	29
5. TARTIŞMA.....	88
6. KAYNAKLAR.....	89
7. ÖZGEÇMİŞ.....	92

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. PET’te kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan pozitron yayınlayan radyoizotopların özellikleri	10
Çizelge 4.1. Nükleer durdurma gücü hesaplamaları için hedefin ortalama atom kütlesi (A_{ort}), etkin atom numarası (Z_{eff}), yoğunluk (ρ) değerleri..	29
Çizelge 4.2. Hedef Olarak Kullanılan Suyun İçerik ve Özellikleri.....	31
Çizelge 4.3.Su için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	32
Çizelge 4.4.Su için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	33
Çizelge 4.5. Su için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	34
Çizelge 4.6. Su için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	35
Çizelge 4.7. Su için, Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	36
Çizelge.4.8.Su için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	37
Çizelge 4.9.Su için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	38
Çizelge 4.10. Akciğerin İçerik ve Özellikleri.....	40
Çizelge 4.11. Akciğer için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	41
Çizelge 4.12. Akciğer için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	42
Çizelge 4.13. Akciğer için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	43

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.14. Akciğer için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	44
Çizelge 4.15. Akciğer için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	45
Çizelge 4.16. Akciğer için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişim.....	46
Çizelge 4.17. Akciğer için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	47
Çizelge 4.18. Beyin İçerik ve Özellikleri.....	49
Çizelge 4.19. Beyin için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	50
Çizelge 4.20. Beyin için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	51
Çizelge 4.21. Beyin için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	52
Çizelge.4.22. Beyin için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	53
Çizelge 4.23. Beyin için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	54
Çizelge 4.24. Beyin için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	55
Çizelge 4.25. Beyin için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	56
Çizelge 4.26. Deri içeriği ve özellikleri.....	58
Çizelge 4.27. Deri için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	59
Çizelge 4.28. Deri için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	60

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.29. Deri için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	61
Çizelge 4.30. Deri için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	62
Çizelge.4.31. Deri için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	63
Çizelge 4.32. Deri için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	64
Çizelge 4.33. Deri için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	65
Çizelge 4.34. Kas İçeriği ve Özellikleri.....	67
Çizelge 4.35. Kas için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	68
Çizelge 4.36. Kas için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	69
Çizelge 4.37. Kas için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	70
Çizelge 4.38. Kas için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	71
Çizelge 4.39. Kas için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	72
Çizelge 4.40. Kas için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	73
Çizelge 4.41. Kas için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	74
Çizelge 4.42. Kortikal kemiğin içeriği ve özelliği.....	76
Çizelge 4.43. Kortikal Kemik için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	77

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.44. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.	78
Çizelge 4.45. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	79
Çizelge 4.46. Kortikal Kemik için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları.....	80
Çizelge 4.47. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	81
Çizelge 4.48. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi.....	82
Çizelge 4.49. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı.....	83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yüklü parçacığın coulomb etkileşimi.....	5
Şekil 2.2. Frenleme olayı.....	8
Şekil 2.3. Bir alfa parçacığının bir atomun elektronuyla etkileşmesi.....	13
Şekil 2.4. dx boyuna, db kalınlığına ve b yarıçapına sahip silindir.....	15
Şekil 4.1. Su için nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği	39
Şekil 4.2. Akciğer için nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine Bağlı değişim grafiği.....	48
Şekil 4.3. Beyin için nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği.....	57
Şekil 4.4. Deri için nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği.....	66
Şekil 4.5. Kas için nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği.....	75
Şekil 4.6. Kortikal kemik için nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği.....	84
Şekil 4.7. Su, Beyin, Deri, Kas, Kortikal Kemik, Akciğer için Modifiye Tsoulfanidis'ten elde edilen nükleer durdurma gücü'nün enerjiye bağlı değişimi.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
C	Karbon
F	Flor
O	Oksijen
Cu	Bakır
I	İyot
K	Potasyum
Ti	Talyum
Co	Kobalt
Ga	Galyum
Cd	Kadmiyum
Ge	Germanyum
Tc	Teksenyum
In	İndiyum
Pd	Palladyum
Re	Renyum

Simgeler	Açıklama
Se	Selenyum
Br	Brom
Rb	Rubidyum
Kr	Krom
Na	Sodyum
Mg	Magnezyum
H	Hidrojen
P	Fosfor
S	Kükürt
Cl	Klor
Ca	Kalsiyum
Fe	Demir
Zn	Çinko
r_0	Elektronun yarıçapı
Mc^2	Pozitronun durgun kütle enerjisi
Z	Materyalin atom numarası
N	Materyalin m^3 ü başına atom sayısı
A	Materyalin atom ağırlığı
E	Elektron
e^+	Pozitron

Simgeler	Açıklama
S_e	Elektronların durdurma gücü
γ	Nötrino
Q	Enerji
β	Beta
β^+	Pozitif beta
β^-	Negatif beta
eV	Elektron volt
keV	Kiloelektron volt
MeV	Megaelektron volt
TeV	Teraelektron volt
$T_{1/2}$	Yarı ömür
$\langle I \rangle$	Ortalama uyarma enerjisi
W_i	Elementin ağırlık yüzdesi
PET	Pozitron emisyon tomografi
LET	Lineer enerji transferi
ICRU	Uluslar arası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu

1. GİRİŞ

Radyoaktif materyallerden yüklü parçacıkların yayınlanmasının keşfi olan 1896 yılından sonra, bunların hedef içinde nasıl ilerlediği konusundaki çalışmalar da başlamış ve bugün de devam etmektedir. Yüklü parçacıkların hedef içinde ilerlerken birim uzunlukta kaybettikleri enerjiye durdurma gücü denir ve hedef tarafından soğurulan dozun bir ölçüsüdür. Durdurma gücü teorisi atom ve nükleer fiziğin gelişmesinde çok önemli rol oynamıştır. Hans Geiger, Ernest Marsden ve Ernest Rutherford'un 1908' de alfa parçacıklarının hedef ile etkileşmesini inceledikleri deney, fiziğe çekirdek yapısı hakkında çok önemli bilgiler sunmuştur. Klasik durdurma gücü teorisi 1913' te Niels Bohr tarafından geliştirilmiş ancak kuantum mekaniksel ve rölativistik teorisi 1930' da Hans Bethe ve 1960' ta Ugo Fono tarafından geliştirilmiştir. O günlerden bu günlere çeşitli düzeltme faktörleri, daha doğru teorik durdurma gücü ifadesini elde edebilmek için denenmektedir, ancak esas temel hala geçerliliğini sürdürmektedir.

Yüklü parçacıklar ortamda ilerlerken hedef atomlarının yörüngesel elektronları ve çekirdeği ile coulomb etkileşmesi yaparlar. Bu etkileşmeler, klasik etki parametresinin "b" büyüklüğüne bağlı olarak üç temel kategoride incelenirler (Podgorsak, 2006):

1. Yüklü parçacığın, hedef atomun dış nükleer alanıyla yaptığı Coulomb etkileşmesi, "a" hedef atomun yarıçapı olmak üzere $b < a$ durumunda *bremssstrahlung üretimi* ile;
2. Yüklü parçacığın, hedef atomun yörüngesel elektronları ile yaptığı Coulomb etkileşmesi, $b \approx a$ durumunda *sert çarpışma*;
3. Yüklü parçacığın, hedef atomun yörüngesel elektronları ile yaptığı Coulomb etkileşmesi, $b \geq a$ durumunda, *yumuşak çarpışma*;

“Bremmsstrahlung” almanca kelime olup “kırılan” veya “ivmelenen” ışın demektir ve yukarıda da açıklandığı gibi yüklü parçacığın hedef içinde birim uzunlukta radyasyonla kaybettiği enerji sonucu yayınlanan düşük enerjili fotonlardır. Kısaca

radyasyonla kaybedilen enerji, x-ışınları şeklinde (bremsstrahlung) yayınlanır. Radyasyonla enerji kaybı yüksek enerjilerde ($>1\text{MeV}$) önem kazanır. Yüklü parçacığın iyonizasyonla kaybettiği enerjinin radyasyonla kaybettiği enerjiye eşit olduğu enerji değerine kritik enerji (E_c) denir ve Berger ve Seltzer (1964) tarafından, $E_c = (800\text{MeV}) / (Z+1.2)$ ifadesi ile verilir.

Bilindiği gibi nükleer fiziğin en önemli uygulama alanlarından birisi tıptır. Yüklü parçacıkların tedavide kullanıldığı alanlar radyasyon onkolojisi ve nükleer tıptır. Radyasyon onkolojisinde lineer hızlandırıcılardan elde edilen yüksek enerjili ($>1\text{MeV}$) elektronların yanı sıra kullanılan x-ışınlarının biyolojik hedefle etkileşmesi sonucu ortaya çıkan elektronların da olduğu düşünülürse daima bremsstrahlung' un olduğu göz ardı edilemez. Yüksek enerjili ($>1\text{ MeV}$) β^- ışınlarıyla β tedavi nükleer tıpta giderek artan bir ilgi olmuştur [Manjunatha ve ark., 2009]. Nükleer tıp'ın son yıllarda en çok kullandığı görüntüleme tekniği olan Pozitron Emisyon Tomografi (PET) pozitif elektron demek olan pozitronları ve tedavi amaçlı olarak da pek çok farklı beta kaynaklarını kullanmaktadır. Bu kaynaklardan yayınlanan yüklü parçacıkların biyolojik dokularla etkileşmeleri sonucu ortaya çıkan bremsstrahlung' un şiddeti ve hedef içinde durdurulmalarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Tıptaki uygulamalarda genellikle ihmal edilen bu etkinin günümüzde, ihmal edilmemesi gerektiği pek çok çalışmanın ana fikridir.

Bu çalışmamızda, hafif yüklü parçacıklar olan elektronların / pozitronların insan vücudunun % 80' inin sudan oluşması nedeniyle, öncelikle sudaki nükleer durdurma gücü (SP_r) hesaplanmıştır. Biyolojik hedef olarak akciğer, beyin, deri, kortikal kemik ve kas ele alınmıştır. Nükleer durdurma gücü hesapları, Bethe-Bloch (Bethe, 1930) tarafından önerilen ve üzerinde bazı modifikasyonlar yapılarak farklı araştırmacılar (Gümüş, 2008; Rohlick, 1956) tarafından önerilmiş analitik ifadeler kullanılarak hesaplanmış ve kıyaslanmıştır.

Klasik Bethe Bloch olarak adlandırılan hesaplamalar, Bethe-Bloch (Bethe, 1930) ifadesi kullanılarak ve Modifiye Bethe Bloch olarak adlandırılan hesaplamalar, aynı ifadede modifiye edilmiş Z^* , z^* terimi yerleştirilerek yapılmış, sonuçlar

karşılaştırılmıştır. Klasik Tsoulfanidis olarak adlandırılan hesaplamalar, Tsoulfanidis (Tsoulfanidis, 1995) ifadesi kullanılarak ve Modifiye Tsoulfanidis olarak adlandırılan hesaplamalar, aynı ifadede modifiye edilmiş I^* , Z^* , z^* terimi yerleştirilerek yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın GİRİŞ bölümünü, konu ile ilgili verilen TEMEL BİLGİLER takip etmektedir. 3. Bölümde HESAPLAMALAR, 4. Bölümde SONUÇLAR ve 5. Bölümde TARTIŞMA verilmiştir.

2. TEMEL BİLGİLER

2.1. Elektronun Hedefle Etkileşmesi

Elektronlar (pozitif ve negatif) tıpkı ağır yüklü parçacıklar gibi atomik elektronlarla coulomb saçılmasıyla etkileşirler. Ancak bazı önemli farklılıkları bulunmaktadır:

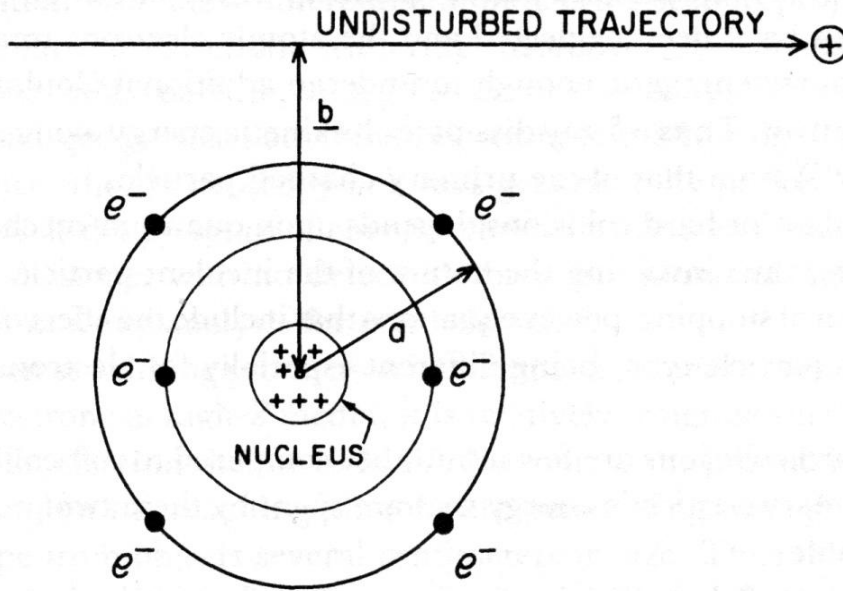
1. Öncelikle çekirdekten yayınlanan β 'lar göreceli hızlarda hareket ederler [Krane, 2006] .
2. Elektronlar, diğer elektronlarla çarpışmalarında büyük sapmalara uğrarlar ve düzensiz yörüngeler çizerler. Böylece, menzil (hedef içinde gidebildiği doğrusal uzaklık) elektronların takip ettikleri yol uzunluğundan çok farklı olacaktır [Krane, 2006] .
3. Elektron, bir diğer elektronla kafa kafaya çarpışmasında ilk enerjisinin büyük bir kısmı diğer elektrona aktarılabilir (Gerçekte, elektron-elektron çarpışmalarında iki parçacığın durumlarını göz önüne almamız gerekir; çarpışmadan sonra, hangisi gelen elektrondur, hangisi çarpılan elektrondur bilinemez) [Krane, 2006] .
4. Elektron hızının, doğrultu ve büyüklüğünde hızlı bir değişiklik olabileceğinden, büyük bir ivmeye maruz kalabilir ve ivmeli yüklü parçacık elektromanyetik enerji yayınlara. Bu radyasyona bremsstrahlung (Almanca; frenleme ışıınımı) denir [Krane, 2006] .

Genel olarak, yüklü parçacıklar madde içerisinden geçerken enerji kaybı ve geliş doğrultularından sapmaları gibi iki ana özellikte karakterize edilebilirler. Bu etkiler öncelikle maddenin atomik elektronları ile inelastik çarpışması ve çekirdekten elastik saçılmasının sonucudur. Bu reaksiyonlar maddede birim uzunluk başına birçok defa meydana gelir [Powsner 2008, William 1994].

2.2. Yüklü Parçacığın Coulomb Kuvvetiyle Etkileşim Türleri

Yüklü bir parçacığın Coulomb kuvvet etkileşimleri Şekil 2.2' deki gibi basitçe karakterize edilebilir. Burada “b” klasik etki parametresi, “a” da atomik yarıçaptır.

Aşağıda öne çıkan etkileşim $b \gg a$, $b \approx a$, $b \ll a$ olmak üzere sırasıyla verilmiştir [Martin, 2006].



Şekil 2.1. Yüklü parçacığın Coulomb etkileşimi

2.2.1 Yumuşak çarpışma ($b \gg a$)

Yüklü parçacık atomdan önemli bir mesafeden uzakta geçtiğinde, parçacığın Coulomb kuvveti alanı etkisi, atomu bir bütün olarak etkiler, atomu yüksek enerji seviyesine uyarır ve bazen son yörüngedeki elektronu iyonlaştırır [Martin, 2006].

Net etki, absorblanan ortamdaki atoma çok küçük miktardaki enerjinin transferidir. “b” nin yüksek değerlerinden dolayı, yüklü parçacığın birbirinden ayrı atomlara isabet etmesinin daha mümkün olacağı açıktır. Yumuşak çarpışmalar yüklü parçacık etkileşimlerinde daha çok görülür ve bu çarpışmalar absorblanan ortama enerji transferlerinin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır.

Yoğunlaştırılmış ortamdaki (sıvılar ve katılar) atomik bozukluklar aynı zamanda polarizasyon (veya yoğunluk) etkisinde artışa sebep olur. Bu koşullarda yumuşak çarpışmalarda yüklü parçacık tarafından harcanan enerjinin çok küçük bir miktarı

absorblama ortamı tarafından Çerenkov radyasyonu denilen mavimsi beyaz ışık gibi yayılabilir [Martin, 2006].

2.2.2.Sert çarpışma ($b \approx a$)

Etki parametresi b , atomik boyutlarla yaklaşık aynı olduğunda yüklü parçacığın öncelikle tek atomik elektronla etkileşmesi daha muhtemeldir, bu çarpışmadan sonra δ ışını denen oldukça büyük bir kinetik enerji çıkar [Martin, 2006].

Teorikte, sert çarpışma sürecinde atomik bağlanma enerjileri ihmal edilmiş ve atomik elektronlar “serbest” olarak adlandırılmıştır.

Sert çarpışmada olasılık, kuantum mekanik spinine ve değişim etkilerine bağlıdır, bu yüzden parçacığın doğasıyla ilgilidir. Bunun sonucu olarak görüleceği gibi; durdurma gücü eşitlikleri, parçacık tipine bağlı sert çarpışma etkilerini içerir.

Yumuşak çarpışmayla kıyaslandığında sert çarpışmanın sayısı daha az olmasına rağmen, bu iki süreç tarafından harcanan temel parçacık enerjilerinin fonksiyonu genelde benzerdir.

Sert çarpışma yoluyla bir iç kabuktan elektron atıldığında, aynı elektron bir foton etkileşimiyle uzaklaştırılmış gibi karakteristik ve/veya Auger elektronu yayacaktır. Bu yüzden ortama aktarılan enerjinin bir kısmı, delta ışınlarının yanı sıra bu taşıyıcılar tarafından temel parçacıktan biraz daha uzak mesafeye taşınabilir [Martin, 2006].

