

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TARLA İÇİN YÜKSEK GÜÇLÜ ELEKTRON DEMET DURDURUCUSUNUN
FİZİĞİ VE TASARIMI**

Denizhan ERENLER

**NÜKLEER ARAŞTIRMALAR VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

**ANKARA
2019**

Her hakkı saklıdır

Denizhan ERENLER tarafından hazırlanan “**TARLA İçin Yüksek Gcl Elektron Demet Durdurucusunun Fiziği ve Tasarımı**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Avni AKSOY

Jüri yeleri:

Prof. Dr. Pervin ARIKAN
Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

Prof. Dr. Orhan ÇAKIR
Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü


Doç. Dr. Avni AKSOY
Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Niyazi MERİÇ
Enstitü Müdürü

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

Adı Soyadı: Denizhan Erenler

İmza: 

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TARLA İÇİN YÜKSEK GÜÇLÜ ELEKTRON DEMET DURDURUCUSUNUN FİZİĞİ VE TASARIMI

Denizhan ERENLER

**Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
Nükleer Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı
Hızlandırıcı ve Dedektör Teknolojileri Yüksek Lisans Programı**

Danışman: Doç. Dr. Avni AKSOY

Demet durdurucular, parçacık hızlandırıcılarda parçacık demetlerinin hareketlerine son verilmek istendiğinde kullanılan sistemlerdir. Bir demet durdurucusunun fonksiyonel olarak işletilebilir olması için; sistemin ısıl, nükleer, mekanik özellikleri önem arz etmektedir. Yüksek enerjili parçacık demetleri durdurucuya çarptığında sahip oldukları enerjii sisteme aktaracaktır. Bu durum ise durdurucuyu ısıtacak ve radyoaktif hale getirecektir. Diğer yandan karmaşık yapıda olan demet durdurucularını oluşturmak için kullanılan tüm bileşenler, mekanik olarak imal edilebilir ve değiştirilebilir nitelikte olmalıdır.

Bu tez çalışmasında Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü bünyesinde kurulumu devam eden TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara) Tesisi için yüksek güçlü elektron demet durdurucusunun, nükleer fizik etkileşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada nükleer etkileşimler ve radyoaktif özellikler ön planda tutulmuş, mekanik tasarımın ayrıntısına girilmemiştir. Tasarım aşamasında Monte-Carlo Metodu'nu esas alarak çalışan FLUKA ve Geant4 simülasyon programları kullanılmış, demet durdurucusunun çekirdek malzemesi için alüminyum, bakır, karbon malzemeleri ve varyasyonları; zırhlama için kurşun, beton malzemeleri ve varyasyonları farklı geometriler ile denenmiştir.

2019, 72 sayfa

Anahtar Kelimeler: Demet Durdurucu, Nükleer Aktivasyon ve Zırhlama, Fluka, Geant4

ABSTRACT

Master's Thesis

PHYSICS DESIGN OF HIGH POWER ELECTRON BEAM DUMP FOR TARLA

Denizhan ERENLER

**Ankara University
Institute of Nuclear Sciences**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Avni AKSOY

Beam dumps are systems that are used in particle accelerators when it is desired to stop the movement of the particle beams. For a beam dump to be functionally operable; thermal, nuclear, mechanical properties of the system are important. When the high energy particle beams hit to the dump, they will transfer their energy to the system. Thus will heat up the dump and make it radioactive. On the other hand, all components used to form the beam dumps of the complex structure must be mechanically manufactured and interchangeable.

In this thesis, the design aspects of high power electron beam dump for the TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara) Facility -under construction at Institute of Accelerator Technologies of Ankara University- were discussed. Nuclear interactions and radioactive properties were prioritized in the study and no mechanical design was detailed. FLUKA and Geant4 simulation programs were used in the design phase based on the Monte-Carlo method, aluminum, copper, carbon materials and their variations for the core material of the beam dump; lead, concrete materials and their variations for shielding were tested with different geometries.

2019, 72 pages

Key Words: Beam Dump, Nuclear Activation and Shielding, Fluka, Geant4

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmada her konuda bana yardım eden danıőmanım Doç. Dr. Avni AKSOY'a, tez sűresince desteklerini benden hiçbir Őekilde esirgemeyen Sinem YİĞİT, Emre COŐGUN, Selen NİĞDELİOĞLU, Mehmet YILDIZ ve Melike KAYA'ya ve ayrıca tűm çalıőma ve iő arkadaőlarıma, en ۆnemlisi de hayallerimi gerçekleőtirme yolunda koőulsuzca yanımda olan annem AŐkın SABİR ve kardeőim Berkcan ERENLER'e emekleri ve sabırları için sonsuz teőekkűrler.

Denizhan ERENLER

Ankara, Ocak 2019

İÇİNDEKİLER

1.	GİRİŞ	1
2.	KURAMSAL TEMELLER	2
2.1	Hızlandırıcı Tarihçesi ve Temelleri	2
2.2	Radyoaktivite ve Radyasyon	6
2.2.1	Üstel Bozunum Yasası	8
2.2.2	Radyoaktivite Birimleri	10
2.3	Doğal Radyasyonlar	10
2.3.1	Alfa Bozunumu	10
2.3.2	Beta Bozunumu	12
2.3.3	Gama Bozunumu	14
2.3.4	İç Dönüşüm (İD)	15
2.4	Yapay Radyasyonlar	16
2.4.1	Eş Zamanlı Fisyon	16
2.4.2	Nötron Reaksiyonları	16
2.5	Tesir Kesiti	16
2.6	Yüklü Hafif Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri	18
2.6.1	Parçacıkların Enerji Kaybı	18
2.6.2	Çarpışma Durdurma Gücü	20
2.6.3	Frenleme Işınımı	23
2.6.4	Menziller	25
2.6.5	Cherenkov Işınımı	26
2.7	Ağır Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi	27
2.7.1	Çarpışma Durdurma Gücü	27
2.7.2	Nükleer Durdurma Gücü	30
2.7.3	Menziller	32

2.8	Fotonların Madde ile Etkileşimleri	34
2.8.1	Fotoelektrik Etki	34
2.8.2	Compton Saçılması.....	35
2.8.3	Çift Oluşumu	37
2.8.4	Frenleme Işınımı Etkileşimleri.....	38
2.8.5	Fotonükleer Tepkimeler	39
3.	ELEKTRON HIZLANDIRICISI VE LAZER TESİSİ (TARLA).....	41
3.1	TARLA hızlandırıcısı.....	43
3.2	Demet Durdurucu.....	45
4.	MATERYAL VE YÖNTEM	48
4.1	Demet Durdurucular.....	48
4.1.1	Durdurma Güçleri.....	49
4.1.2	Isıl Etmeler	51
4.2	Monte Carlo Metodu	52
4.3	FLUKA	52
4.4	GEANT4	53
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	55
5.1	Geometri.....	55
5.2	Malzeme.....	56
5.3	Enerji Depolanması.....	57
5.4	Gama ve Nötron Üretimi.....	61
5.5	Ürün Çekirdekler.....	65
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	68
	KAYNAKLAR	70
	ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Kütle numarası
Å	Angström
A(t)	T süre sonundaki bozunum oranı
A ₀	Başlangıçtaki bozunum oranı
Bq	Becquerel
c	Işık hızı sabiti
C	Coulomb
c _D	Durdurucu malzemesinin özısı katsayısı
Ci	Curie
cm	Santimetre
dσ/dΩ	Diferansiyel tesir kesiti
dσ _{el} /dΩ	Elastik saçılma için diferansiyel tesir kesiti
dΩ	Katı açısı
e	Euler sayısı
E	Toplam enerji
e ⁻ / β ⁻	Elektron
E'	Fırlatılan elektronun toplam enerjisi
e ⁺ / β ⁺	Pozitron
E _b	Bağlanma enerjisi
E _{be}	Elektronun bağlanma enerjisi
E _c	Coulomb bariyer enerjisi
E _{ce}	Fırlatılan elektronun enerjisi
E _e	İç dönüşüm elektronu kinetik enerjisi
E _{fren}	Frenleme ışınımı enerjisi
E _i	İlk nükleer enerji
E _{iyon}	İyonizasyon enerjisi
E _{iβ}	Beta parçacığının başlangıç kinetik enerjisi
E _s	Son nükleer enerji
E _{sβ}	Beta parçacığının son enerjisi
eV	Elektron volt
E _β	Beta parçacığının bağlanma enerjisi
Fm	Femtometre
g	Gram
GeV	Giga elektron volt
Gy	Gray
H	Doz eşdeğerliliği
h	Plank sabiti
hν	Fotonun kinetik enerjisi
hν _{maks}	Maksimum frenleme ışınımı enerji kaybı
I	Malzemenin ortalama uyarılma enerjisi
I ₀	Parçacık akısı
J	Joule