2.2.3. Coulomb kuvveti ile dış nükleer alan etkileşimleri ($b \ll a$)

Yüklü parçacığın etki parametresi “ b ”, atomik yarıçaptan çok küçük olduğunda coulomb kuvveti etkileşimleri çoğunlukla çekirdekte gerçekleşir. Bu tür etkileşim elektronlar için ($+$ ya da $-$) çok önemlidir. Çarpışmanın %2-3’ünde elektron

esnek olarak saçılır ve X ışını fotonu yaymaz veya çekirdeği uyarmaz. Sadece çarpışmanın momentum korunumunu sağlamak için gerekli çok az bir miktar enerji

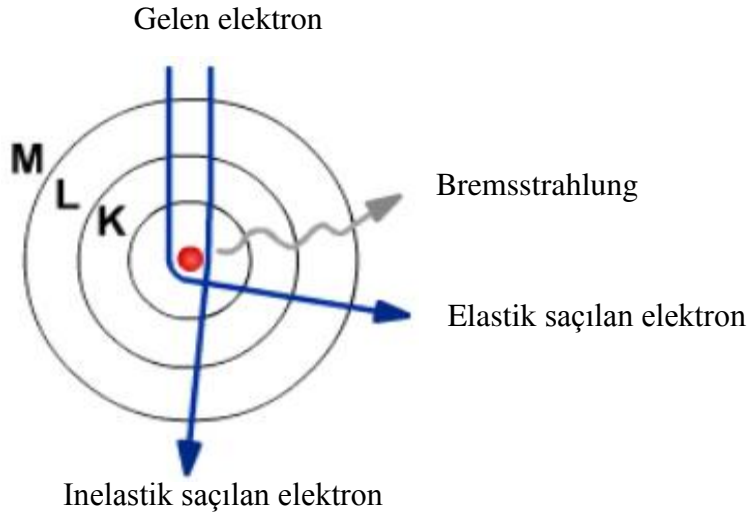
kaybeder. Bu yüzden; bu, enerjinin absorbloma ortamına transferi için bir mekanizma değil, saptırıcı elektronların önemli bir ifadesidir. Bu, elektronların özellikle yüksek Z ortamında neden olan çok dolambaçlı bir yol seçtiğinin ve elektron geri saçılımının neden Z ile arttığının temel nedenidir. Cisim boyunca elektron taşınımı için monte carlo eşitliklerini yaparken, basitlik için sıklıkla enerji kaybı etkileşimleri saçılma etkileşimlerinden (ör: yön değiştirme) ayrı tutulur. Atom başına diferansiyel esnek saçılma kesiti, Z^2 ile orantılıdır [Martin, 2006].

Elektronların çekirdeğin yanından geçtiği durumların diğer bir %2-3'lük kısmında X ışını fotonu yayılırken esnek olmayan radyatif bir etkileşim meydana gelir. Bu süreçte elektron sadece saptırılmaz aynı zamanda kinetik enerjisinin büyük bir bölümünü (% 100'e kadar) fotona verir. Bu tür X ışınları Almanca'da frenleme ışını olarak bilinen bremsstrahlung olarak anılmaktadır [Martin, 2006].

2.3. Frenleme Işınımı (Bremsstrahlung)

Klasik elektromanyetik teoriye göre ivmeli hareket yapan yüklü bir parçacık elektromanyetik radyasyon yayınlar. Elektron gibi yüklü bir parçacık, atomun elektromanyetik alanı nedeni ile hızlanarak büyük bir ivmeye maruz kalabilir ve elektromanyetik enerji yayınlanır. Bu radyasyona frenleme ışınması veya (Bremsstrahlung) denir (Şekil 2.1).

Bu olay sonrasında E enerjili bir elektron, bir atomik elektron veya çekirdek alanında ivmelendiğinde, bir minimum enerjiden bir maksimum enerjiye kadar değerler alabilen fotonlar yayınlanır. Frenleme olayı, $E \approx 1 \text{ MeV}$ ' den daha büyük kinetik enerji ile gelen elektronlar için daha büyüktür. [Akar, 2005].



Şekil 2.2. Frenleme olayı

2.4. Beta Bozunumu

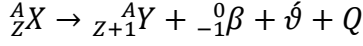
Pozitif ve negatif yüklü elektronların çekirdekten yayınlanması olayı beta bozunması olarak bilinir. 1934’ te Joliot-Curies ilk kez radyoaktif bozunmada pozitif elektron (pozitronun) yayınlanması olayını gözlediler. Bundan yalnızca iki yıl sonra pozitron kozmik ışınlarla keşfedildi [Krane, 2006].

En temel β bozunma reaksiyonu, bir protonun bir nötrona veya bir nötronun bir protona dönüşmesidir. Bir çekirdekte β bozunumu, hem Z hem de N ’ yi bir birim değiştirir: $Z \rightarrow Z \pm 1$, $N \rightarrow N \pm 1$, böylece $A = Z + N$ sabit kalır. Bu şekilde β bozunumu kararsız bir çekirdeğin kararlı izobara yaklaşmak için sabit A ’ lı kütle parabolü üzerinde "aşağı doğru" kayması için elverişli bir yol sağlar [Krane, 2006].

α bozunumunun tersine, β bozunumun anlaşılması oldukça uzun bir zaman sonra nispeten başarılmıştır. Bu konuda yapılan deneysel çalışmaların sonuçları, mevcut teorilerle çelişen yeni bilinmeyenleri ortaya çıkarmıştır. Rutherford’ un α parçacıklarının ${}^4\text{He}$ çekirdeklerine özdeş olduğunu gösterdiği bir seri deneysel çalışmalarda, negatif β parçacıklarının elektrik yüklerinin ve kütle-yük oranlarının bilinen elektronunki ile aynı olduğu gösterilmiştir. Bu elektron, hemen çekirdek dışına atılır. Bu durum alfa bozunumunun tam tersidir; α parçacığının çekirdek içinde önceden var olduğu kabul edilir [Krane, 2006].

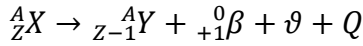
Temel β bozunma işlemleri üç şekildedir;

Negatif β bozunumu (β^-) denkleminin genel yazılışı [Khan, 1993]:



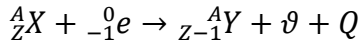
Burada Q parçacığın bozunma enerjisidir. Bu enerji, çekirdeğin ilk halinin kütlesi (A_ZX) ile ürün çekirdeği (${}^A_{Z+1}Y$) ve yayılan parçacıkların toplam kütlesi arasındaki farktan sağlanmaktadır [Khan, 1993].

Pozitif β bozunumu (β^+) denkleminin genel yazılışı [Khan, 1993] :



Reaksiyonda ortaya çıkan nötrino hemen hemen kütsüz kabul edilen ve diğer parçacıklarla çok zayıf etkileşime giren yüksüz bir parçacıktır. Bozunum sonunda ortaya çıkan yeni çekirdeğin atom numarası ana çekirdeğe göre birim azalırken kütle numarası değişmez [Lewin, 1999].

Elektron yakalanması (ϵ) denkleminin genel yazılışı [Khan, 1993] :



Kararsız çekirdek, elektron yakalamayla n/p oranını artırarak kararlı hale geçer [Khan, 1993].

2.5. PET Görüntülemeye Kullanılan Radyoizotoplar

PET' te kullanılan radyoizotoplar, vücutta bulunan temel elementlerle benzer biyokimyasal özellik gösterirler, kısa yarı ömürlüdürler ve düşük atom numaralıdır. PET radyoizotopları siklotronlarda ya da lineer hızlandırıcılarda [Volkovitsky ve Gilliam 2005] yapay olarak üretilebilirler. Deneyler PET'te halen kullanılan dört pozitron yayınlayıcının (Oksijen- ^{15}O , Azot - ^{13}N , Karbon- ^{11}C ve Flor- ^{18}F), 10-20 MeV enerjili protonlar ve 5-15 enerjili döteronlar kullanılarak elde edilebileceğini göstermiştir [Lagunas ve ark., 1995 –Robert ve ark., 1995]. Klinikte kullanılış amacına uygun izotoplar bir biyomolekülle birleştirilmek suretiyle

radıofarmasötik haline getirilmektedir [Maiti ve ark., 2005]. Ancak ^{11}C , ^{13}N ve ^{15}O radyoizotoplarının yarı ömürleri kısa olduğundan PET merkezlerine taşınması kolay olmadığından bu radyoizotoplar ile çalışan merkezler üretim için kullanılan siklotların yakınında olmak durumundadır. Oysa ^{18}F izotopu diğerlerine göre daha uzun bir yarı ömre sahip olduğundan (110 dakika) uzak mesafedeki merkezlere taşınması diğerlerine göre daha mümkündür. Çizelge 2.1'de PET'te yaygın olarak kullanılacak ve gelecekte kullanılacak olan radyoizotopların bazı özellikleri verilmiştir [Göker, 2010].

Çizelge 2.1. PET'te kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan pozitron yayınlayan radyoizotopların özellikleri

Günümüzde Kullanılan ve Kullanımları Araştırma Aşamasında Olan Pozitron Yayıncılar	E_{max} (MeV)	$T_{1/2}$
^{18}F	0.634	110 m
^{11}C	0.960	20 m
^{13}N	1.198	10 m
^{15}O	1.732	2 m
^{64}Cu	0.653	12.7 h
^{124}I	2.136	4.18 d
^{38}K	2.723	7.636 m
^{45}Ti	1.040	184.8 m
^{57}Co	0.699	271.79 d
^{68}Ga	1.899	67.3 m
^{109}Cd	0.126	462.6 d

2.6. Durdurma Gücü

Durdurma gücü, Uluslar arası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu (ICRU) [Taylor, 1970] tarafından, radyasyonun ortamda hareketi boyunca birim uzunlukta ortama bıraktığı enerji olarak tanımlanır.

Çarpışmalarla durdurma gücü, elektronlar için, birim uzunluk başına kaybedilen enerji ifadesi Bethe tarafından elde edilmiştir [Krane, 2006].

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{2\pi N_0 \rho}{mc^2 \beta^2 A} \times \left[\ln \frac{T(T+mc^2)\beta^2}{2I^2 mc^2} + (1-\beta^2) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (2.1)$$

Nükleer durdurma gücü, Bethe tarafından

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{Z^2 N_0 (T+mc^2) \rho z}{137m^2 c^4 A} \left[4 \ln \frac{2(T+mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right] \quad (2.2)$$

şeklinde verilir. Burada T, elektronun kinetik enerjisidir. “c” ve “r” alt indisleri çarpışmaları ve radyasyondan ileri gelen enerji kayıplarını temsil eder. Işıma kayıpları için verilen ifade göreceli enerjiler için geçerlidir. 1 MeV' in altında, radyasyon kayıpları ihmal edilebilir [Krane, 2006]. *Toplam durdurma gücü*, Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2' nin toplamıdır; [Krane, 2006]

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r \quad (2.3)$$

Nükleer durdurma gücü, Tsoulfanidis tarafından elektronlar için, Mev/m biriminde [Tsoulfanidis, 1995]

$$\frac{dE}{dX} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2 z}{\beta^2} NZ \times \left\{ \ln\left(\frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1}}{I} mc^2\right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left[\frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right] \right\} \quad (2.4)$$

olarak verilir. Burada r_0 ; klasik elektron yarıçapı olup $2,818 \times 10^{-15}$ metre Mc^2 , elektronun durgun kütle enerjisi olup 0.511 MeV' dir. N, hedef materyalin m^3 ' ü başına atom sayısıdır ($N=\rho N_0/A$). A ve Z hedef materyalin atom ağırlığı ve atom numarasıdır. $\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$; T, parçacığın MeV cinsinden kinetik enerjisidir. I, elektronlar için eV cinsinden ortalama uyarma potansiyelidir.

Yukarıda anlatılan çarpışmalarla enerji kaybı yüklü parçacığın radyasyonla enerji kaybı olan bremsstrahlung ile olan kaybı içermez. Bremsstrahlung emisyonu ile enerji kayıpları şu ilişki ile hesaplanabilmektedir.

$$\frac{E_{brems.}}{E_{iyoniz.}} = \frac{EZ}{750} \quad (2.5)$$

Burada E, MeV cinsinden parçacığın enerjisi; Z, hedef materyalin atom numarasıdır. Yukarıdaki eşitlik şöyle yazılabilir:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad.} = \frac{ZE}{750} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{iyon.} \quad (2.6)$$

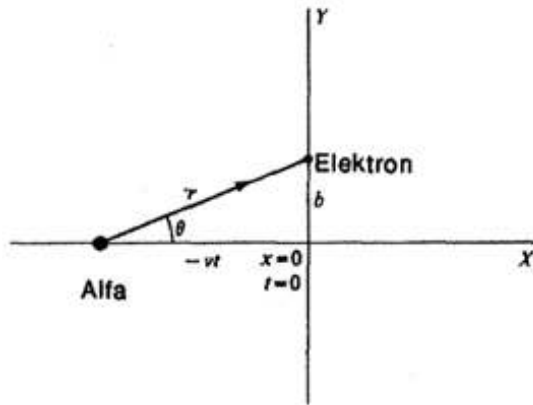
Nükleer durdurma gücü, ESTAR'da;

Seltzer ve Berger'in (1985) tanımladığı teorik tesir kesitinin bir kombinasyonu ile değerlendirilir, analitik formüller 50 MeV'in üzerinde kullanılır. 2 MeV'in altında Pratt ve ark.(1977)'nin doğru sonuçlarını kullanır. 2 MeV- 50 MeV arasındaki orta değerler için interpolasyon (ara değer bulma) yapılmıştır. Nükleer durdurma gücündeki belirsizlik 50 MeV'in üzerinde %2, 50 MeV ile 2 MeV arasında %2-5, 2 MeV'in altında %5' tir [ESTAR, 2009].

2.6.1. Durdurma gücü teorisi

Bir soğurucudan geçmekte olan yüklü bir parçacık, enerjisinin büyük bir kısmını soğurucunun atomlarını iyonlaştırmakta kaybeder. Birim uzunluk başına düşen enerji kaybı, yani durdurma gücü, teorik olarak hesaplanabilir. Klasik mekaniğe dayalı böyle bir durdurma gücü ifadesi ilk olarak 1915'te N. Bohr tarafından teşkil edildi. H. Bethe 1930'da kuantum mekaniği işlemlerinden yaklaşık bir ifade çıkardı. Gene kuantum mekaniğine dayalı doğru bir ifade 1933'te F.Bloch tarafından türetilmiştir ve bu ifade Bohr ve Bethe'nin neticelerini sınırlayıcı durumları ihtiva etmektedir. Bu ifadeyi klasik görüşe göre türeteceğiz ve daha sonra kuantum mekanik düşüncenin kullanılmasıyla meydana gelecek değişiklikleri müzakere edeceğiz.

M gelen bir parçacığın kütlesi; z yükü ve v hızı, A soğurucunun kütle numarası, Z atom numarası ve ρ yoğunluğudur. $t=0$, yüklü parçacığın orijinde bulunduğu zaman olmak üzere yüklü parçacığın yolundan b mesafesinde m kütleli bir elektronu düşünelim (Şekil 2.3) [Arya, 1999; Şahin, 1999].



Şekil 2.3. Bir alfa parçacığının bir atomun elektronuyla etkileşmesi

Türetme işlemi basitleştirmek için yapılan bazı kabuller şunlardır;

- i. Gelen parçacık soğurucu içinde sadece Coulomb etkileşmesi yaparak düz bir çizgide ilerler.

- 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 parçacık sifıra yaklaştığı zaman impulsun x-bileşenine olan katkı parçacık sıfırdan uzaklaştığı zamanki katkıyı götürür elektrona verilen itmenin net x-bileşeni sıfır olur [Arya, 1999; Şahin, 1999] .

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

Elektrona verilen impulsun (momentumun) y-bişeni

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

Şekil 2.3'ten ;

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

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

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

bulunur ve 2.8 bağıntısında yerlerine konulup integral işlemi yapılırsa

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

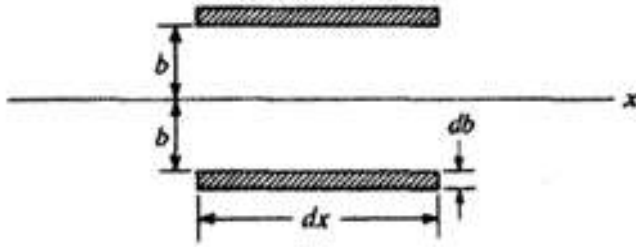
elde edilerek, b mesafesindeki bir tek elektrona verilen enerji

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

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 simetrililiğinden, 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 2.4. 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 yaklaşımla;

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

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

İle 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 uyarma 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 Cloumb 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: Rölativistik bakış açısından, elektrona parçacığın yoluna dik istikamette puls verme zamanı (τ)

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

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 $\bar{\nu}$ elektronun ortalama frekansıdır. 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

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

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) [Arya, 1999; Şahin, 1999].

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

şayet yüksek enerjilerde rölativite düzenlemesi dikkate alınır ;

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

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

3. HESAPLAMALAR

3.1. Ortalama Atomik Kütle ve Etkin Atom Numarasının Hesaplanması

Bu çalışmada, durdurma gücü hesaplamak için seçilen hedefler tek bir elementten oluşmayıp kompleks yapılardan oluştuklarından “ortalama kütle numaralarının” ve “etkin atom numaralarının” tespit edilmesi gerekir.

Ortalama kütle numarası;

$$A_{ort} = \sum (A_i W_i) \quad (3.1)$$

Etkin atom numarası;

$$Z_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i}{A_i} \right) Z_i^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i}{A_i} \right) Z_i} \quad (3.2)$$

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

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

3.1 eşitliğinden akciğer için;

$$A_{ort} = A_C W_C + A_N W_N + A_O W_O + A_{Na} W_{Na} + A_{Mg} W_{Mg} + A_P W_P \\ + A_S W_S + A_{Cl} W_{Cl} + A_K W_K + A_{Ca} W_{Ca} + A_{Fe} W_{Fe} + A_{Zn} W_{Zn} + A_H W_H$$

$A_{ort} = 14,188$ olarak bulunur.

Soğurucu hedefin Etkin Atom Numarasını bulmak için yapılan işleme bir örnek olmak üzere AKCİĞER ele alınmıştır.