keV	Kilo elektron volt
keV.ps	Kilo elektron volt pikosaniye
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
ln	Doğal logaritma
M	Kütle
m	Metre
M_1	Birinci parçacığın kütlesi
M_2	İkinci parçacığın kütlesi
mA	Miliamper
m_{AP}	Ağır parçacığın kütlesi
M_D	Durdurucu kütlesi
m_e	Elektronun kütlesi
MeV	Mega elektron volt
M_h	Hedef atomun kütlesi
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
mm.mrad	Milimetre miliradyan
m_p	Protonun kütlesi
mrad	Miliradyan
n	Nötron
N	Soğurucu malzemenin 1 metreküpündeki atom sayısı
$N(t)$	T süre sonundaki radyoaktif atom sayısı
N_0	Başlangıçtaki radyoaktif atom sayısı
N_A	Avagadro sayısı
p	Proton
P	Momentum
P'	Fırlatılan elektronun momentumu
pC	Picocoulomb
ps	Picosaniye
Q	Tepkime enerjisi
Q_{maks}	Çarpışma başına maksimum enerji kaybı
Q_{min}	Çarpışma başına minimum enerji kaybı
Q_{ort}	Çarpışma başına ortalama enerji kaybı
$R(T)$	Sürekli yavaşlama yaklaşımı menzili
$R(\beta)$	İstenilen parçacığın menzili
$R_1(\beta)$	Birinci parçacığın menzili
$R_2(\beta)$	İkinci parçacığın menzili
r_e	Klasik elektron yarıçapı
$R_p(\beta)$	Protonun menzili
$S_{çarp}$	Çarpışma durdurma gücü
$S_{ışın}$	Işınımsal durdurma gücü
S_{iyon}	İyonlaşma durdurma gücü
$S_{nükleer}$	Nükleer durdurma gücü
S_p	Proton için çarpışma durdurma gücü

S_{top}	Toplam durdurma gücü
S_{α}	Alfa-parçacığı için çarpışma durdurma gücü
t	Zaman
T	Parçacık kinetik enerjisi
T_{-}	Elektronun kinetik enerjisi
T_{+}	Pozitronun kinetik enerjisi
$t_{1/2}$	Yarı-ömür
T_{AP}	Ağır parçacığın kinetik enerjisi
THz	Terahertz
T_{maks}	Compton Sınırı
T_p	Protonun kinetik enerjisi
V	Volt
v	Hız
$W(Q)$	Çarpışmada kaybedilen enerjinin spektrumu
$W(\theta, T)$	Geri tepme enerjisi
Z	Atom numarası
z	Parçacığın elektriksel yükü
z_1	Birinci parçacığın atom numarası
z_2	İkinci parçacığın atom numarası
z_p	Protonun elektriksel yükü
z_{α}	Alfa-parçacığının elektriksel yükü
α	Alfa parçacığı
γ	Gama parçacığı
Γ	Rölativistik faktör
ΔT_D	Durdurucunun sıcaklık değişimi
ε	Elektron yakalanması
θ	Saçılma açısı
λ	Bozunum sabiti
λ_{min}	Frenleme ışınımı spektrumundaki en kısa dalgaboyu
μ	Birim uzunluk başına çarpışma olasılığı
μ^{+}, μ^{-}	Müon
μm	Mikrometre
μs	Mikrosaniye
ν	Foton frekansı
π^{+}/π^{-}	Pion (yükü)
π^0	Pion (yüksüz)
σ	Tesir kesiti
τ	Karakteristik zaman
ϕ	Geri tepilen elektronun saçılma açısı
β	Görelî faz hızı
ν	Nötrino
$\bar{\nu}$	Antinötrino
ρ	Yoğunluk
CEBAF	Continous Electron Beam Accelerator Facility

CERN	Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
DESY	The Deutsches Elektronen-Synchrotron
DET	Doğrusal Enerji Transferi
EY	Elektron Yakalanması
FLASH	Free Elektron Laser in Hamburg
FLUKA	FLUktuierende KAskade
Geant4	GEometry ANd Tracking 4
İD	İç Dönüşüm
OFHC	Oxygen-Free High thermal Conductivity
RMS	Root Mean Square
SD	Sürekli Dalga
SEL	Serbest Elektron Lazeri
SLC	Standford Linear Collider
SSC	Superconducting Super Collider
SYN	Sürekli Yavaşlama Yaklaşımı
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 400 keV enerjili Cockroft and Walton hızlandırıcısının şematik görünümü (Bryant 1994).	3
Şekil 2.2 Wideroe doğrusal RF hızlandırıcısının şematik görünümü (Bryant 1994).....	4
Şekil 2.3 Alfa-parçacığı bozunması (Leo 1087)	11
Şekil 2.4 Potasyum-40'ın beta bozunması enerji spektrumu (Emfietzoglou vd. 2012)..	13
Şekil 2.5 Elektron yakalanması temsili gösterimi (Basdevant vd. 2005)	14
Şekil 2.6 Cd-109'un iç dönüşüm bozunması (L'Annunziata 2012).....	15
Şekil 2.7 Diferansiyel tesir kesitini tanımlayan diyagram (Satchler 1980)	17
Şekil 2.8 Farklı malzemelerde elektron için doğrusal durdurma gücü grafiği (Emfietzoglou vd. 2012).	21
Şekil 2.9 Atom çekirdeği tarafından saptırılan bir elektronun oluşturduğu frenleme ışınımı.....	24
Şekil 2.10 Farklı malzemelerde elektron için cm biriminde SYY menzili (Emfietzoglou vd. 2012)	26
Şekil 2.11 Çerenkov ışınımı temsili gösterimi (Emfietzoglou vd. 2012)	27
Şekil 2.12 Su, kemik, demir ve kurşun malzemelerinin proton için doğrusal çarpışma durdurma güçleri (Emfietzoglou vd. 2012).....	28
Şekil 2.13 Su, kemik, demir ve kurşun malzemelerinin α -parçacıkları için doğrusal çarpışma durdurma güçleri (Emfietzoglou vd. 2012)	29
Şekil 2.14 Suyun farklı enerjilerdeki protonlar ve α -parçacıkları için durdurma gücü (Emfietzoglou vd. 2012).	31
Şekil 2.15 Farklı enerjilerdeki protonun, su, demir ve kurşun içerisindeki menzilleri (Emfietzoglou vd. 2012)	32
Şekil 2.16 Farklı enerjilerdeki α -parçacıklarının havadaki menzilleri (Emfietzoglou vd. 2012)	33
Şekil 2.17 Fotoelektrik olayının temsili gösterimi (Krane 1988)	35
Şekil 2.18 Compton saçılımı foton ve elektron etkileşimi (Emfietzoglou vd. 2012)	36
Şekil 2.19 Gelen fotonun atomik çekirdek ile etkileşimi sonucunda gerçekleşen çift oluşumu.....	38
Şekil 2.20 Frenleme ışınımı etkileşim ağacı	39
Şekil 3.1 TARLA tesisi şematik görüntüsü (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015)	42

Şekil 3.2 TARLA tesisinin potansiyel kullanım alanları (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015)	43
Şekil 3.3 TARLA Tesisi makine şematiği (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015)	44
Şekil 3.4 Demet durdurucusunun şematik gösterimi	46
Şekil 4.1 TARLA demet durdurucusunun ve parçacık yörüngelerinin Geant4 programı aracılığıyla elde edilen görüntüsü	54
Şekil 5.1 Durdurucu geometrisinin görüntüsü	56
Şekil 5.2 Bakır için durdurucuda depolanan enerjinin FLUKA sonucu	57
Şekil 5.3 Bakır için durdurucuda depolanan enerjinin Geant4 sonucu	58
Şekil 5.4 Alüminyum için durdurucuda depolanan enerjinin FLUKA sonucu	59
Şekil 5.5 Alüminyum için durdurucuda depolanan enerjinin Geant4 sonucu	59
Şekil 5.6 Karbon (Grafit) için durdurucuda depolanan enerjinin FLUKA sonucu	60
Şekil 5.7 Karbon (Grafit) için durdurucuda depolanan enerjinin Geant4 sonucu	61
Şekil 5.8 Bakır malzeme için gama parçacık akış grafiği	62
Şekil 5.9 Alüminyum malzeme için gama parçacık akış grafiği	63
Şekil 5.10 Karbon (Grafit) malzeme için gama parçacık akış grafiği	63
Şekil 5.11 Bakır malzeme için nötron parçacık akış grafiği	64
Şekil 5.12 Alüminyum malzeme için nötron parçacık akış grafiği	64
Şekil 5.13 Karbon (Grafit) malzeme için nötron parçacık akış grafiği	65
Şekil 5.14 Bakır için ürün çekirdekleri	66
Şekil 5.15 Alüminyum için ürün çekirdekleri	66
Şekil 5.16 Karbon (Grafit) için ürün çekirdekleri	67
Şekil 5.17 TARLA haftalık işletim planı	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Radyasyon çeşitleri ve oluştukları yerler (Emfietzoglou vd. 2012)	7
Çizelge 2.2 Suyun, elektron için durdurma gücü parametreleri (Emfietzoglou vd. 2012)	22
Çizelge 2.3 Farklı örnekler için ölçeklendirme kanunu katsayıları (Emfietzoglou vd. 2012)	30
Çizelge 2.4 Nötron üreten (γ , n) tepkimeleri ve enerjileri (Emfietzoglou vd. 2012).....	40
Çizelge 3.1 TARLA tesisi demet parametreleri (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015).....	45
Çizelge 4.1 Önerilen çekirdek malzemelerinin özellikleri.....	49
Çizelge 4.2 Menzil hesabı için gerekli sabitler	49
Çizelge 4.3 Analitik olarak elde edilen sonuçlar	50
Çizelge 4.4 NIST veritabanından alınan durdurma güçleri (https://www.nist.gov/pml , 1998)	50
Çizelge 4.5 Önerilen 3 durdurucu çekirdek malzemesinin ısı karakteristikleri.....	51
Çizelge 6.1 Önerilen durdurucu malzemelerinin karşılaştırılması.....	68

1. GİRİŞ

Parçacık hızlandırıcıları 100 yılı aşkın bir süredir hayatımızın her alanını etkin bir şekilde biçimlendirmektedir. Haberleşme teknolojileri, malzeme bilimi, nükleer fizik, elektronik, spektroskopi teknolojileri, kuramsal fizik, arkeoloji vb. birçok alan parçacık hızlandırıcıları sayesinde çalışılıp, geliştirilmektedir. Bu alanların gelişmesi neticesinde de sahip olduğumuz yüksek teknoloji ürünler ortaya çıkmaktadır.