Eş. 3.2'yi hedef materyal olan akciğer için yazarsak;

$$Z_{eff} = \frac{\left(\frac{W_H}{A_H}\right)Z_H^2 + \left(\frac{W_C}{A_C}\right)Z_C^2 + \left(\frac{W_N}{A_N}\right)Z_N^2 + \left(\frac{W_O}{A_O}\right)Z_O^2 + \left(\frac{W_{Na}}{A_{Na}}\right)Z_{Na}^2 + \left(\frac{W_{Mg}}{A_{Mg}}\right)Z_{Mg}^2 + \left(\frac{W_P}{A_P}\right)Z_P^2 + \left(\frac{W_S}{A_S}\right)Z_S^2 + \left(\frac{W_{Cl}}{A_{Cl}}\right)Z_{Cl}^2 + \left(\frac{W_K}{A_K}\right)Z_K^2 + \left(\frac{W_{Ca}}{A_{Ca}}\right)Z_{Ca}^2 + \left(\frac{W_{Fe}}{A_{Fe}}\right)Z_{Fe}^2 + \left(\frac{W_{Zn}}{A_{Zn}}\right)Z_{Zn}^2}{\left(\frac{W_H}{A_H}\right)Z_H + \left(\frac{W_C}{A_C}\right)Z_C + \left(\frac{W_N}{A_N}\right)Z_N + \left(\frac{W_O}{A_O}\right)Z_O + \left(\frac{W_{Na}}{A_{Na}}\right)Z_{Na} + \left(\frac{W_{Mg}}{A_{Mg}}\right)Z_{Mg} + \left(\frac{W_P}{A_P}\right)Z_P + \left(\frac{W_S}{A_S}\right)Z_S + \left(\frac{W_{Cl}}{A_{Cl}}\right)Z_{Cl} + \left(\frac{W_K}{A_K}\right)Z_K + \left(\frac{W_{Ca}}{A_{Ca}}\right)Z_{Ca} + \left(\frac{W_{Fe}}{A_{Fe}}\right)Z_{Fe} + \left(\frac{W_{Zn}}{A_{Zn}}\right)Z_{Zn}}$$

$Z_{eff} = 6.58$ olarak bulunur.

3.2. Modifiye Atom Numarasının Hesaplanması

Modifiye atom numarası Z^* 'ın hesaplanması için gerekli eşitlikler aşağıda verilmiştir. Bu eşitliklerde; a, b ve X parçacığın hızına (V_0 ve V) bağlı sabitlerdir. (Tietz ,1956; Cabrera-Trujillo ve ark., 1997; Gümüş, 2005-2008; Sugiyama,1976; Tufan ve ark., 2005)

$$Z^* = Z_{eff} \frac{b^2(3x+b)}{(x+b)^3} \quad [\text{Sugiyama, 1976}] \quad (3.3)$$

$$b = \left(\frac{8}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \quad [\text{Cabrera ve ark, 1977}] \quad (3.4)$$

$$x = -2\left(\frac{b}{3}\right) + \frac{\left(\frac{b}{3}\right)^2}{\left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a\left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}}} + \left[\frac{a}{2} + \left(\frac{b}{3}\right)^3 + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a\left(\frac{b}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

[Cabrera-Trujillo ve ark., 1997; Gümüş, 2005]

$$a = \frac{b^2}{0.60647} \frac{V_0^2}{V^2} Z_{eff}^{4/3} \quad [\text{Gümüş, 2005}] \quad (3.6)$$

$$v_0 = 2.42 \times 10^6 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

Örnek olarak seçilen “su” için modifiye atom numarası “Z*”ın örnek hesaplaması şu şekildedir:

$$T = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.8)$$

$T = 3 \text{ MeV}$ için Eş. 3.8 kullanılarak $v = 1,027984 \times 10^9 \text{ m/s}$

Eş.3.4 kullanılarak $b = 1.865407$;

Eş.3.2’te su için $Z_{eff} = 6,6$

Eş. 3.6 kullanılarak;

$$a = \frac{(1.865407)^2}{0.60647} \frac{(2.42 \times 10^6 \text{ m/s})^2}{(1,027984 \times 10^9 \text{ m/s})^2} (6,6)^{(4/3)}$$

$a = 0,000394$ olarak bulunur.

Bulunan a ve b değerleri Eş.3.5’ de yerine yazılırsa

$$x = 2 \times \left(\frac{1.865407}{3} \right) + \frac{\left(\frac{1.865407}{3} \right)^2}{\left[\frac{0,000394}{2} + \left(\frac{1.865407}{3} \right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,000394}{2} \right)^2 + 0,000394 \times \left(\frac{b}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}}$$

$$+ \left[\frac{0,000394}{2} + \left(\frac{1.865407}{3} \right)^3 + \sqrt{\left(\frac{0,000394}{2} \right)^2 + 0,000394 \times \left(\frac{1.865407}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$x = 0,000113$ olarak bulunur.

Eş.3.3' de x , b , Z_{eff} değerleri yerine yazılırsa

$$Z^* = 6,6 \times \frac{(1.865407)^2 (3 \times 0,000113 + 1.865407)}{(0,000113 + 1.865407)^3}$$

$Z^* = 5,599999$ olarak bulunur.

3.3. Modifiye Uyarma Enerjisi (I^*)' ın Hesaplanması:

$$I^* = 2R_{\infty} \gamma Z_{eff} c_0^{-3/2} \exp\{\alpha\} \quad [\text{Tufan ve ark, 2005}] \quad (3.9)$$

$$\alpha = \frac{Z_{eff}}{2Z^*} \times [x^2 (x + 3b) \ln x + x(x + b)b + x(\ln 6 - 2)3b^2 + b^3 \left(\ln 6 - \frac{10}{3} \right) + (3x + b)b^2 \ln \frac{b^2}{(x + b)^4} - (x + b)^3 \ln(x + b)] / (x + b)^3 \quad (3.10)$$

Burada; $R_{\infty} = 13,6$ ve $c_0 = 0,6064741718$ ' dır.

$$\gamma = \frac{I}{10.46313462 Z_{eff}} \quad (\text{Andersen ve ark, 1977; Ahlen, 1980; ICRU 37, 1984}) \quad (3.11)$$

$$\gamma = \frac{75}{10.46313462 \times 6,6}$$

$\gamma = 1.086064$ olarak bulunur.

Su için 3 MeV enerji değerinde Eş 3.2'den $Z_{\text{eff}} = 6,6$; Eş 3.5'den $x = 0,000113$; Eş 3.3'den $Z^* = 6,599999$ ve Eş 3.4'den $b = 1,865407$ olarak hesaplanırsa ve hesaplamalar Eş.3.10 yerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \alpha = & \frac{6,6}{26,599999} [(0,000113)^2 \times (0,000113 + 3 \times 1,865407) \times \ln 0,000326 \\ & + 0,000113 \times (0,000113 + 1,865407) \times 1,865437 \\ & + 0,000113 (\ln 6 - 2) 3 \times (1,865407)^2 + (1,865407)^3 \\ & \times \left(\ln 6 - \frac{10}{3} \right) + (3 \times 0,000113 + 1,865407) \times (1,865407)^2 \\ & \times \ln \frac{(1,865407)^2}{(0,000113 + 1,865407)^4} - (0,000113 + 1,865407)^3 \\ & \times \ln(0,000113 + 1,865407)] / (0,000113 + 1,865407)^3 \end{aligned}$$

$\alpha = -1.70601$ olarak bulunur.

Eş.3.9 kullanılarak modifiye uyarma enerjisi

$$I^* = 2 \times 13,6 \times 1,086064 \times 6,6 \times (0,6064741718)^{(-3/2)} \times \exp\{-1,70601\}$$

$I^* = 74,961973$ olarak bulunur.

3.4.Gönderilen Parçacığın Modifiye Atom Numarasının Hesaplanması

$$z^* = 1 - \exp(-2200\beta^{1,78}) \quad [\text{Sugiyama, 1981}] \quad (3.12)$$

$$z^* = 1 - \exp(-2200 \times (0,989352)^{1,78})$$

$$z^* = 1$$

3.5. Klasik Bethe-Bloch İle Bremsstrahlung' un Hesaplanması:

Hedef materyal su için $T=3$ MeV'de klasik Bethe-Bloch eşitliği ile nükleer durdurma gücünün (Bremsstrahlung) hesaplanmasına örnek aşağıda gösterilmiştir.

Eş.3.2'den su için

$$Z_{eff} = \frac{\frac{W_0}{A_0} Z_o^2 + \frac{W_H}{A_H} Z_H^2}{\frac{W_0}{A_0} Z_o + \frac{W_H}{A_H} Z_H}$$

$$Z_{eff} = \frac{\frac{0,888106}{16} 8^2 + \frac{0,111894}{1} 1^2}{\frac{0,888106}{16} 8 + \frac{0,111894}{1} 1}$$

$Z_{eff} = 6,6$ olarak hesaplanır.

Eş.3.1'den su için;

$$A_{ort} = A_H W_H + A_o W_o$$

$$= 1,0,111894 + 16,0,888106$$

$$= 14,321$$

Eş.2.2' den

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dX} \right)_r = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{Z^2 N_0 (T + mc^2) z}{137 m^2 c^4 A} \left[4 \ln \frac{2(T + mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right] \quad (3.13)$$

$$= 2,07353 \times 10^{-26} \times \frac{(6,6)^2 \cdot 6,02 \times 10^{23} \cdot 3,511}{137 \cdot 0,511^2 \cdot 14,322} \times \left[4 \ln \frac{2(3 + 0,511)}{0,511} - \frac{4}{3} \right]$$

$$= 3,409086 \times 10^{-2} \text{ MeV.cm}^2/\text{g olarak bulunur.}$$

3.6. Modifiye Bethe- Bloch ile Bremsstrahlung'un Hesaplanması:

Hedef materyal su için $T=3$ MeV'de modifiye Bethe-Bloch eşitliği ile nükleer durdurma gücünün (Bremsstrahlung) hesaplanmasına örnek aşağıda gösterilmiştir.

Eş.3.14'de Z , z , parametreleri yerine modifiye Z^* , z^* , parametreleri yerine yazılarak

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dX} \right)_r = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{(Z^*)^2 N_0 (T + mc^2) z^*}{137m^2 c^4 A} \left[4 \ln \frac{2(T + mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right] \quad (3.14)$$

modifiye Bethe-Bloch nükleer durdurma gücü denklemi elde edilir.

Su için daha önce Eş.3.3'den elde edilen $Z^* = 5,599999$, Eş.3.12'den bulunan $z^* = 1$ ve Eş 3.1'den elde edilen $A_{ort} = 14,321$ değerleri Eş.3.15'de yerine yazılırsa nükleer durdurma gücü

$$= 2,07353 \times 10^{-26} \text{X} \frac{(6,599999)^2 \times (6,02 \times 10^{23}) \times 3,511 \times 1}{137,0,511^2 \cdot 14,322} \times \left[4 \ln \frac{2(3 + 0,511)}{0,511} - \frac{4}{3} \right]$$

$= 3,409086 \times 10^{-2} \text{ MeV.cm}^2/\text{g}$ olarak bulunur.

3.7.Klasik Tsoulfanidis ile Bremsstrahlung'un Hesaplanması:

Klasik Tsoulfanidis eşitliği ile nükleer durdurma gücünü (Bremsstrahlung) hesaplanmak için önce Eş.2.4 kullanılarak çarpışmalarla nükleer durdurma gücü hesaplanmış daha sonra Eş. 2.6. kullanılarak nükleer durdurma gücüne (Bremsstrahlung) geçiş yapılmıştır. Örnek olarak hedef materyal olan su için $T=3$ MeV'de yapılan işlemler aşağıda verilmiştir.

$$\gamma = \frac{T + mc^2}{mc^2} \quad (3.15)$$

$$= \frac{3MeV + 0,511MeV}{0,511MeV} = 6,870841$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2}} \quad (3.16)$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{(6,870)^2}} = 0,989352$$

ve $\beta^2 = 0,978817$ olarak bulunur.

$r_0 = 2,818 \times 10^{-5} m$; $I = 75 \text{ eV}$ [ESTAR, 2009]; Eş.3.1'den $A_{ort} = 14,322$; Eş.3.2'den $Z_{eff} = 6,6$; Eş.3.16'dan $\gamma = 6,870841$; Eş.3.17'den $\beta = 0,989352$, $\beta^2 = 0,978817$ değerleri Eş.2.4'de yerine yazılırsa ve

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dX} \right)_{iyon.} &= 4 \times (3,14) \times (2,818 \times 10^{-15} m)^2 \times \frac{0,511MeV \times 1}{0,978817} \times \\ &1 \frac{g}{cm^3} \times \frac{\left(6,02 \times \frac{10^{23} atom}{mol} \right)}{14,322 \frac{g}{mol}} \times 6,6 \times \frac{10^6 cm^3}{1m^3} \times \\ &\left\{ \ln \left(\frac{0,989352 \times 6,870841 \times \sqrt{(6,870841)^2 - 1}}{75eV} \times 0,511MeV \times \frac{10^6 eV}{1MeV} \right) \right. \\ &\left. + \frac{1}{2 \times (6,870841)^2} \times \left[\frac{(6,870841 - 1)^2}{8} + 1 - (47,20846 + 2 \times 6,870841 - 1) \ln 2 \right] \right\} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{iyon.} = 162,482 MeV / m = 1,624820 MeV / cm \text{ olarak bulunur.}$$

Eş.2.6. kullanılarak nükleer durdurma gücüne geçiş yapılırsa;

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad.} = \frac{(6,6) \times 3}{750} \times \left(1,624820 \frac{MeV}{cm}\right)_{iyon.}$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad.} = 4.289525 \times 10^{-2} MeV.cm$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = 4.289525 \times 10^{-2} MeV.cm^2 / g \text{ olarak bulunur.}$$

3.8. Modifiye Tsoufanidis ile Bremsstrahlung'un Hesaplanması:

Eş.2.4'te Z, z, I parametreleri yerine modifiye edilmiş Z^*, z^* ve I^* parametreleri yazılırsa

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{iyon.} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2 z^*}{\beta^2} NZ^* \times \left\{ \ln \left(\frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma-1}}{I^*} mc^2 \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left[\frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right] \right\} \quad (3.17)$$

modifiye Tsoufanidis denklemi elde edilmiş olur.

Eş.3.3'ten $Z^* = 6,599999$; Eş.3.9'dan $I^* = 74,961973$, Eş.3.16'dan $\gamma = 6,870841$

Eş.3.17'den $\beta = 0,989352$ hesaplanan değerler Eş.3.17'de yerine yazılırsa

$$\begin{aligned}
\left(\frac{dE}{dX}\right)_{iyon.} &= 4 \times (3,14) \times (2,818 \times 10^{-15} m)^2 \times \frac{0,511 MeV \times 1}{0,978817} \times 1 \frac{g}{cm^3} \\
&\times \frac{\left(6,02 \times \frac{10^{23} atom}{mol}\right)}{14,322 \frac{g}{mol}} \times 6,599999 \times \frac{10^6 cm^3}{1m^3} \\
&\times \left\{ \ln \left(\frac{0,989352 \times 6,870841 \times \sqrt{(6,870841)-1}}{74,961973 eV} \times 0,511 MeV \times \frac{10^6 eV}{1 MeV} \right) \right. \\
&\left. + \frac{1}{2 \times (6,870841)^2} \times \left[\frac{(6,870841-1)^2}{8} + 1 - (47,20846 + 2 \times 6,870841 - 1) \ln 2 \right] \right\}
\end{aligned}$$

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{iyon.} = 162,489328 MeV / m = 1,624893 MeV / cm$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad.} = \frac{Z^* E}{750} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{iyon.} \tag{3.18}$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad.} = \frac{6,599999 \times 3}{750} \times \left(1,624893 \frac{MeV}{cm}\right)_{iyon.}$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad.} = 4.289718 \times 10^{-2} MeV.cm^2 / g \text{ bulunur.}$$

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada hedef olarak kullanılan biyolojik materyaller su, akciğer, beyin deri, kas ve kortikal kemiktir. Bu biyolojik yapıların içerikleri, özellikleri ve bu biyolojik yapılardaki nükleer durdurma gücü verileri National Institute of Standards and Technology (NIST)' [ESTAR, 2009]' ten alınmıştır.

Çizelge 4.1. Nükleer durdurma gücü hesaplamaları için hedefin ortalama atom kütlesi (A_{ort}), etkin atom numarası (Z_{eff}), yoğunluk (ρ) değerleri

Hedef	A_{ort}	Z_{eff}	ρ (g/cm^3)	$\langle I \rangle$
Beyin	14,030	6,46	1,03	73,3
Kemik(kortikal)	21,330	10,18	1,85	106,4
Akciğer	14,188	6,58	1,05	75,3
Kas	14,170	6,57	1,04	75,3
Deri	13,596	6,32	1,1	72,7
Su	14,322	6,6	1,0	75,0

Çalışmamızda Bethe-Bloch (Bethe, 1930) ve Bethe-Bloch eşitliğindeki Z ve z parametreleri modifiye edilerek 0,01 MeV ile 1000 MeV enerji aralığında hedef materyaller olan su, akciğer, deri, beyin, kas, kortikal kemik için nükleer durdurma gücü (Bremsstrahlung) hesabı yapılmış ve elde edilen veriler National Institute of Standards and Technology (NIST) [ESTAR, 2009]' ten alınan verilerle karşılaştırılmıştır.

PET' de kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan radyoizotoplardan yayınlanan pozitronların enerji değerlerinde ve tedavide kullanılan LINAC cihazındaki elektron enerji değerlerindeki Klasik Bethe-Bloch (Bethe, 1930) ve Modifiye Bethe Bloch eşitliğinden elde edilen Bremsstrahlung sonuçları, hedef materyaller olan su, akciğer, deri, beyin, kas, kortikal kemik için sırasıyla aşağıda tablolarda verilmiştir. NIST' ten [ESTAR, 2009] alınan ve modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen değerler için yüzde fark değişimi ve bu değerlerin oranı hesaplanmıştır ve tablolarda verilmiştir.

Çalışmamızda Tsoulfanidis (Tsoulfanidis, 1995) tarafından önerilen durdurma gücü eşitliği kullanılarak 0,01 MeV ile 1000 MeV enerji aralığında nükleer durdurma gücü (Bremsstrahlung) hesabı hedef materyaller olan su, akciğer, beyin, deri, kortikal kemik yapılmıştır. PET' de kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan radyoizotoplardan yayınlanan pozitronların enerji değerlerinde ve tedavide kullanılan LINAC cihazındaki elektron enerji değerlerindeki Bremsstrahlung sonuçları bu hedef materyaller için sırasıyla aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çalışmamızda Tsoulfanidis'in durdurma gücü eşitliğindeki (Tsoulfanidis, 1995) A , Z , I , z parametreleri modifiye edilerek yukarıdaki bahsedilen hedef materyaller ve enerji aralığı için nükleer durdurma gücü (Bremsstrahlung) hesaplanmıştır.

Daha sonra Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis eşitliklerinden elde edilen PET' de kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan radyoizotoplardan yayınlanan pozitronların enerji değerlerinde ve tedavide kullanılan LINAC cihazındaki elektron enerji değerlerindeki Bremsstrahlung sonuçları arasında yüzde fark değişimi ve bu değerlerin oranı hesaplanmıştır, sonuçlar aşağıdaki tablolarda sırasıyla verilmiştir.