Parçacık hızlandırıcıları avantajlarının yanısıra karmaşık yapılara sahip olmalarından ötürü belirli zorluklara sahiptir. Ancak bu zorluklar, yukarıda bahsedilen alanlarla uyumlu bir şekilde çalışıldığında aşılmaktadır. Günümüz teknolojisinin en üst seviyesinde olan bu makineler; makine, elektrik-elektronik, yazılım, kuramsal fizik, radyasyon fiziği, kimya, kuantum fiziği vb. birçok alanı tasarım aşamasına dahil ederek ortaya çıkarılırlar. Parçacık hızlandırıcıları her biri ayrı birer çalışma alanı sayılabilecek alt elemanlardan oluşurlar ve bu elemanlar çoklu-disiplin anlayışıyla istenilen hızlandırıcının parametrelerine ve sınırlandırmalarına göre tasarlanırlar.

Bu tez kapsamında; Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü bünyesinde kurulmakta olan TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara) Tesisi'nin, yüksek güçlü elektron demet durdurucusunda gerçekleşen nükleer fizik etkileşimleri FLUKA ve Geant4 programları kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre elektron demet durdurucusunun geometrisi ve yapı malzemeleri, TARLA Tesisi'nin ihtiyaçlarına uygun olarak belirlenmiştir.

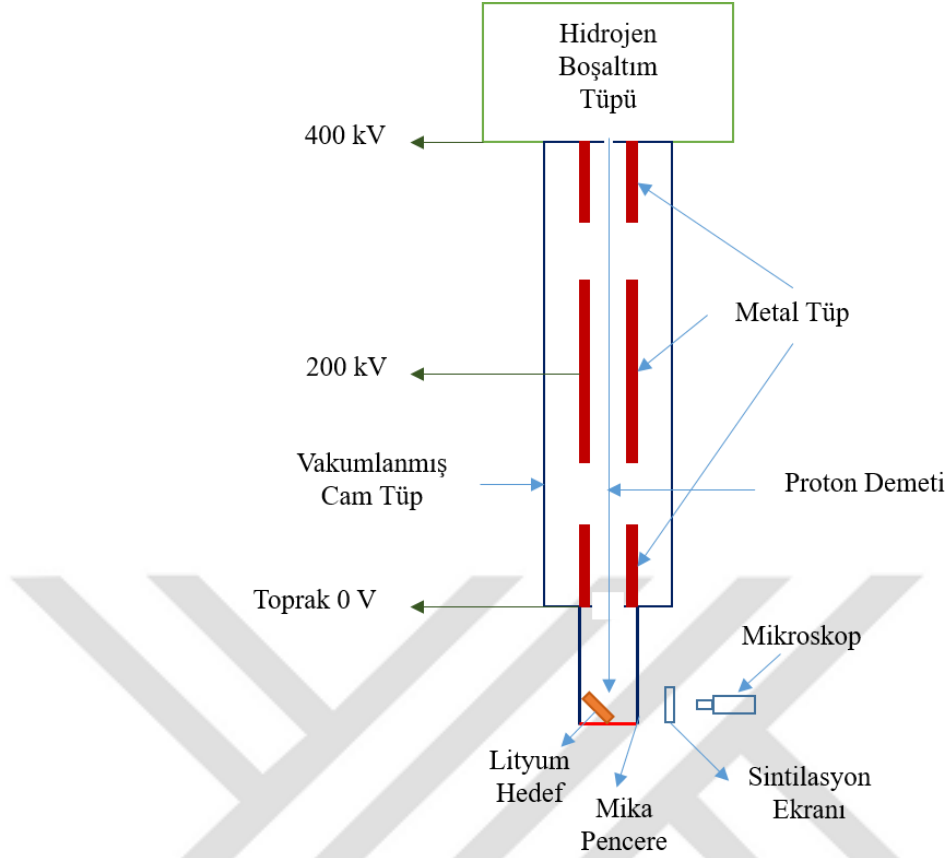
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Hızlandırıcı Tarihçesi ve Temelleri

Hızlandırıcılar Dünya’da son seksen yılın en doğurgan teknolojisidir. Hızlandırıcılardan elde edilen yüksek enerjili parçacıklar ve barındırdığı teknolojiler ile hızlandırıcıların savunma sanayi, uzay sanayi, medikal sanayi, ileri malzeme araştırmaları, sağlık gibi birçok alanda uygulamaları bulunmaktadır. Dünyada medikal ve endüstriyel hızlandırıcı piyasası yaklaşık 3.5 Milyar dolar civarındadır. Dünya genelinde hızlandırıcılar ya da ilgili teknolojiler kullanılarak araştırılan, geliştirilen ve üretilen ürünlerin toplam piyasası yıllık yaklaşık 500 Milyar dolar civarındadır (Henning ve Shank 2010).