PET’ de kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan radyoizotoplardan yayınlanan pozitronların enerji değerlerinde ve tedavide kullanılan LINAC cihazındaki elektron enerji değerlerindeki Modifiye Tsoulfanidis’ ten elde sonuçlarla NIST’ ten alınan veriler arasındaki yüzde fark değişimi, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis değerleri oranı hedef materyaller olan su, akciğer, beyin deri, kortikal kemik için hesaplanmıştır ve sonuçlar aşağıda sırasıyla tablolarda verilmiştir.

0,01 MeV ile 1000 MeV enerji aralığında hedef materyaller olan su, akciğer, deri, beyin, kas, kortikal kemik için Klasik Bethe-Bloch, Modifiye Bethe-Bloch Klasik Tsoulfanidis, Modifiye Tsoulfanidis’ ten elde edilen sonuçların enerjiye bağlı değişim grafikleri yukarıda bahsedilen hedef materyaller için sırasıyla aşağıda verilmiştir.

4.1. Su

Çizelge 4.2. Hedef olarak kullanılan suyun içerik ve özellikleri

Yoğunluk (g/cm³)		1,00000E+00
Ortalama İyonizasyon Enerjisi		75,000000 eV
Bileşimi		
Atom Numarası		Yüzde Ağırlık Oranı
H	1	0,111894
O	8	0,888106

Çizelge 4.3.Su için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	Z*	Klasik Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)	Modifiye Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,599959	1,569096E-03	1,569076E-03
¹⁸ F	0,634	6,599998	5,670886E-03	5,670883E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,599998	5,846316E-03	5,846314E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,599999	6,276455E-03	6,276453E-03
¹¹ C	0,960	6,599999	8,850095E-03	8,850093E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,599999	9,680112E-03	9,680110E-03
¹³ N	1,198	6,600000	1,137006E-02	1,137006E-02
¹⁵ O	1,732	6,600000	1,751202E-02	1,751201E-02
⁶⁸ Ga	1,899	6,600000	1,955060E-02	1,955060E-02
¹²⁴ I	2,136	6,600000	2,252731E-02	2,252731E-02
³⁸ K	2,723	6,600000	3,027294E-02	3,027294E-02
LINAC	6,000	6,600000	8,029153E-02	8,029153E-02
	9,000	6,600000	1,325882E-01	1,325882E-01
	12,000	6,600000	1,889715E-01	1,889715E-01
	15,000	6,600000	2,484389E-01	2,484389E-01
	18,000	6,600000	3,103852E-01	3,103852E-01
	21,000	6,600000	3,744047E-01	3,744047E-01

Çizelge 4.4.Su için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe-Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Bethe-Bloch arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,360000E-03	1,569076E-03	6,401202E+01
¹⁸ F	0,634	8,607000E-03	5,670883E-03	3,411313E+01
⁶⁴ Cu	0,653	8,808000E-03	5,846314E-03	3,362495E+01
⁵⁷ Co	0,699	9,302000E-03	6,276453E-03	3,252577E+01
¹¹ C	0,960	1,231000E-02	8,850093E-03	2,810647E+01
⁴⁵ Ti	1,040	1,329000E-02	9,680110E-03	2,716245E+01
¹³ N	1,198	1,531000E-02	1,137006E-02	2,573442E+01
¹⁵ O	1,732	2,276000E-02	1,751201E-02	2,305795E+01
⁶⁸ Ga	1,899	2,525000E-02	1,955060E-02	2,257188E+01
¹²⁴ I	2,136	2,888000E-02	2,252731E-02	2,199685E+01
³⁸ K	2,723	3,834000E-02	3,027294E-02	2,104085E+01
LINAC	6,000	9,854000E-02	8,029153E-02	1,851885E+01
	9,000	1,601000E-01	1,325882E-01	1,718413E+01
	12,000	2,251000E-01	1,889715E-01	1,604998E+01
	15,000	2,926000E-01	2,484389E-01	1,509265E+01
	18,000	3,618000E-01	3,103852E-01	1,421083E+01
	21,000	4,322000E-01	3,744047E-01	1,337235E+01

Çizelge 4.5. Su için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe- Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,360000E-03	1,569076E-03	2,778705
¹⁸ F	0,634	8,607000E-03	5,670883E-03	1,517753
⁶⁴ Cu	0,653	8,808000E-03	5,846314E-03	1,506590
⁵⁷ Co	0,699	9,302000E-03	6,276453E-03	1,482047
¹¹ C	0,960	1,231000E-02	8,850093E-03	1,390946
⁴⁵ Ti	1,040	1,329000E-02	9,680110E-03	1,372918
¹³ N	1,198	1,531000E-02	1,137006E-02	1,346519
¹⁵ O	1,732	2,276000E-02	1,751201E-02	1,299679
⁶⁸ Ga	1,899	2,525000E-02	1,955060E-02	1,291520
¹²⁴ I	2,136	2,888000E-02	2,252731E-02	1,281999
³⁸ K	2,723	3,834000E-02	3,027294E-02	1,266478
LINAC	6,000	9,854000E-02	8,029153E-02	1,227278
	9,000	1,601000E-01	1,325882E-01	1,207498
	12,000	2,251000E-01	1,889715E-01	1,191185
	15,000	2,926000E-01	2,484389E-01	1,177754
	18,000	3,618000E-01	3,103852E-01	1,165648
	21,000	4,322000E-01	3,744047E-01	1,154366

Çizelge 4.6. Su için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	I*	Klasik Tsoulfanidis (B1) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	74,959570	3,288933E-03	3,289129E-03
¹⁸ F	0,634	74,961867	9,028187E-03	9,028683E-03
⁶⁴ Cu	0,653	74,961874	9,260032E-03	9,260539E-03
⁵⁷ Co	0,699	74,961886	9,825976E-03	9,826510E-03
¹¹ C	0,960	74,961928	1,314892E-02	1,314961E-02
⁴⁵ Ti	1,040	74,961935	1,420111E-02	1,420185E-02
¹³ N	1,198	74,961946	1,631905E-02	1,631988E-02
¹⁵ O	1,732	74,961962	2,379805E-02	2,379921E-02
⁶⁸ Ga	1,899	74,961965	2,621997E-02	2,622122E-02
¹²⁴ I	2,136	74,961967	2,971279E-02	2,971418E-02
³⁸ K	2,723	74,961971	3,860142E-02	3,860319E-02
LINAC	6,000	74,961977	9,210561E-02	9,210942E-02
	9,000	74,961978	1,444525E-01	1,444582E-01
	12,000	74,961978	1,987723E-01	1,987799E-01
	15,000	74,961978	2,545394E-01	2,545488E-01
	18,000	74,961978	3,114518E-01	3,114631E-01
	21,000	74,961978	3,693127E-01	3,693259E-01

Çizelge 4.7.Su için, Klasik ve Modifiye Tsoufanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

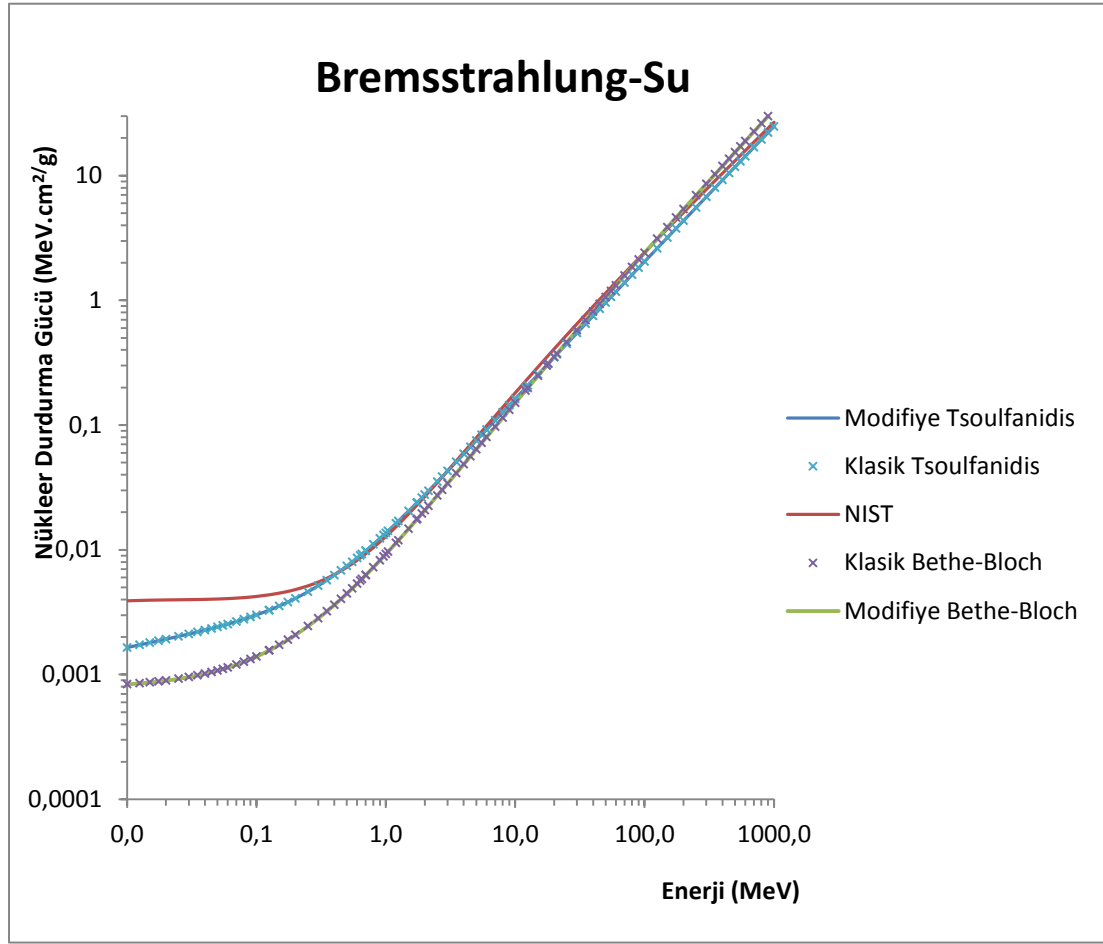
	Enerji (MeV)	Z*	Klasik ve Modifiye Tsoufanidis arasındaki yüzde fark $\% \text{ fark} = \left(\frac{B2-B1}{B2} \right) \times 100$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,599959	5,959024E-03
¹⁸ F	0,634	6,599998	5,493603E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,599998	5,474843E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,599999	5,434279E-03
¹¹ C	0,960	6,599999	5,247304E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,599999	5,210589E-03
¹³ N	1,198	6,600000	5,085822E-03
¹⁵ O	1,732	6,600000	4,874111E-03
⁶⁸ Ga	1,899	6,600000	4,767131E-03
¹²⁴ I	2,136	6,600000	4,677901E-03
³⁸ K	2,723	6,600000	4,585113E-03
LINAC	6,000	6,600000	4,136385E-03
	9,000	6,600000	3,945778E-03
	12,000	6,600000	3,823324E-03
	15,000	6,600000	3,692809E-03
	18,000	6,600000	3,628038E-03
	21,000	6,600000	3,574079E-03

Çizelge.4.8.Su için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,360000E-03	3,289129E-03	2,456126E+01
¹⁸ F	0,634	8,607000E-03	9,028683E-03	-4,899303E+00
⁶⁴ Cu	0,653	8,808000E-03	9,260539E-03	-5,137818E+00
⁵⁷ Co	0,699	9,302000E-03	9,826510E-03	-5,638680E+00
¹¹ C	0,960	1,231000E-02	1,314961E-02	-6,820552E+00
⁴⁵ Ti	1,040	1,329000E-02	1,420185E-02	-6,861174E+00
¹³ N	1,198	1,531000E-02	1,631988E-02	-6,596212E+00
¹⁵ O	1,732	2,276000E-02	2,379921E-02	-4,565949E+00
⁶⁸ Ga	1,899	2,525000E-02	2,622122E-02	-3,846416E+00
¹²⁴ I	2,136	2,888000E-02	2,971418E-02	-2,888435E+00
³⁸ K	2,723	3,834000E-02	3,860319E-02	-6,864632E-01
LINAC	6,000	9,854000E-02	9,210942E-02	6,525858E+00
	9,000	1,601000E-01	1,444582E-01	9,770019E+00
	12,000	2,251000E-01	1,987799E-01	1,169263E+01
	15,000	2,926000E-01	2,545488E-01	1,300451E+01
	18,000	3,618000E-01	3,114631E-01	1,391291E+01
	21,000	4,322000E-01	3,693259E-01	1,454745E+01

Çizelge 4.9.Su için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,360000E-03	3,289129E-03	1,325579
¹⁸ F	0,634	8,607000E-03	9,028683E-03	0,953295
⁶⁴ Cu	0,653	8,808000E-03	9,260539E-03	0,951133
⁵⁷ Co	0,699	9,302000E-03	9,826510E-03	0,946623
¹¹ C	0,960	1,231000E-02	1,314961E-02	0,936149
⁴⁵ Ti	1,040	1,329000E-02	1,420185E-02	0,935794
¹³ N	1,198	1,531000E-02	1,631988E-02	0,938120
¹⁵ O	1,732	2,276000E-02	2,379921E-02	0,956334
⁶⁸ Ga	1,899	2,525000E-02	2,622122E-02	0,962961
¹²⁴ I	2,136	2,888000E-02	2,971418E-02	0,971927
³⁸ K	2,723	3,834000E-02	3,860319E-02	0,993182
LINAC	6,000	9,854000E-02	9,210942E-02	1,069815
	9,000	1,601000E-01	1,444582E-01	1,108279
	12,000	2,251000E-01	1,987799E-01	1,132408
	15,000	2,926000E-01	2,545488E-01	1,149485
	18,000	3,618000E-01	3,114631E-01	1,161614
	21,000	4,322000E-01	3,693259E-01	1,170240



Şekil 4.1. Su için, nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği

4.1. Akciğer

Çizelge 4.10. Akciğerin İçerik ve Özellikleri

Yoğunluk (g/cm³)		1,05000E+00
Ortalama İyonizasyon Enerjisi		75,300000 eV
Bileşimi		
Atom Numarası		Yüzde Ağırlık Oranı
H	1	0,101278
C	6	0,102310
N	7	0,028650
O	8	0,757072
Na	11	0,001840
Mg	12	0,000730
P	15	0,000800
S	16	0,002250
Cl	17	0,002660
K	19	0,001940
Ca	20	0,000090
Fe	26	0,000370
Zn	30	0,000010

Çizelge 4.11. Akciğer için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	Z*	Klasik Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)	Modifiye Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,579960	1,573000E-03	1,572981E-03
¹⁸ F	0,634	6,579998	5,684996E-03	5,684993E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,579998	5,860863E-03	5,860860E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,579999	6,292072E-03	6,292069E-03
¹¹ C	0,960	6,579999	8,872115E-03	8,872113E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,579999	9,704197E-03	9,704196E-03
¹³ N	1,198	6,580000	1,139835E-02	1,139835E-02
¹⁵ O	1,732	6,580000	1,755559E-02	1,755559E-02
⁶⁸ Ga	1,899	6,580000	1,959925E-02	1,959925E-02
¹²⁴ I	2,136	6,580000	2,258336E-02	2,258336E-02
³⁸ K	2,723	6,580000	3,034826E-02	3,034826E-02
LINAC	6,000	6,580000	8,049131E-02	8,049131E-02
	9,000	6,580000	1,329181E-01	1,329181E-01
	12,000	6,580000	1,894417E-01	1,894417E-01
	15,000	6,580000	2,490570E-01	2,490570E-01
	18,000	6,580000	3,111575E-01	3,111575E-01
	21,000	6,580000	3,753363E-01	3,753363E-01

Çizelge 4.12. Akciğer için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe-Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Bethe-Bloch arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,307000E-03	1,572981E-03	6,347850E+01
¹⁸ F	0,634	8,505000E-03	5,684993E-03	3,315705E+01
⁶⁴ Cu	0.653	8.703000E-03	5.860860E-03	3.265701E+01
⁵⁷ Co	0.699	9.191000E-03	6.292069E-03	3.154097E+01
¹¹ C	0.960	1,216000E-02	8,872113E-03	2,703854E+01
⁴⁵ Ti	1.040	1,314000E-02	9,704196E-03	2,614767E+01
¹³ N	1.198	1,513000E-02	1,139835E-02	2,466391E+01
¹⁵ O	1.732	2,249000E-02	1,755559E-02	2,194046E+01
⁶⁸ Ga	1,899	2,495000E-02	1,959925E-02	2,144589E+01
¹²⁴ I	2,136	2,854000E-02	2,258336E-02	2,087120E+01
³⁸ K	2,723	3,789000E-02	3,034826E-02	1,990430E+01
LINAC	6,000	9,738000E-02	8,049131E-02	1,734308E+01
	9,000	1,582000E-01	1,329181E-01	1,598097E+01
	12,000	2,225000E-01	1,894417E-01	1,485766E+01
	15,000	2,892000E-01	2,490570E-01	1,388071E+01
	18,000	3,575000E-01	3,111575E-01	1,296294E+01
	21,000	4,272000E-01	3,753363E-01	1,214038E+01

Çizelge 4.13. Akciğer için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe- Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,307000E-03	1,572981E-03	2,738113
¹⁸ F	0,634	8,505000E-03	5,684993E-03	1,496044
⁶⁴ Cu	0,653	8,703000E-03	5,860860E-03	1,484936
⁵⁷ Co	0,699	9,191000E-03	6,292069E-03	1,460728
¹¹ C	0,960	1,216000E-02	8,872113E-03	1,370587
⁴⁵ Ti	1,040	1,314000E-02	9,704196E-03	1,354053
¹³ N	1,198	1,513000E-02	1,139835E-02	1,327385
¹⁵ O	1,732	2,249000E-02	1,755559E-02	1,281073
⁶⁸ Ga	1,899	2,495000E-02	1,959925E-02	1,273008
¹²⁴ I	2,136	2,854000E-02	2,258336E-02	1,263762
³⁸ K	2,723	3,789000E-02	3,034826E-02	1,248507
LINAC	6,000	9,738000E-02	8,049131E-02	1,209820
	9,000	1,582000E-01	1,329181E-01	1,190207
	12,000	2,225000E-01	1,894417E-01	1,174504
	15,000	2,892000E-01	2,490570E-01	1,161180
	18,000	3,575000E-01	3,111575E-01	1,148936
	21,000	4,272000E-01	3,753363E-01	1,138179

Çizelge 4.14. Akciğer için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	I*	Klasik Tsoulfanidis (B1) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	7,525943E+01	3,295356E-03	3,295553E-03
¹⁸ F	0,634	7,526172E+01	9,046706E-03	9,047204E-03
⁶⁴ Cu	0,653	7,526172E+01	9,279043E-03	9,279552E-03
⁵⁷ Co	0,699	7,526173E+01	9,846186E-03	9,846722E-03
¹¹ C	0,960	7,526178E+01	1,317620E-02	1,317689E-02
⁴⁵ Ti	1,040	7,526178E+01	1,423063E-02	1,423137E-02
¹³ N	1,198	7,526179E+01	1,635310E-02	1,635393E-02
¹⁵ O	1,732	7,526181E+01	2,384817E-02	2,384932E-02
⁶⁸ Ga	1,899	7,526181E+01	2,627530E-02	2,627656E-02
¹²⁴ I	2,136	7,526182E+01	2,977566E-02	2,977707E-02
³⁸ K	2,723	7,526182E+01	3,868356E-02	3,868533E-02
LINAC	6,000	7,526182E+01	9,230471E-02	9,230853E-02
	9,000	7,526183E+01	1,447670E-01	1,447727E-01
	12,000	7,526183E+01	1,992070E-01	1,992146E-01
	15,000	7,526183E+01	2,550979E-01	2,551074E-01
	18,000	7,526183E+01	3,121370E-01	3,121484E-01
	21,000	7,526183E+01	3,701269E-01	3,701402E-01

Çizelge 4.15.Akciğer için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

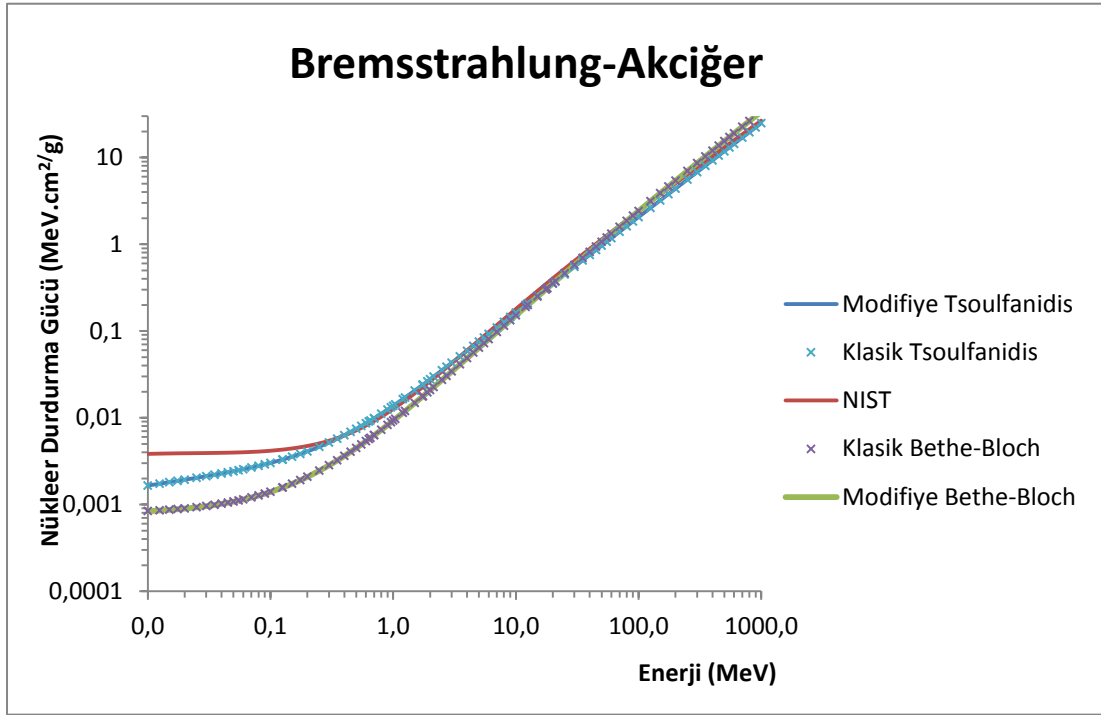
	Enerji (MeV)	Z*	Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $\% \text{ fark} = \left(\frac{B2-B1}{B2} \right) \times 100$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,579960	5,977752E-03
¹⁸ F	0,634	6,579998	5,504463E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,579998	5,485179E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,579999	5,443436E-03
¹¹ C	0,960	6,579999	5,236440E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,579999	5,199780E-03
¹³ N	1,198	6,580000	5,075233E-03
¹⁵ O	1,732	6,580000	4,821940E-03
⁶⁸ Ga	1,899	6,580000	4,795148E-03
¹²⁴ I	2,136	6,580000	4,735187E-03
³⁸ K	2,723	6,580000	4,575378E-03
LINAC	6,000	6,580000	4,138296E-03
	9,000	6,580000	3,937206E-03
	12,000	6,580000	3,814981E-03
	15,000	6,580000	3,723922E-03
	18,000	6,580000	3,652109E-03
	21,000	6,580000	3,593233E-03

Çizelge 4.16. Akciğer için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,307000E-03	3,295553E-03	2,348379E+01
¹⁸ F	0,634	8,505000E-03	9,047204E-03	-6,375121E+00
⁶⁴ Cu	0,653	8,703000E-03	9,279552E-03	-6,624750E+00
⁵⁷ Co	0,699	9,191000E-03	9,846722E-03	-7,134392E+00
¹¹ C	0.960	1.216000E-02	1.317689E-02	-8.362582E+00
⁴⁵ Ti	1.040	1.314000E-02	1.423137E-02	-8.305708E+00
¹³ N	1.198	1.513000E-02	1.635393E-02	-8.089425E+00
¹⁵ O	1.732	2,249000E-02	2.384932E-02	-6.044108E+00
⁶⁸ Ga	1.899	2.495000E-02	2.627656E-02	-5.316874E+00
¹²⁴ I	2.136	2.854000E-02	2,977707E-02	-4,334513E+00
³⁸ K	2,723	3,789000E-02	3,868533E-02	-2,099050E+00
LINAC	6,000	9,738000E-02	9,230853E-02	5,207917E+00
	9.000	1,582000E-01	1,447727E-01	8,487547E+00
	12,000	2,225000E-01	1,992146E-01	1,046535E+01
	15,000	2,892000E-01	2,551074E-01	1,178859E+01
	18,000	3,575000E-01	3,121484E-01	1,268576E+01
	21,000	4,272000E-01	3,701402E-01	1,335669E+01

Çizelge 4.17. Akciğer için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,307000E-03	3,295553E-03	1,306913
¹⁸ F	0,634	8,505000E-03	9,047204E-03	0,940069
⁶⁴ Cu	0,653	8,703000E-03	9,279552E-03	0,937869
⁵⁷ Co	0,699	9,191000E-03	9,846722E-03	0,933407
¹¹ C	0,960	1,216000E-02	1,317689E-02	0,922828
⁴⁵ Ti	1,040	1,314000E-02	1,423137E-02	0,923312
¹³ N	1,198	1,513000E-02	1,635393E-02	0,925160
¹⁵ O	1,732	2,249000E-02	2,384932E-02	0,943004
⁶⁸ Ga	1,899	2,495000E-02	2,627656E-02	0,949515
¹²⁴ I	2,136	2,854000E-02	2,977707E-02	0,958456
³⁸ K	2,723	3,789000E-02	3,868533E-02	0,979441
LINAC	6,000	9,738000E-02	9,230853E-02	1,054940
	9,000	1,582000E-01	1,447727E-01	1,092747
	12,000	2,225000E-01	1,992146E-01	1,116886
	15,000	2,892000E-01	2,551074E-01	1,133640
	18,000	3,575000E-01	3,121484E-01	1,145289
	21,000	4,272000E-01	3,701402E-01	1,154157



Şekil 4.2. Akciğer için, nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği

4.3. Beyin

Çizelge 4.18. Beyin İçerik ve Özellikleri

Yoğunluk (g/cm^3)	1,030000E+00
Ortalama İyonizasyon Enerjisi	73,300000 eV
Bileşimi	
Atom Numarası	Yüzde Ağırlık Oranı
H 1	0,110667
C 6	0,125420
N 7	0,013280
O 8	0,737723
Na 11	0,001840
Mg 12	0,000150
P 15	0,003540
S 16	0,001770
Cl 17	0,002360
K 19	0,003100
Ca 20	0,000090
Fe 26	0,000050
Zn 30	0,000010

Çizelge 4.19. Beyin için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	Z*	Klasik Bethe- Bloch (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe- Bloch (MeV.cm²/g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,459962	1,534520E-03	1,534502E-03
¹⁸ F	0,634	6,459998	5,545926E-03	5,545923E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,459999	5,717491E-03	5,717488E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,459999	6,138152E-03	6,138149E-03
¹¹ C	0,960	6,459999	8,655080E-03	8,655078E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,459999	9,466808E-03	9,466806E-03
¹³ N	1,198	6,460000	1,111952E-02	1,111952E-02
¹⁵ O	1,732	6,460000	1,712613E-02	1,712613E-02
⁶⁸ Ga	1,899	6,460000	1,911980E-02	1,911980E-02
¹²⁴ I	2,136	6,460000	2,203091E-02	2,203091E-02
³⁸ K	2,723	6,460000	2,960587E-02	2,960586E-02
LINAC	6,000	6,460000	7,852228E-02	7,852228E-02
	9,000	6,460000	1,296665E-01	1,296665E-01
	12,000	6,460000	1,848075E-01	1,848075E-01
	15,000	6,460000	2,429645E-01	2,429645E-01
	18,000	6,460000	3,035457E-01	3,035457E-01
	21,000	6,460000	3,661546E-01	3,661546E-01

Çizelge 4.20. Beyin için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe-Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Bethe-Bloch arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,267000E-03	1,534502E-03	6,403792E+01
¹⁸ F	0,634	8,433000E-03	5,545923E-03	3,423547E+01
⁶⁴ Cu	0,653	8,630000E-03	5,717488E-03	3,374869E+01
⁵⁷ Co	0,699	9,114000E-03	6,138149E-03	3,265143E+01
¹¹ C	0,960	1,206000E-02	8,655078E-03	2,823318E+01
⁴⁵ Ti	1,040	1,303000E-02	9,466806E-03	2,734608E+01
¹³ N	1,198	1,501000E-02	1,111952E-02	2,591925E+01
¹⁵ O	1,732	2,231000E-02	1,712613E-02	2,323563E+01
⁶⁸ Ga	1,899	2,475000E-02	1,911980E-02	2,274828E+01
¹²⁴ I	2,136	2,832000E-02	2,203091E-02	2,220724E+01
³⁸ K	2,723	3,759000E-02	2,960586E-02	2,124006E+01
LINAC	6,000	9,665000E-02	7,852228E-02	1,875605E+01
	9,000	1,570000E-01	1,296665E-01	1,740987E+01
	12,000	2,209000E-01	1,848075E-01	1,633884E+01
	15,000	2,871000E-01	2,429645E-01	1,537287E+01
	18,000	3,550000E-01	3,035457E-01	1,449417E+01
	21,000	4,242000E-01	3,661546E-01	1,368350E+01

Çizelge 4.21. Beyin için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe- Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,267000E-03	1,534502E-03	2,780707
¹⁸ F	0,634	8,433000E-03	5,545923E-03	1,520576
⁶⁴ Cu	0,653	8,630000E-03	5,717488E-03	1,509404
⁵⁷ Co	0,699	9,114000E-03	6,138149E-03	1,484812
¹¹ C	0,960	1,206000E-02	8,655078E-03	1,393402
⁴⁵ Ti	1,040	1,303000E-02	9,466806E-03	1,376388
¹³ N	1,198	1,501000E-02	1,111952E-02	1,349878
¹⁵ O	1,732	2,231000E-02	1,712613E-02	1,302688
⁶⁸ Ga	1,899	2,475000E-02	1,911980E-02	1,294470
¹²⁴ I	2,136	2,832000E-02	2,203091E-02	1,285467
³⁸ K	2,723	3,759000E-02	2,960586E-02	1,269681
LINAC	6,000	9,665000E-02	7,852228E-02	1,230861
	9,000	1,570000E-01	1,296665E-01	1,210798
	12,000	2,209000E-01	1,848075E-01	1,195298
	15,000	2,871000E-01	2,429645E-01	1,181654
	18,000	3,550000E-01	3,035457E-01	1,169511
	21,000	4,242000E-01	3,661546E-01	1,158527

Çizelge.4.22. Beyin için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	I*	Klasik Tsoulfanidis (B1) (MeV.cm ² /g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	73,260610	3,226325E-03	3,226518E-03
¹⁸ F	0,634	73,262738	8,851342E-03	8,851828E-03
⁶⁴ Cu	0,653	73,262743	9,078559E-03	9,079055E-03
⁵⁷ Co	0,699	73,262755	9,633199E-03	9,633722E-03
¹¹ C	0,960	73,262794	1,288965E-02	1,289032E-02
⁴⁵ Ti	1,040	73,262800	1,392074E-02	1,392146E-02
¹³ N	1,198	73,262810	1,599617E-02	1,599698E-02
¹⁵ O	1,732	73,262825	2,332464E-02	2,332577E-02
⁶⁸ Ga	1,899	73,262828	2,569769E-02	2,569892E-02
¹²⁴ I	2,136	73,262830	2,911997E-02	2,912134E-02
³⁸ K	2,723	73,262834	3,782877E-02	3,783049E-02
LINAC	6,000	73,262839	9,024452E-02	9,024825E-02
	9,000	73,262839	1,415213E-01	1,415269E-01
	12,000	73,262840	1,947277E-01	1,947351E-01
	15,000	73,262840	2,493496E-01	2,493588E-01
	18,000	73,262840	3,050915E-01	3,051027E-01
	21,000	73,262840	3,617611E-01	3,617741E-01

Çizelge 4.23. Beyin için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

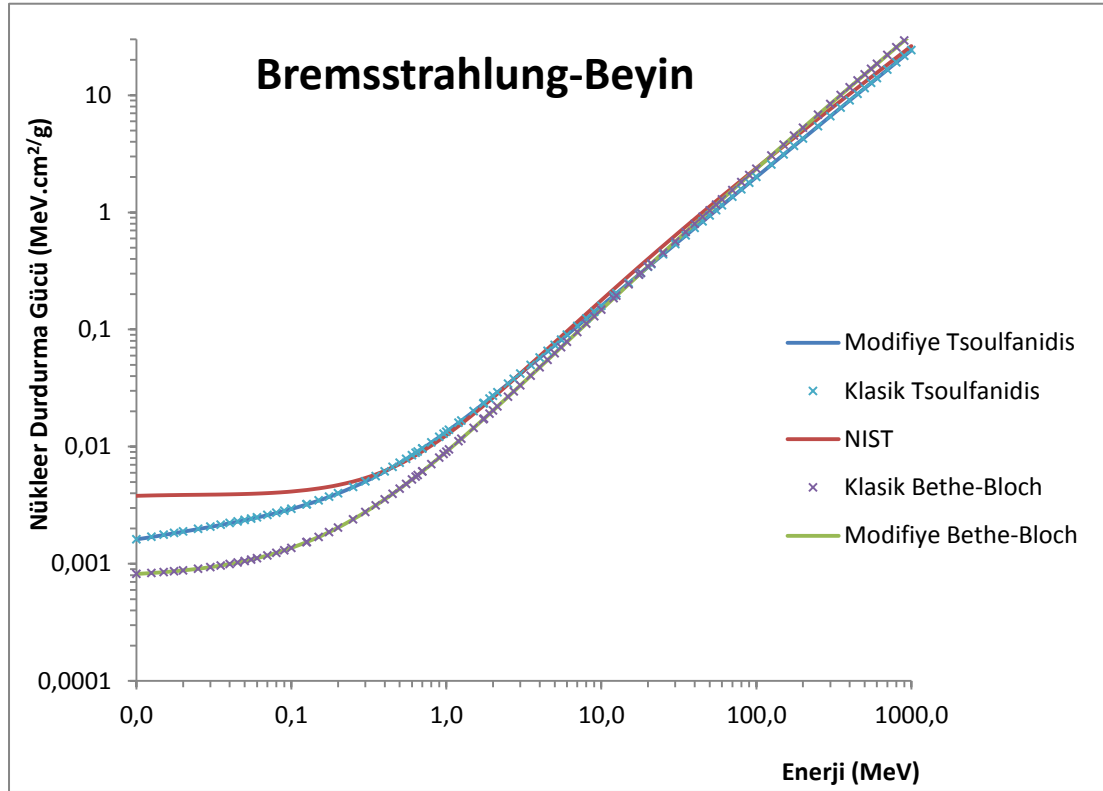
	Enerji (MeV)	Z*	Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $\% \text{ fark} = \left(\frac{B2-B1}{B2} \right) \times 100$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,459962	5,981681E-03
¹⁸ F	0,634	6,459998	5,490391E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,459999	5,463124E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,459999	5,428847E-03
¹¹ C	0,960	6,459999	5,197699E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,459999	5,171871E-03
¹³ N	1,198	6,460000	5,063456E-03
¹⁵ O	1,732	6,460000	4,844427E-03
⁶⁸ Ga	1,899	6,460000	4,786193E-03
¹²⁴ I	2,136	6,460000	4,704454E-03
³⁸ K	2,723	6,460000	4,546597E-03
LINAC	6,000	6,460000	4,133044E-03
	9,000	6,460000	3,956845E-03
	12,000	6,460000	3,800034E-03
	15,000	6,460000	3,689463E-03
	18,000	6,460000	3,670895E-03
	21,000	6,460000	3,593403E-03

Çizelge 4.24. Beyin için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,267000E-03	3,226518E-03	2,438439E+01
¹⁸ F	0,634	8,433000E-03	8,851828E-03	-4,966536E+00
⁶⁴ Cu	0,653	8,630000E-03	9,079055E-03	-5,203418E+00
⁵⁷ Co	0,699	9,114000E-03	9,633722E-03	-5,702458E+00
¹¹ C	0,960	1,206000E-02	1,289032E-02	-6,884909E+00
⁴⁵ Ti	1,040	1,303000E-02	1,392146E-02	-6,841596E+00
¹³ N	1,198	1,501000E-02	1,599698E-02	-6,575483E+00
¹⁵ O	1,732	2,231000E-02	2,332577E-02	-4,552981E+00
⁶⁸ Ga	1,899	2,475000E-02	2,569892E-02	-3,834020E+00
¹²⁴ I	2,136	2,832000E-02	2,912134E-02	-2,829590E+00
³⁸ K	2,723	3,759000E-02	3,783049E-02	-6,397712E-01
LINAC	6,000	9,665000E-02	9,024825E-02	6,623642E+00
	9,000	1,570000E-01	1,415269E-01	9,855478E+00
	12,000	2,209000E-01	1,947351E-01	1,184468E+01
	15,000	2,871000E-01	2,493588E-01	1,314566E+01
	18,000	3,550000E-01	3,051027E-01	1,405558E+01
	21,000	4,242000E-01	3,617741E-01	1,471615E+01