Parçacık hızlandırıcılarının ortaya çıkışı, öncesinde gelen deneysel parçacık fiziği ve nükleer fizik çalışmalarını aracılığıyla sağlanmıştırdır. Her diğer teknoloji ürünü gibi parçacık hızlandırıcılar da bir ihtiyaç üzerine oluşturulmuştur. Bu sistemlerin temeli ise Philipp Lenard’ın 1895 yılında gazlar üzerinde elektron saçılmasını incelemesi ile başlamıştır. Bu çalışma kendisini katot ışınlarına yönlendirip Nobel ödölünü almasını sağlamıştır. Süreç içerisinde Rutherford’un altın atomlarını alfa parçacıkları ile bombardıman etmesi ve atomik yapının keşfinin gerçekleşmesiyle birlikte, bu deneysel çalışmalarını sağlayacak sistemler tasarlanmaya başlanmıştır. İlk çalışmalar elektrostatik makineler üzerine olmuştur ve 700 kV’a erişebilen sistemler oluşturulmuştur. 1932 yılında Cockroft ve Walton sadece (Şekil 2.1) 400 keV’luk protonlarla lithium atomunu ayırmayı başarmışlardır (Bryant 1994).

Deneysel nükleer fizik çalışmalarını için daha yüksek enerjili parçacıklara ihtiyaç vardır. Bu nedenle bu parçacıkları gerekli enerjilere ulaştırabilecek parçacık hızlandırıcılara ihtiyaç duyulmuştur. Ancak doğrusal akım gerilimindeki fiziksel limitler yüksek enerjilere çıkmayı olanaksız kılmıştır (Bryant 1994). Zamanla değişen alanların kullanılmasıyla 1928 yılında Rolf Wideroe tarihteki ilk parçacık hızlandırıcıyı yapmıştır (Şekil 2.2).

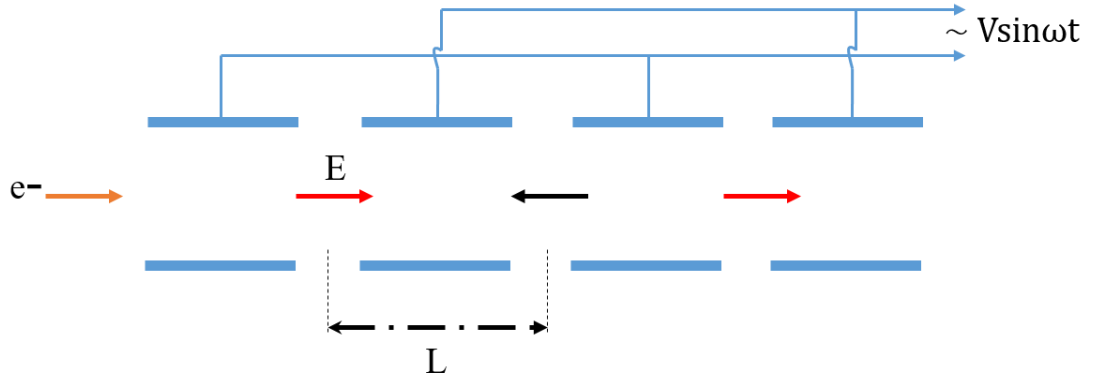


Şekil 2.1 400 keV enerjili Cockroft and Walton hızlandırıcısının şematik görünümü (Bryant 1994).

Wideroe bu hızlandırıcıyı 88 cm uzunluğundaki cam tüpten yapmıştır. Sürüklenme tüplerine 25-kV, 1 MHz alternatif akım vererek, parçacıkların boşluklarda hızlanmasını sağlamıştır. Elektrostatik voltaj uygulanan sistemlerden farklı olarak Wideroe'nin başarısı, bu sistemde sodyum ve potasyum demetlerini 50 keV kinetik enerjiye kadar hızlandırmış olmasıdır. Bu değer verdiği voltaj değerinin 2 katına eşittir (Bryant 1994).

İlerleyen süreçlerde gerçekleşen tarihi gelişmeler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Bryant 1994):

- 1929 yılında Robert Van de Graaff, Van de Graaff jenetörünü icat etmiştir,
- 1930 yılında Ernest Lawrence 4 inç (10.16 cm) çapında siklotronu icat etmiştir,
- 1932 yılında insan eliyle ilk kez bir nükleer reaksiyon gerçekleştirilmesini sağlayan Cockroft-Walton hızlandırıcısı, John Cockroft ve Ernest Walton tarafından icat edilmiştir,



Şekil 2.2 Wideroe doğrusal RF hızlandırıcısının şematik görünümü (Bryant 1994).