Çizelge 4.25. Beyin için, NIST ve Modifiye Tsoufanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm ² /g)	Modifiye Tsoufanidis (B2) (MeV.cm ² /g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,267000E-03	3,226518E-03	1,322478
¹⁸ F	0,634	8,433000E-03	8,851828E-03	0,952685
⁶⁴ Cu	0,653	8,630000E-03	9,079055E-03	0,950539
⁵⁷ Co	0,699	9,114000E-03	9,633722E-03	0,946052
¹¹ C	0,960	1,206000E-02	1,289032E-02	0,935586
⁴⁵ Ti	1,040	1,303000E-02	1,392146E-02	0,935965
¹³ N	1,198	1,501000E-02	1,599698E-02	0,938302
¹⁵ O	1,732	2,231000E-02	2,332577E-02	0,956453
⁶⁸ Ga	1,899	2,475000E-02	2,569892E-02	0,963075
¹²⁴ I	2,136	2,832000E-02	2,912134E-02	0,972483
³⁸ K	2,723	3,759000E-02	3,783049E-02	0,993643
LINAC	6,000	9,665000E-02	9,024825E-02	1,070935
	9,000	1,570000E-01	1,415269E-01	1,109330
	12,000	2,209000E-01	1,947351E-01	1,134361
	15,000	2,871000E-01	2,493588E-01	1,151353
	18,000	3,550000E-01	3,051027E-01	1,163543
	21,000	4,242000E-01	3,617741E-01	1,172555



Şekil 4.3. Beyin için, nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği

4.4. Deri

Çizelge 4.26. Deri içeriği ve özellikleri

Yoğunluk (g/cm³)		1, 1 0000E+00
Ortalama İyonizasyon Enerjisi		72,700000 eV
Bileşimi		
Atom Numarası		Yüzde Ağırlık Oranı
H	1	0,100588
C	6	0,228250
N	7	0,046420
O	8	0,619002
Na	11	0,000070
Mg	12	0,000060
P	15	0,000330
S	16	0,001590
Cl	17	0,002670
K	19	0,000850
Ca	20	0,000150
Fe	26	0,000010
Zn	30	0,000010

Çizelge 4.27. Deri için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	Z*	Klasik Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)	Modifiye Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,319965	1,515613E-03	1,515596E-03
¹⁸ F	0,634	6,459998	5,477592E-03	5,477590E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,459999	5,647043E-03	5,647041E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,459999	6,062521E-03	6,062519E-03
¹¹ C	0,960	6,459999	8,548437E-03	8,548435E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,459999	9,350163E-03	9,350161E-03
¹³ N	1,198	6,460000	1,098251E-02	1,098251E-02
¹⁵ O	1,732	6,460000	1,691511E-02	1,691511E-02
⁶⁸ Ga	1,899	6,460000	1,888421E-02	1,888421E-02
¹²⁴ I	2,136	6,460000	2,175946E-02	2,175946E-02
³⁸ K	2,723	6,460000	2,924108E-02	2,924108E-02
LINAC	6,000	6,460000	7,755478E-02	7,755478E-02
	9,000	6,460000	1,280689E-01	1,280689E-01
	12,000	6,460000	1,825304E-01	1,825304E-01
	15,000	6,460000	2,399708E-01	2,399708E-01
	18,000	6,460000	2,998056E-01	2,998056E-01
	21,000	6,460000	3,616431E-01	3,616431E-01

Çizelge 4.28. Deri için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe-Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Bethe-Bloch arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,124000E-03	1,515596E-03	6,324937E+01
¹⁸ F	0,634	8,171000E-03	5,477590E-03	3,296304E+01
⁶⁴ Cu	0,653	8,362000E-03	5,647041E-03	3,246782E+01
⁵⁷ Co	0,699	8,832000E-03	6,062519E-03	3,135735E+01
¹¹ C	0,960	1,170000E-02	8,548435E-03	2,693645E+01
⁴⁵ Ti	1,040	1,263000E-02	9,350161E-03	2,596864E+01
¹³ N	1,198	1,456000E-02	1,098251E-02	2,457067E+01
¹⁵ O	1,732	2,165000E-02	1,691511E-02	2,187016E+01
⁶⁸ Ga	1,899	2,402000E-02	1,888421E-02	2,138131E+01
¹²⁴ I	2,136	2,749000E-02	2,175946E-02	2,084591E+01
³⁸ K	2,723	3,650000E-02	2,924108E-02	1,988745E+01
LINAC	6,000	9,393000E-02	7,755478E-02	1,743343E+01
	9,000	1,527000E-01	1,280689E-01	1,613039E+01
	12,000	2,148000E-01	1,825304E-01	1,502309E+01
	15,000	2,792000E-01	2,399708E-01	1,405057E+01
	18,000	3,453000E-01	2,998056E-01	1,317533E+01
	21,000	4,127000E-01	3,616431E-01	1,237143E+01

Çizelge 4.29. Deri için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe- Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,124000E-03	1,515596E-03	2,721042
¹⁸ F	0,634	8,171000E-03	5,477590E-03	1,491714
⁶⁴ Cu	0,653	8,362000E-03	5,647041E-03	1,480776
⁵⁷ Co	0,699	8,832000E-03	6,062519E-03	1,456820
¹¹ C	0,960	1,170000E-02	8,548435E-03	1,368672
⁴⁵ Ti	1,040	1,263000E-02	9,350161E-03	1,350779
¹³ N	1,198	1,456000E-02	1,098251E-02	1,325744
¹⁵ O	1,732	2,165000E-02	1,691511E-02	1,279921
⁶⁸ Ga	1,899	2,402000E-02	1,888421E-02	1,271962
¹²⁴ I	2,136	2,749000E-02	2,175946E-02	1,263359
³⁸ K	2,723	3,650000E-02	2,924108E-02	1,248244
LINAC	6,000	9,393000E-02	7,755478E-02	1,211144
	9,000	1,527000E-01	1,280689E-01	1,192327
	12,000	2,148000E-01	1,825304E-01	1,176790
	15,000	2,792000E-01	2,399708E-01	1,163475
	18,000	3,453000E-01	2,998056E-01	1,151746
	21,000	4,127000E-01	3,616431E-01	1,141180

Çizelge 4.30. Deri için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	I*	Klasik Tsoulfanidis (B1) (MeV.cm ² /g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	72,661052	3,190064E-03	3,190257E-03
¹⁸ F	0,634	72,663048	8,750104E-03	8,750584E-03
⁶⁴ Cu	0,653	72,663053	8,974691E-03	8,975182E-03
⁵⁷ Co	0,699	72,663064	9,522911E-03	9,523427E-03
¹¹ C	0,960	72,663101	1,274162E-02	1,274228E-02
⁴⁵ Ti	1,040	72,663107	1,376075E-02	1,376146E-02
¹³ N	1,198	72,663116	1,581208E-02	1,581288E-02
¹⁵ O	1,732	72,663130	2,305530E-02	2,305641E-02
⁶⁸ Ga	1,899	72,663133	2,540071E-02	2,540192E-02
¹²⁴ I	2,136	72,663135	2,878310E-02	2,878445E-02
³⁸ K	2,723	72,663138	3,739026E-02	3,739196E-02
LINAC	6,000	72,663143	8,919224E-02	8,919592E-02
	9,000	72,663144	1,398668E-01	1,398723E-01
	12,000	72,663144	1,924472E-01	1,924545E-01
	15,000	72,663144	2,464256E-01	2,464348E-01
	18,000	72,663144	3,015104E-01	3,015214E-01
	21,000	72,663144	3,575114E-01	3,575242E-01

Çizelge.4.31. Deri için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

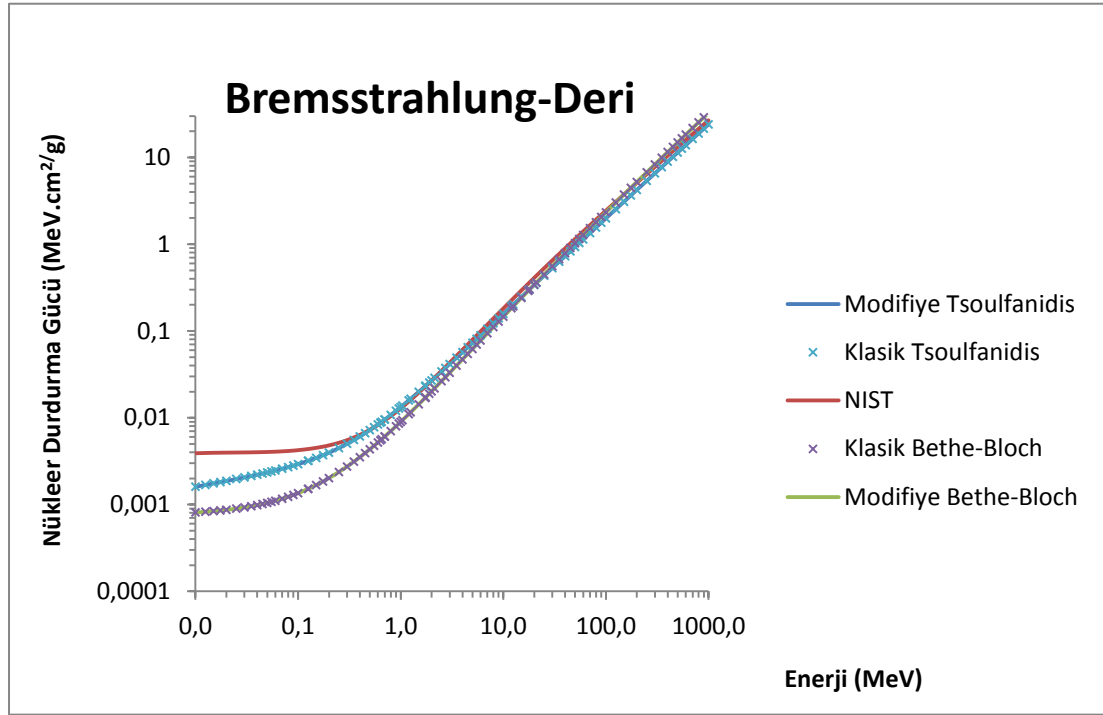
	Enerji (MeV)	Z*	Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $\% \text{ fark} = \left(\frac{B2-B1}{B2} \right) \times 100$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,319965	6,049669E-03
¹⁸ F	0,634	6,319999	5,485348E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,319999	5,470641E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,319999	5,418218E-03
¹¹ C	0,960	6,319999	5,179607E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,319999	5,159336E-03
¹³ N	1,198	6,320000	5,059167E-03
¹⁵ O	1,732	6,320000	4,814279E-03
⁶⁸ Ga	1,899	6,320000	4,763419E-03
¹²⁴ I	2,136	6,320000	4,690032E-03
³⁸ K	2,723	6,320000	4,546432E-03
LINAC	6,000	6,320000	4,125749E-03
	9,000	6,320000	3,932158E-03
	12,000	6,320000	3,793104E-03
	15,000	6,320000	3,733239E-03
	18,000	6,320000	3,648166E-03
	21,000	6,320000	3,580177E-03

Çizelge 4.32. Deri için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,124000E-03	3,190257E-03	2,264168E+01
¹⁸ F	0,634	8,171000E-03	8,750584E-03	-7,093183E+00
⁶⁴ Cu	0,653	8,362000E-03	8,975182E-03	-7,332959E+00
⁵⁷ Co	0,699	8,832000E-03	9,523427E-03	-7,828657E+00
¹¹ C	0,960	1,170000E-02	1,274228E-02	-8,908376E+00
⁴⁵ Ti	1,040	1,263000E-02	1,376146E-02	-8,958511E+00
¹³ N	1,198	1,456000E-02	1,581288E-02	-8,604945E+00
¹⁵ O	1,732	2,165000E-02	2,305641E-02	-6,496120E+00
⁶⁸ Ga	1,899	2,402000E-02	2,540192E-02	-5,753206E+00
¹²⁴ I	2,136	2,749000E-02	2,878445E-02	-4,708803E+00
³⁸ K	2,723	3,650000E-02	3,739196E-02	-2,443726E+00
LINAC	6,000	9,393000E-02	8,919592E-02	5,040009E+00
	9,000	1,527000E-01	1,398723E-01	8,400589E+00
	12,000	2,148000E-01	1,924545E-01	1,040293E+01
	15,000	2,792000E-01	2,464348E-01	1,173539E+01
	18,000	3,453000E-01	3,015214E-01	1,267842E+01
	21,000	4,127000E-01	3,575242E-01	1,336947E+01

Çizelge 4.33. Deri için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,124000E-03	3,190257E-03	1,292686
¹⁸ F	0,634	8,171000E-03	8,750584E-03	0,933766
⁶⁴ Cu	0,653	8,362000E-03	8,975182E-03	0,931680
⁵⁷ Co	0,699	8,832000E-03	9,523427E-03	0,927397
¹¹ C	0,960	1,170000E-02	1,274228E-02	0,918203
⁴⁵ Ti	1,040	1,263000E-02	1,376146E-02	0,917781
¹³ N	1,198	1,456000E-02	1,581288E-02	0,920768
¹⁵ O	1,732	2,165000E-02	2,305641E-02	0,939001
⁶⁸ Ga	1,899	2,402000E-02	2,540192E-02	0,945598
¹²⁴ I	2,136	2,749000E-02	2,878445E-02	0,955030
³⁸ K	2,723	3,650000E-02	3,739196E-02	0,976146
LINAC	6,000	9,393000E-02	8,919592E-02	1,053075
	9,000	1,527000E-01	1,398723E-01	1,091710
	12,000	2,148000E-01	1,924545E-01	1,116108
	15,000	2,792000E-01	2,464348E-01	1,132957
	18,000	3,453000E-01	3,015214E-01	1,145192
	21,000	4,127000E-01	3,575242E-01	1,154327



Şekil 4.4. Deri için, nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği

4.6. Kas

Çizelge 4.34. Kas İçeriği ve Özellikleri

Yoğunluk (g/cm³)		1,04000E+00
Ortalama İyonizasyon Enerjisi		75,300000 eV
Bileşimi		
Atom Numarası		Yüzde Ağırlık Katkısı
H	1	0,1006370
C	6	0,1078300
N	7	0,0276800
O	8	0,7547730
Na	11	0,0007500
Mg	12	0,0001900
P	15	0,0018000
S	16	0,0024100
Cl	17	0,0007900
K	19	0,0030200
Ca	20	0,0000300
Fe	26	0,0000400
Zn	30	0,0000500

Çizelge 4.35. Kas için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	Z*	Klasik Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)	Modifiye Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,569960	1,571543E-03	1,571523E-03
¹⁸ F	0,634	6,569998	5,679729E-03	5,679726E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,569998	5,855433E-03	5,855430E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,569999	6,286242E-03	6,286240E-03
¹¹ C	0,960	6,569999	8,863895E-03	8,863893E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,569999	9,695207E-03	9,695205E-03
¹³ N	1,198	6,570000	1,138779E-02	1,138779E-02
¹⁵ O	1,732	6,570000	1,753932E-02	1,753932E-02
⁶⁸ Ga	1,899	6,570000	1,958109E-02	1,958109E-02
¹²⁴ I	2,136	6,570000	2,256243E-02	2,256243E-02
³⁸ K	2,723	6,570000	3,032015E-02	3,032014E-02
LINAC	6,000	6,570000	8,041674E-02	8,041673E-02
	9,000	6,570000	1,327949E-01	1,327949E-01
	12,000	6,570000	1,892662E-01	1,892662E-01
	15,000	6,570000	2,488263E-01	2,488263E-01
	18,000	6,570000	3,108692E-01	3,108692E-01
	21,000	6,570000	3,749886E-01	3,749886E-01

Çizelge 4.36. Kas için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe-Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Bethe-Bloch arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,299000E-03	1,571523E-03	6,344445E+01
¹⁸ F	0,634	8,490000E-03	5,679726E-03	3,310099E+01
⁶⁴ Cu	0,653	8,688000E-03	5,855430E-03	3,260325E+01
⁵⁷ Co	0,699	9,175000E-03	6,286240E-03	3,148512E+01
¹¹ C	0,960	1,214000E-02	8,863893E-03	2,698605E+01
⁴⁵ Ti	1,040	1,311000E-02	9,695205E-03	2,604725E+01
¹³ N	1,198	1,511000E-02	1,138779E-02	2,463408E+01
¹⁵ O	1,732	2,245000E-02	1,753932E-02	2,187385E+01
⁶⁸ Ga	1,899	2,491000E-02	1,958109E-02	2,139265E+01
¹²⁴ I	2,136	2,849000E-02	2,256243E-02	2,080579E+01
³⁸ K	2,723	3,782000E-02	3,032014E-02	1,983041E+01
LINAC	6,000	9,722000E-02	8,041673E-02	1,728376E+01
	9,000	1,579000E-01	1,327949E-01	1,589937E+01
	12,000	2,222000E-01	1,892662E-01	1,482169E+01
	15,000	2,887000E-01	2,488263E-01	1,381147E+01
	18,000	3,570000E-01	3,108692E-01	1,292179E+01
	21,000	4,265000E-01	3,749886E-01	1,207770E+01

Çizelge 4.37. Kas için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe- Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,299000E-03	1,571523E-03	2,735563
¹⁸ F	0,634	8,490000E-03	5,679726E-03	1,494790
⁶⁴ Cu	0,653	8,688000E-03	5,855430E-03	1,483751
⁵⁷ Co	0,699	9,175000E-03	6,286240E-03	1,459537
¹¹ C	0,960	1,214000E-02	8,863893E-03	1,369601
⁴⁵ Ti	1,040	1,311000E-02	9,695205E-03	1,352215
¹³ N	1,198	1,511000E-02	1,138779E-02	1,326860
¹⁵ O	1,732	2,245000E-02	1,753932E-02	1,279981
⁶⁸ Ga	1,899	2,491000E-02	1,958109E-02	1,272146
¹²⁴ I	2,136	2,849000E-02	2,256243E-02	1,262719
³⁸ K	2,723	3,782000E-02	3,032014E-02	1,247356
LINAC	6,000	9,722000E-02	8,041673E-02	1,208952
	9,000	1,579000E-01	1,327949E-01	1,189052
	12,000	2,222000E-01	1,892662E-01	1,174008
	15,000	2,887000E-01	2,488263E-01	1,160247
	18,000	3,570000E-01	3,108692E-01	1,148393
	21,000	4,265000E-01	3,749886E-01	1,137368

Çizelge 4.38. Kas için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	I*	Klasik Tsoulfanidis (B1) (MeV.cm ² /g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	75,259435	3,292302E-03	3,292500E-03
¹⁸ F	0,634	75,261716	9,038325E-03	9,038822E-03
⁶⁴ Cu	0,653	75,261722	9,270446E-03	9,270954E-03
⁵⁷ Co	0,699	75,261735	9,837064E-03	9,837599E-03
¹¹ C	0,960	75,261776	1,316399E-02	1,316468E-02
⁴⁵ Ti	1,040	75,261784	1,421745E-02	1,421819E-02
¹³ N	1,198	75,261794	1,633795E-02	1,633878E-02
¹⁵ O	1,732	75,261810	2,382607E-02	2,382723E-02
⁶⁸ Ga	1,899	75,261813	2,625096E-02	2,625221E-02
¹²⁴ I	2,136	75,261815	2,974808E-02	2,974948E-02
³⁸ K	2,723	75,261819	3,864772E-02	3,864948E-02
LINAC	6,000	75,261825	9,221919E-02	9,222301E-02
	9,000	75,261825	1,446328E-01	1,446385E-01
	12,000	75,261826	1,990224E-01	1,990300E-01
	15,000	75,261826	2,548615E-01	2,548710E-01
	18,000	75,261826	3,118478E-01	3,118592E-01
	21,000	75,261826	3,697840E-01	3,697973E-01

Çizelge 4.39. Kas için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

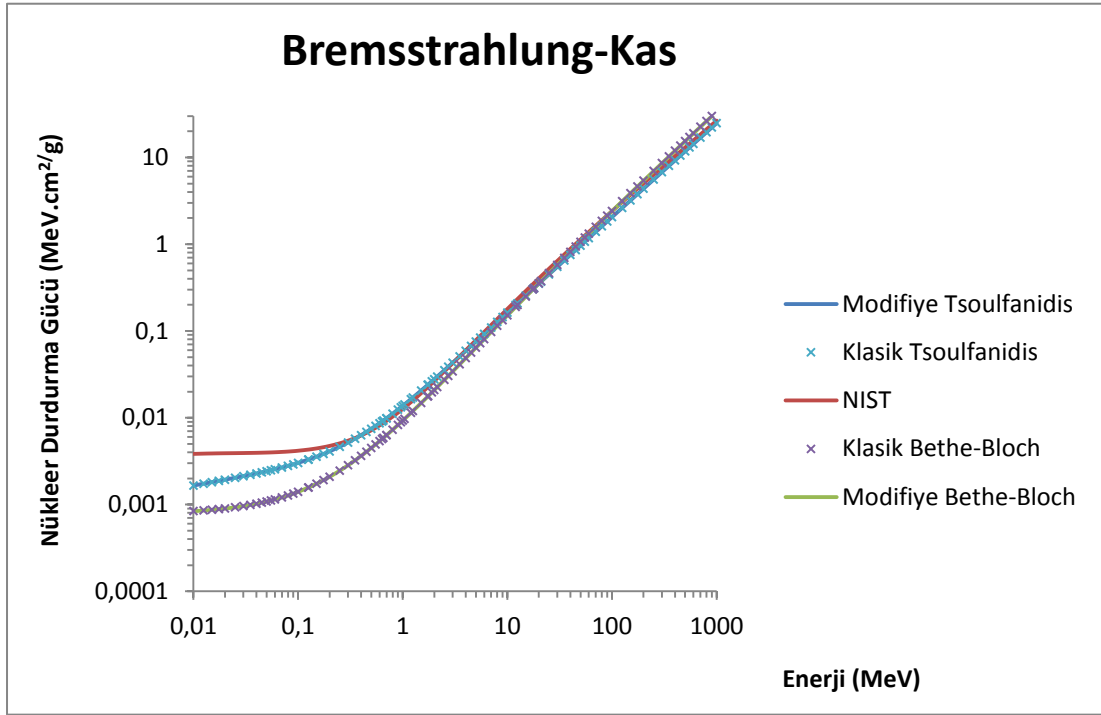
	Enerji (MeV)	Z*	Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $\% \text{ fark} = \left(\frac{B2-B1}{B2} \right) \times 100$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,569960	6,013667E-03
¹⁸ F	0,634	6,569998	5,498504E-03
⁶⁴ Cu	0,653	6,569998	5,479479E-03
⁵⁷ Co	0,699	6,569999	5,438319E-03
¹¹ C	0,960	6,569999	5,241297E-03
⁴⁵ Ti	1,040	6,569999	5,204601E-03
¹³ N	1,198	6,570000	5,079939E-03
¹⁵ O	1,732	6,570000	4,868380E-03
⁶⁸ Ga	1,899	6,570000	4,761504E-03
¹²⁴ I	2,136	6,570000	4,705965E-03
³⁸ K	2,723	6,570000	4,553748E-03
LINAC	6,000	6,570000	4,142133E-03
	9,000	6,570000	3,940859E-03
	12,000	6,570000	3,818520E-03
	15,000	6,570000	3,727376E-03
	18,000	6,570000	3,655496E-03
	21,000	6,570000	3,596565E-03

Çizelge 4.40. Kas için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,299000E-03	3,292500E-03	2,341242E+01
¹⁸ F	0,634	8,490000E-03	9,038822E-03	-6,464335E+00
⁶⁴ Cu	0,653	8,688000E-03	9,270954E-03	-6,709876E+00
⁵⁷ Co	0,699	9,175000E-03	9,837599E-03	-7,221787E+00
¹¹ C	0,960	1,214000E-02	1,316468E-02	-8,440527E+00
⁴⁵ Ti	1,040	1,311000E-02	1,421819E-02	-8,453013E+00
¹³ N	1,198	1,511000E-02	1,633878E-02	-8,132230E+00
¹⁵ O	1,732	2,245000E-02	2,382723E-02	-6,134655E+00
⁶⁸ Ga	1,899	2,491000E-02	2,625221E-02	-5,388238E+00
¹²⁴ I	2,136	2,849000E-02	2,974948E-02	-4,420779E+00
³⁸ K	2,723	3,782000E-02	3,864948E-02	-2,193231E+00
LINAC	6,000	9,722000E-02	9,222301E-02	5,139879E+00
	9,000	1,579000E-01	1,446385E-01	8,398670E+00
	12,000	2,222000E-01	1,990300E-01	1,042754E+01
	15,000	2,887000E-01	2,548710E-01	1,171770E+01
	18,000	3,570000E-01	3,118592E-01	1,264448E+01
	21,000	4,265000E-01	3,697973E-01	1,329489E+01

Çizelge 4.41. Kas için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	4,299000E-03	3,292500E-03	1,305695
¹⁸ F	0,634	8,490000E-03	9,038822E-03	0,939282
⁶⁴ Cu	0,653	8,688000E-03	9,270954E-03	0,937120
⁵⁷ Co	0,699	9,175000E-03	9,837599E-03	0,932646
¹¹ C	0,960	1,214000E-02	1,316468E-02	0,922164
⁴⁵ Ti	1,040	1,311000E-02	1,421819E-02	0,922058
¹³ N	1,198	1,511000E-02	1,633878E-02	0,924794
¹⁵ O	1,732	2,245000E-02	2,382723E-02	0,942199
⁶⁸ Ga	1,899	2,491000E-02	2,625221E-02	0,948872
¹²⁴ I	2,136	2,849000E-02	2,974948E-02	0,957664
³⁸ K	2,723	3,782000E-02	3,864948E-02	0,978538
LINAC	6,000	9,722000E-02	9,222301E-02	1,054184
	9,000	1,579000E-01	1,446385E-01	1,091687
	12,000	2,222000E-01	1,990300E-01	1,116415
	15,000	2,887000E-01	2,548710E-01	1,132730
	18,000	3,570000E-01	3,118592E-01	1,144747
	21,000	4,265000E-01	3,697973E-01	1,153335



Şekil 4.5. Kas için, nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği

4.5. Kortikal Kemik

Çizelge 4.42. Kortikal kemiğin içeriği ve özelliği

Yoğunluk (g/cm³)		1,85000E+00
Ortalama İyonizasyon Enerjisi		106,400000 eV
Bileşimi		
Atom Numarası		Yüzde Ağırlık Oranı
H	1	0,0472340
C	6	0,1443300
N	7	0,0419900
O	8	0,4460960
Mg	12	0,0022000
P	15	0,1049700
S	16	0,0031500
Ca	20	0,2099300
Zn	30	0,0001000

Çizelge 4.43.Kortikal Kemik için; Klasik ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	Z*	Klasik Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)	Modifiye Bethe- Bloch (MeV.cm ² /g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	10,179801	2,506513E-03	2,506415E-03
¹⁸ F	0,634	10,179992	9,058815E-03	9,058801E-03
⁶⁴ Cu	0,653	10,179992	9,339053E-03	9,339039E-03
⁵⁷ Co	0,699	10,179993	1,002617E-02	1,002615E-02
¹¹ C	0,960	10,179997	1,413736E-02	1,413735E-02
⁴⁵ Ti	1,040	10,179997	1,546325E-02	1,546324E-02
¹³ N	1,198	10,179998	1,816282E-02	1,816282E-02
¹⁵ O	1,732	10,179999	2,797413E-02	2,797413E-02
⁶⁸ Ga	1,899	10,179999	3,123062E-02	3,123062E-02
¹²⁴ I	2,136	10,179999	3,598569E-02	3,598568E-02
³⁸ K	2,723	10,180000	4,835875E-02	4,835875E-02
LINAC	6,000	10,180000	1,282597E-01	1,282597E-01
	9,000	10,180000	2,117996E-01	2,117996E-01
	12,000	10,180000	3,018679E-01	3,018679E-01
	15,000	10,180000	3,968625E-01	3,968625E-01
	18,000	10,180000	4,958171E-01	4,958171E-01
	21,000	10,180000	5,980835E-01	5,980835E-01

Çizelge 4.44. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe-Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Bethe-Bloch arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,537000E-03	2,506415E-03	6,165802E+01
¹⁸ F	0,634	1,243000E-02	9,058801E-03	2,712147E+01
⁶⁴ Cu	0,653	1,271000E-02	9,339039E-03	2,652212E+01
⁵⁷ Co	0,699	1,339000E-02	1,002615E-02	2,512211E+01
¹¹ C	0,960	1,756000E-02	1,413735E-02	1,949117E+01
⁴⁵ Ti	1,040	1,893000E-02	1,546324E-02	1,831358E+01
¹³ N	1,198	2,172000E-02	1,816282E-02	1,637744E+01
¹⁵ O	1,732	3,201000E-02	2,797413E-02	1,260815E+01
⁶⁸ Ga	1,899	3,543000E-02	3,123062E-02	1,185261E+01
¹²⁴ I	2,136	4,044000E-02	3,598568E-02	1,101464E+01
³⁸ K	2,723	5,343000E-02	4,835875E-02	9,491391E+00
LINAC	6,000	1,355000E-01	1,282597E-01	5,343395E+00
	9,000	2,188000E-01	2,117996E-01	3,199452E+00
	12,000	3,065000E-01	3,018679E-01	1,511289E+00
	15,000	3,971000E-01	3,968625E-01	5,980861E-02
	18,000	4,898000E-01	4,958171E-01	-1,228481E+00
	21,000	5,841000E-01	5,980835E-01	-2,394025E+00

Çizelge 4.45. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Bethe-Bloch denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Bethe- Bloch (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,537000E-03	2,506415E-03	2,608108E+00
¹⁸ F	0,634	1,243000E-02	9,058801E-03	1,372146E+00
⁶⁴ Cu	0,653	1,271000E-02	9,339039E-03	1,360954E+00
⁵⁷ Co	0,699	1,339000E-02	1,002615E-02	1,335508E+00
¹¹ C	0,960	1,756000E-02	1,413735E-02	1,242100E+00
⁴⁵ Ti	1,040	1,893000E-02	1,546324E-02	1,224194E+00
¹³ N	1,198	2,172000E-02	1,816282E-02	1,195850E+00
¹⁵ O	1,732	3,201000E-02	2,797413E-02	1,144272E+00
⁶⁸ Ga	1,899	3,543000E-02	3,123062E-02	1,134464E+00
¹²⁴ I	2,136	4,044000E-02	3,598568E-02	1,123780E+00
³⁸ K	2,723	5,343000E-02	4,835875E-02	1,104867E+00
LINAC	6,000	1,355000E-01	1,282597E-01	1,056450E+00
	9,000	2,188000E-01	2,117996E-01	1,033052E+00
	12,000	3,065000E-01	3,018679E-01	1,015345E+00
	15,000	3,971000E-01	3,968625E-01	1,000598E+00
	18,000	4,898000E-01	4,958171E-01	9,878643E-01
	21,000	5,841000E-01	5,980835E-01	9,766195E-01

Çizelge 4.46. Kortikal Kemik için; Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung sonuçları

	Enerji (MeV)	I*	Klasik Tsoulfanidis (B1) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)
¹⁰⁹ Cd	0,126	1,063359E+02	5,008053E-03	5,008281E-03
¹⁸ F	0,634	1,063456E+02	1,387137E-02	1,387215E-02
⁶⁴ Cu	0,653	1,063456E+02	1,422976E-02	1,423056E-02
⁵⁷ Co	0,699	1,063457E+02	1,510472E-02	1,510556E-02
¹¹ C	0,960	1,063458E+02	2,024529E-02	2,024638E-02
⁴⁵ Ti	1,040	1,063459E+02	2,187401E-02	2,187518E-02
¹³ N	1,198	1,063459E+02	2,515366E-02	2,515498E-02
¹⁵ O	1,732	1,063460E+02	3,674536E-02	3,674720E-02
⁶⁸ Ga	1,899	1,063460E+02	4,050183E-02	4,050383E-02
¹²⁴ I	2,136	1,063460E+02	4,592122E-02	4,592345E-02
³⁸ K	2,723	1,063460E+02	5,972100E-02	5,972382E-02
LINAC	6,000	1,063461E+02	1,429339E-01	1,429400E-01
	9,000	1,063461E+02	2,244759E-01	2,244850E-01
	12,000	1,063461E+02	3,091658E-01	3,091780E-01
	15,000	1,063461E+02	3,961662E-01	3,961813E-01
	18,000	1,063461E+02	4,849953E-01	4,850134E-01
	21,000	1,063461E+02	5,753390E-01	5,753602E-01

Çizelge 4.47. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

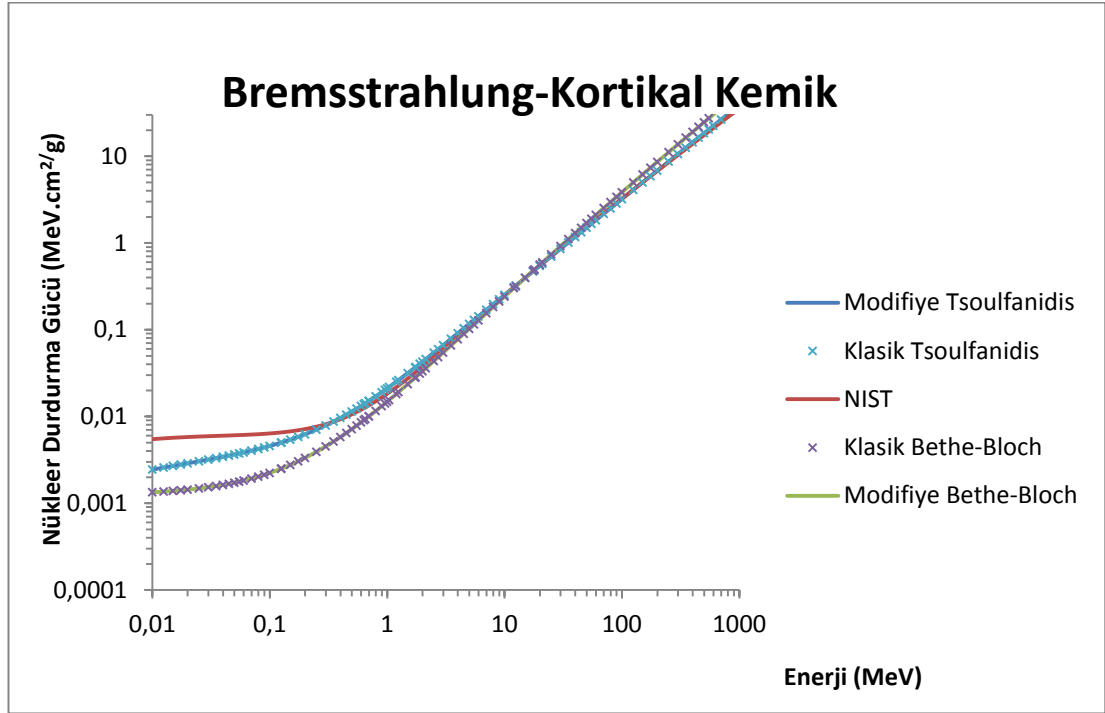
	Enerji (MeV)	Z*	Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $\% \text{ fark} = \left(\frac{B2-B1}{B2} \right) \times 100$
¹⁰⁹ Cd	0,126	10,179801	4,552460E-03
¹⁸ F	0,634	10,179992	5,622777E-03
⁶⁴ Cu	0,653	10,179992	5,621704E-03
⁵⁷ Co	0,699	10,179993	5,560866E-03
¹¹ C	0,960	10,179997	5,383678E-03
⁴⁵ Ti	1,040	10,179997	5,348527E-03
¹³ N	1,198	10,179998	5,247470E-03
¹⁵ O	1,732	10,179999	5,007184E-03
⁶⁸ Ga	1,899	10,179999	4,937805E-03
¹²⁴ I	2,136	10,179999	4,855907E-03
³⁸ K	2,723	10,180000	4,721734E-03
LINAC	6,000	10,180000	4,267525E-03
	9,000	10,180000	4,053723E-03
	12,000	10,180000	3,945947E-03
	15,000	10,180000	3,811386E-03
	18,000	10,180000	3,731856E-03
	21,000	10,180000	3,684648E-03

Çizelge 4.48.Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri arasındaki yüzde fark değişimi