- 1937 yılında Russell ve Sigurd Varian ve William Hasen, doğru akım gücünü mikrodalga gücüne çeviren klaystron'u icat etmişlerdir,
- 1940 yılında, Joseph Slepian ve diğerleri tarafından 1920 yılında önerilen betatron hızlandırıcısı Donald Kerst tarafından kurulmuştur,
- 1943 yılında yeni bir hızlandırıcı çeşidi olan sinkrotron Marcus Oliphant tarafından geliştirilmiştir,
- 1944 yılında Vladimir Veksler ve sonrasında Edwin McMillan birbirlerinden bağımsız olarak faz kararlılığı prensibini keşfetmişlerdir. Bu prensip modern hızlandırıcılar için bir mihenk taşı olmuştur,
- 1946 yılında bir magnetron ile beslenen, ilk ilerleyen dalga elektron hızlandırıcısı William Walkinshaw ve takımı tarafından kurulmuştur. Birkaç ay sonra William Webster ve takımı tarafından klaystron ile beslenen ve GeV mertebesinde olan bir elektron hızlandırıcısı bağımsız şekilde kurulmuştur,
- 1946 yılında Frank Goward tarafından ilk elektron sinkrotronu kurulmuştur. Bunu takip eden süreçte Amerika'da bulunan General Electric firması tarafından sinkrotron ışınımının gözlemlendiği bir başka elektron sinkrotronu kurulmuştur. Bu keşif hızlandırıcı temelli ışık kaynakları çağının başlangıcı olmuştur,
- 1947 yılında Luis Alvarez ilk sürüklenme tüpü doğrusal hızlandırıcısını yapmış olup protonları hızlandırmıştır. Alvarez ve ekibi Wideroe-tipi sürüklenme tüpleri içeren silindirik, rezonant bir metalik kovuğa 200 MHz RF dalgası vermiştir. Hızlandırıcı 4 MeV elektrostatik hızlandırıcı ile beslenmiş olup protonlar 32 MeV'e kadar hızlandırılmışlardır,

- 1952 yılında Ernest Courant, Stanley Livingston ve Hartland Snyder ve bağımsız olarak Nicholas Christofilos güçlü odaklama prensibini bulmuşlardır. Güçlü odaklama ve faz kararlılığı prensipleri bütün modern yüksek enerjili hızlandırıcıların temeli olmuştur,
- 1956 yılında sabit-alan alternatif gradyan hızlandırıcı çalıştırılmıştır,
- 1959 yılında ilk kez güçlü odaklama kullanılarak 2 proton sinkrotronu CERN’de kurulmuştur,
- 1961 yılında ilk elektron-pozitron çarpıştırıcısı İtalya’da kurulmuştur,
- 1964 yılında nükleer füzyon çalışmaları için Nicholas Christofilos tarafından önerilen ilk indüksiyon doğrusal hızlandırıcı Astron, Lawrence Radyasyon Laboratuvarı (sonradan Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvar olarak anılmıştır) tarafından kurulmuştur,
- 1966 yılında Gersh Budker elektron demeti soğutmayı icat etmiştir. Elektron soğutma demetten herhangi bir parçacık çıkarmadan demetin boyutunu küçültmek için kullanılmaktadır. Bu teknik hadron çarpıştırıcılarında parlaklığı arttırmak için kullanılmaktadır,
- 1969 yılında Kesişen Depolama Halkası –ilk büyük proton proton çarpıştırıcı- başlatılmıştır,
- 1970 yılında Vladimir Teplyakov ve Kapchinskii tarafından radyo frekansı kuadropol (4 kutuplu) doğrusal hızlandırıcısı icat edilmiştir,
- 1971 yılında John Madey tarafından ilk serbest elektron lazeri Stanford Üniversitesi’nde icat edilmiş ve kurulmuştur,
- 1983 yılında süperiletken mıknatıs teknolojisini kullanan ilk büyük hızlandırıcı olan Tevatron, Fermilab bünyesinden başlatılmıştır,
- 1989 yılında Burton Ritcher tarafından önerilmiş olan ilk doğrusal çarpıştırıcı olan SLC (Stanford Linear Collider) kurulmuştur,
- 1994 yılında süperiletken radyo frekansı teknolojisini kullanan ilk büyük hızlandırıcı olan CEBAF, sonradan Jefferson laboratuvarı olarak anılan tesiste kurulmuştur,
- 2005 yılında ilk vakum ultra violet ve yumuşak X-ışını serbest elektron lazer kullanıcı tesisi olan FLASH, Almanya’daki DESY tesisinde kurulmuştur,
- 2008 yılında CERN’de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı’nın işletimi başlatılmıştır.