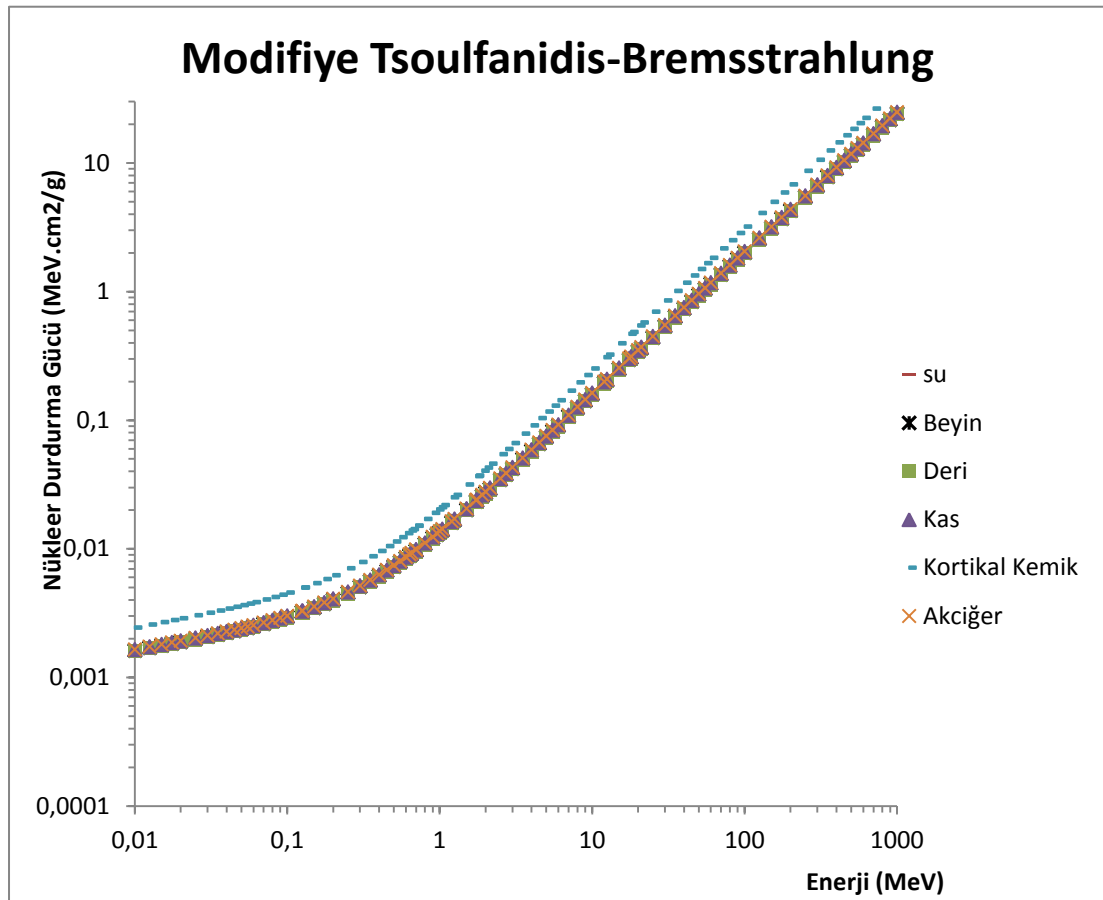
	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	NIST ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark $[\frac{(NIST-B2)}{NIST} \times 100]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,537000E-03	5,008281E-03	2,338564E+01
¹⁸ F	0,634	1,243000E-02	1,387215E-02	-1,160217E+01
⁶⁴ Cu	0,653	1,271000E-02	1,423056E-02	-1,196349E+01
⁵⁷ Co	0,699	1,339000E-02	1,510556E-02	-1,281225E+01
¹¹ C	0,960	1,756000E-02	2,024638E-02	-1,529829E+01
⁴⁵ Ti	1,040	1,893000E-02	2,187518E-02	-1,555827E+01
¹³ N	1,198	2,172000E-02	2,515498E-02	-1,581483E+01
¹⁵ O	1,732	3,201000E-02	3,674720E-02	-1,479913E+01
⁶⁸ Ga	1,899	3,543000E-02	4,050383E-02	-1,432072E+01
¹²⁴ I	2,136	4,044000E-02	4,592345E-02	-1,355947E+01
³⁸ K	2,723	5,343000E-02	5,972382E-02	-1,177956E+01
LINAC	6,000	1,355000E-01	1,429400E-01	-5,490775E+00
	9,000	2,188000E-01	2,244850E-01	-2,598263E+00
	12,000	3,065000E-01	3,091780E-01	-8,737357E-01
	15,000	3,971000E-01	3,961813E-01	2,313523E-01
	18,000	4,898000E-01	4,850134E-01	9,772560E-01
	21,000	5,841000E-01	5,753602E-01	1,496285E+00

Çizelge 4.49. Kortikal Kemik için, NIST ve Modifiye Tsoulfanidis denkleminde elde edilen Bremsstrahlung değerleri oranı

	Enerji (MeV)	NIST (ESTAR) (MeV.cm²/g)	Modifiye Tsoulfanidis (B2) (MeV.cm²/g)	$\left[\frac{(NIST)}{B2}\right]$
¹⁰⁹ Cd	0,126	6,537000E-03	5,008281E-03	1,305238
¹⁸ F	0,634	1,243000E-02	1,387215E-02	0,896040
⁶⁴ Cu	0,653	1,271000E-02	1,423056E-02	0,893148
⁵⁷ Co	0,699	1,339000E-02	1,510556E-02	0,886429
¹¹ C	0,960	1,756000E-02	2,024638E-02	0,867316
⁴⁵ Ti	1,040	1,893000E-02	2,187518E-02	0,865364
¹³ N	1,198	2,172000E-02	2,515498E-02	0,863447
¹⁵ O	1,732	3,201000E-02	3,674720E-02	0,871087
⁶⁸ Ga	1,899	3,543000E-02	4,050383E-02	0,874732
¹²⁴ I	2,136	4,044000E-02	4,592345E-02	0,880596
³⁸ K	2,723	5,343000E-02	5,972382E-02	0,894618
LINAC	6,000	1,355000E-01	1,429400E-01	0,947950
	9,000	2,188000E-01	2,244850E-01	0,974675
	12,000	3,065000E-01	3,091780E-01	0,991338
	15,000	3,971000E-01	3,961813E-01	1,002319
	18,000	4,898000E-01	4,850134E-01	1,009869
	21,000	5,841000E-01	5,753602E-01	1,015190



Şekil 4.6. Kortikal Kemik için, nükleer durdurma gücünün elektron enerjisine bağlı değişim grafiği



Şekil 4.7. Su, Beyin, Deri, Kas, Kortikal Kemik, Akciğer için Modifiye Tsoulfanidis'ten elde edilen nükleer durdurma gücü'nün enerjiye bağlı değişimi

Şekil 4.7' de modifiye Tsoulfanidis'ten elde edilen Bremsstrahlung değerlerinin tüm hedef materyaller için enerjiye bağlı değişimi görülmektedir. Hedef materyaller olan su, beyin, deri, kas ve akciğerin Z^* , A_{ort} , I^* değerleri birbirlerine çok yakın olduklarından şekilde görüldüğü gibi bu hedef materyallerin grafikleri üst üste çakışmaktadır. Ancak hedef materyal olan Kortikal Kemik diğer hedeflere göre Z^* , A_{ort} ve I^* değerleri daha büyük olduğundan Kortikal Kemik için çizilen grafik diğerlerinden farklılık gösterdiği gözlenmektedir.

Bu çalışmada biyolojik hedefler olan akciğer, beyin, deri, kas, kortikal kemik ve biyolojik benzerliğinden dolayı su kullanılmıştır. Suyun etkin atom numarası, ortalama kütle numarası, yoğunluk, ortalama uyarma enerjisi biyolojik hedeflerle benzerlik göstermektedir.

Hesaplamalar; 0,01 MeV ve 1000 MeV enerji aralığında Tsoufanidis(1995), Bethe Bloch (1930) eşitliği modifiye edilerek yapılmıştır ve sonuçlar klasik Bethe Bloch ve klasik Tsoufanidis eşitliği kullanılarak National Institute of Standards and Technology [ESTAR, 2009]'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, pozitron emisyon tomografi (PET)' de kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan radyoizotoplardan yayınlanan pozitronların ve LINAC'tan çıkan elektronların 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 15 MeV, 18 MeV, 21 MeV enerji değerlerindeki hesaplama sonuçları ilgili tablolarda gösterilmiştir. Bu eşitliklerden kullanılan ortalama uyarma enerjisi, yoğunluk değerleri National Institute of Standards and Technology [Estar, 2009]' den alınmıştır.

Pozitronlar, elektronlar ile hemen hemen aynı kütleye ve yük değerlerine sahiptirler. Pozitronların hedef içinde durdurulma mekanizması, elektronunkilere benzerlik gösterir, yaklaşık 1 keV' in üzerindeki enerjilerde, enerji kaybı elektronlar ve pozitronlar için benzerdir (Pimblott ve ark., 2000).

Çalışmamızda;

Klasik Bethe- Bloch (Bethe, 1930) eşitliklerinde hedef materyaller için etkin atom numarası ve ortalama kütle numarası kullanılmıştır. Modifiye Bethe- Bloch eşitliğinde modifiye edilmiş Z^* , z^* parametresi ve A_{ort} kullanılmıştır. Her iki eşitliklerden elde edilen verilerde bir farklılık gözlenmemesi ile Bethe- Bloch (Bethe, 1930) eşitliğinin elementlerde daha uygun sonuç verdiği düşünülebilir.

Klasik ve Modifiye Bethe Bloch eşitliklerinden elde edilen nükleer durdurma gücü (Bremsstrahlung) verilerinin enerji arttıkça arttığı gözlenmektedir.

NIST ve Modifiye Bethe Bloch arasındaki yüzde fark değişimin ve NIST verilerinin Modifiye Bethe- Bloch verilerine oranının enerji arttıkça azaldığı gözlenmektedir.

Klasik Tsoulfanidis eşitliklerinde hedef materyaller için etkin atom numarası ve ortalama kütle numarası kullanılmıştır. Modifiye Tsoulfanidis eşitliğinde modifiye edilmiş Z^* , z^* ve I^* parametresi ve A_{ort} kullanılmıştır.

Klasik Tsoulfanidis (Tsoulfanidis 1995) ve Modifiye Tsoulfanidis eşitliklerinden hedef materyaller olan su, akciğer, beyin, deri, kas, kortikal kemik için elde edilen nükleer durdurma gücü verilerinin enerji arttıkça arttığı gözlenmektedir.

Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis arasındaki yüzde fark değişimi tıpta kullanılan ve kullanılması araştırma aşamasında olan radyoizotoplardan yayınlanan pozitronların enerji değerlerinde ve tedavide kullanılan LINAC cihazından elde edilen elektronların enerji değerlerinde enerji arttıkça azaldığı gözlenmektedir.

NIST verileriyle Modifiye Tsoulfanidis' ten elde edilen veriler arasındaki yüzde fark değişimin ve NIST verileriyle Modifiye Tsoulfanidis' ten elde edilen verilerin oranının LINAC enerji değerlerinde arttığı gözlenmektedir.

Diğer hedef materyallardan farklı olarak Z , A ve I değerlerinin daha büyük olması sebebiyle kortikal kemikte elde edilen nükleer durdurma gücü (Bremsstrahlung) değerinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Klasik Bethe-Bloch (Bethe, 1930), Modifiye Bethe- Bloch, Klasik Tsoulfanidis (Tsoulfanidis, 1995) ve Modifiye Tsoulfanidis'ten elde edilen 0,01 MeV-1000 MeV enerji aralığında hedef materyaller olan su, akciğer, beyin, deri, kas ve kortikal kemik için nükleer durdurma gücünün enerjiye bağlı grafikleri çizilmiştir. Çizilen grafiklerde bu dört eşitliklerden elde edilen verilen benzerlikleri ya da farklılıkları gözlenebilir.

1 MeV'den düşük enerji değerlerinde Klasik Tsoulfanidis ve Modifiye Tsoulfanis grafikleri NIST grafiğinden ufak farklılık göstermektedir. Ancak 1 MeV'den yüksek enerji değerlerinde NIST grafiği ile Klasik ve Modifiye Tsoulfanidis grafikleri birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmektedir.

5.TARTIŞMA

Yüksek enerjili (>1 MeV) β - ışınlarıyla β tedavi nükleer tıpta giderek artan bir ilgi olmuştur [Manjunatha ve ark., 2009]. Kemik ve dişin modifiye edilmiş atomik numarası daha büyük olduğundan bremsstrahlung üretimi daha büyüktür [Manjunatha ve ark., 2009]. Biz organdaki bremsstrahlung dozunun önemsiz olmadığını sonuçlandırdık ve frenleme ve bata ışın spektrumunun her ikisinin de birleştirilerek kullanılacağını tahmin ediyoruz [Lawrence ve ark., 1989]. Bir organın frenleme radyasyonu emilimiyle kendisine sağladığı doz beta dozu ile karşılaştırıldığında çok azdır. Ancak organlara sağlanan katkı özellikle kısa mesafe ve yüksek enerjili ışınlamalarda her zaman ihmal edilebilir düzeyde değildir [Michael ve ark., 1994]. Sonuç olarak frenleme radyasyonu yüksek enerjili beta kaynaklarında kısa aralıklı ışınlamalarda hasta dozimetresine önemli etkiler sağlayabilir [Lawrence ve ark 1989]. Tüm bu bilgiler ışığında ve atomik numarası yüksek olan kortikal kemikte daha fazla Bremsstrahlung üretildiği düşünüldüğünde Bremsstrahlung' un (Frenleme Işını) ihmal edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

Akar, A., "Bazı biyolojik materyallerde enerji transferi ve durdurma gücü", Doktora Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 8-9 (2005).

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

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

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

Bethe, H.A. (1930). Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie, Ann. d. Physik **5**, 325.

Cabrera-Trujillo, R., Cruz, S.A., Oddreshede, J., Sabin, J.R., 1997. Bethe theory of stopping incorporating electronic excitations of partially stripped projectiles. Phys. Rev. A **55**, 2864-2872 (Erratum: 1999, vol. 59, p. 4850).

Göker, İ., "Biyolojik hedeflerin, pozitron emisyon tomografi (PET)'de kullanılan izotoplar için durdurma gücü hesabı", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara 13 (2010).

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

Gümüş, H., Köksal, F., 2002. Effective stopping charges and stopping power calculations for heavy ions. Radiat. Eff. Defects Solids **157**, 445-458.

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

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

James, E. Martin, "Physics for Radiation Protection" *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KgaA* 160-163 (2006).

Krane, K.S., "Nükleer Fizik, 1. cilt", Şarer, B., *Palme Yayıncılık*, 196-197, 272 (2006).

Khan, Faiz., "The Physics of Radiation Therapy", *Lippincott Williams & Wilkins*, 21-22-23 (1993).

Levin, C.,S., Hoffman, E.J., "Calculation of positron range and its effect on the fundamental limit of positron emission tomography system spatial resolution", *Phys. Med.Biol.*, 44(3): 781-799 (1999).

Lagunas-Solar Manuel C. Cavacho. O.F.. "Cyclotron production of pet radionuclides : no-carrier-added fluorine-18 with high-energy photons on natural neon gas targets" *Appl Radiat Isot.* 46(9):833-8 (1995).

Maiti. D.K.. Chakraborty. P.K..Chugan. D.C..Muzik. O.. Mangner. T.J.. Chugani. H.T.. "Synthesis procedure for routine production of [carbonyl-11C]desmethyl-way-100635" *Appl Radiat Isot* .62(5):721-7 (2005).

Manjunatha, H.C., Rudraswamy B., "Exposure of bremsstrahlung from beta-emitting therapeutic radionuclides" *Radiation Measurements*, 44, 206 – 210 (2009).

Michael G. Stabin, Keith F. Eckerman, Jeffrey C. Ryman and Lawrence E. Williams "Bremsstrahlung Radiation Dose in Yttrium-90 Therapy Applications *The Journal of Nuclear Medicine* 35:1377-1380

Lawrence E. Williams, Jeffrey Y.C. Wong, David O. Findley, Bruce W. Forell "Measurement and Estimation of Organ Bremsstrahlung Radiation Dose" *The Journal of Nuclear Medicine*, 1373-1377 (1989).

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

Pimblott, S.M., LaVerne Jay A., 'New mechanism for H₂ information in water', *J.Chem.,A*, 104(44):9820-9822 (2000).

Robert, A.D.. Daniel. L.C.. Nickles. R.J.. "A high power target for the production of [18F] fluoride". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 99(1-4): 797-799 (1995).

Saha, G.B.. MacIntyre. W.J.. " Cyclotrons and positron emission tomography radiopharmaceuticals for imaging ". *Semin Nucl Med.* 22(3) :150-61 (1992).

Seltzer, S.M., Berger, M.J., "Density effect for the ionization loss charged particles in various substances" ,*Physical Review* , 26(11):6067-6076 (1982).

Seltzer, S.M., Berger, M.j., “Improved procedure for calculating the collision stopping power of the elements and compounds for electrons and positrons”, ***Journal Article***, 35(7):665-676 (1984).

Sugiyama, H., 1976. Inner shell corrections to the stopping power Formula of Bethe. J. Phys. Soc. Japan 41 (4): 1339-1343.

Sugiyama,H., 1981. Electronic stopping power formula for intermediate energies. Radiat. Eff. 56, 205-209.

Sugiyama, H. 1985. Stopping power formula for intermediate energy electrons. Phys. Med. Biol. 30 (4), 331-335.

Taylor, H.S., “Models, interpretations, and calculations concerning resonant electron scattering processes in atoms and molecules¹”, ***Advan. Chem. Phs.***, 18: 91-147 (1970).

Tubiana, M., Dutreix, J., Wambersie, A., “IntroductionT Radio biology” ,***Taylor & Francis***, London, 274-301 (1990).

Tsoufanidis, N., “Measurement and Detection of Radiation, ‘nd Ed.” , Williams, C., E., Edwards, C., ***Times Roman by Technical Typesetting Inc.***, USA, 88-89 (1995).

Tietz, T., 1956. Atomic energy levels fort he approximate Thomas-Fermi potential. J. Chem. Phys. 25, 789-790.

Volkovitsky, P., Gilliam. D.M.. “Possible pet isotopes production using linear deuteron acceleretors”. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A***. 548(3) : 571-573 (2005).

William, R.,L., “Techniques For Nuclear and Particle Physics Experiments,2nd Ed.”,***Springer Letter***, Berlin, 1-2 (1994).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÖMSÖKEN, Metin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri :15.10.1982 Ankara
Medeni hali : Bekar
e-mail : metinkomsoken@gmail.com

Eğitim

Derece

Lisans

Eğitim Birimi

Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü

Mezuniyet Tarihi

2009

Lise

Mobil Lisesi

2000

İş Deneyimi

Yıl

2011-2012

Yer

T.C. Sağlık Bakanlığı Atatürk
Göğüs Hastalıkları ve Göğüs Cerrahisi
Eğitim ve Araştırma Hastanesi

Görev

Stajer

Yabancı Dil

İngilizce