Parçacık hızlandırıcı alanındaki gelişmeler dünyada bulunan bütün araştırma ve inceleme alanlarını doğrudan veya dolaylı şekilde etkilemektedir. Hızlandırıcı teknolojileri; nükleer fizik, malzeme fiziği, üretim teknolojileri, arkeoloji, parçacık fiziği, spektroskopi teknolojileri vb. birçok alanda temel araştırma aracı olarak kullanılmaktadır. Bu alandaki gelişmeler bilim ve teknolojinin eş zamanlı hareketiyle sürekli olarak ileriye taşınmaktadır.

2.2 Radyoaktivite ve Radyasyon

Doğada kararlı ve kararsız enerji seviyelerinde çeşitli elementler ve parçacıklar bulunmaktadır. Kararsız enerji seviyelerinde bulunan elementler ve parçacıklar, kararlı enerji seviyelerine geçebilmek için parçacık veya ışın yayılımı yaparlar. Bu yayılım işlemine bozunma adı verilir. **Radyoaktivite**; kararsız halden kararlı hale geçerken gerçekleşen bozunum olaylarının tamamını kapsayan ve tanımlayan bir kavramdır. Bu geçiş sürecinde parçacık veya ışın yayılımı yapan elementler ise radyoaktif elementler olarak adlandırılır. Radyoaktivite, uzayda, doğada ve hatta canlı vücudunda dahi bulunabilir. Bu bağlamda radyoaktiviteye çeşitli örnekler verilebilir. Uzayda bulunan radyoaktiviteye kozmik ışınları örnek verebiliriz. Bu ışınlar dünyanın atmosferi ile etkileşerek, atmosferde bulunan elementlerin radyoaktif hale gelmesine sebebiyet verir. Bununla birlikte bitki örtüsünde de radyoaktiviteye rastlamak mümkündür. Doğal bitki örtüsünün temelini oluşturan karbon elementi küçük bir oranda radyoaktif karbon izotopu bulundurmaktadır. Aynı zamanda karbon elementinin radyoaktivitesinin takibi ile arkeolojik örneklerin yaş tayini yapılabilmektedir. Radyoaktif elementler düşündüğümüzden çok daha yakında da bulunabilir. İnsanlar da dahil olmak üzere birçok canlının vücudunda, küçük bir miktar uzun ömürlü radyoaktif potasyum-40 izotopundan oluşan kalsiyum elementi bulunmaktadır (Rangacharyulu 2014).

Radyoaktif bir elementin veya kararsız bir parçacığın, kararlı enerji seviyesine geçiş yaparken yayımladığı parçacıklar ve ışınlar, **radyasyon** olarak adlandırılır. Radyoaktivite alanının keşfinin ilk zamanlarında alfa, beta ve gama bozunumları radyasyon olarak tanımlanmıştır. Ancak zaman içerisinde keşfedilen yeni parçacıklar ve bozunumlar ile

radasyon tanımı geniş bir kapsama sahip olduğu anlaşılmıştır (Çizelge 2.1). Radyasyon temel olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar iyonize edici radyasyon ve iyonize edici olmayan radyasyondur.

İyonize edici radyasyon bir atomdan bir elektron sökecek enerjiye sahip olan radyasyon çeşididir. Bu etkileşim sonucunda radyasyon ile etkileşime giren atom iyon haline gelir. Belirtilen enerji seviyesi için eşik değeri uygulama alanına göre farklılık göstermektedir. Ancak 10 eV üstü enerjiler iyonize edici radyasyon olarak kabul edilebilir.

Radyoaktivite doğal olabileceği gibi yapay olarak da oluşturulabilir. Bir parçacık hızlandırıcısını ele alacak olursak, hızlandırılan parçacıklar ivmeli hareket gerçekleştirdikleri için ışıınım yapmaya başlayacaklardır (Wiedemann 2007). Aynı zamanda hızlandırılan parçacık demetleri gerekli işlemler için kullanıldıktan sonra, bir demet durdurucuya çarptırılarak durdurulmaktadır. Bu süreç sonunda durdurucu aktif hale gelir ve radyasyon oluşturur.

Çizelge 2.1 Radyasyon çeşitleri ve oluştukları yerler (Emfietzoglou vd. 2012)

Tür	Sembol	Elektrik Yükü	Kütle	Ortalama Ömür	Üretim Yöntemi
Gama-ışıınımı	γ	0	0		Radyoizotop
X-ışıını	X	0	0		Hızlandırıcı, Radyoizotop
Nötrino	ν	0	~ 0		Radyoizotop
Elektron (β^- Işıını)	e^-, β^-	-1	1		Hızlandırıcı, Radyoizotop
Pozitron (β^+ Işıını)	e^+, β^+	+1	1		Hızlandırıcı, Radyoizotop
Proton	p	+1	1.836		Hızlandırıcı
Nötron	n	0	1.839	1.1×10^3	Hızlandırıcı, Nükleer Reaktör
Döteron	d	+1	3.670		Hızlandırıcı
Triton	t	+1	5.479	10^9	Hızlandırıcı, Radyoizotop
Alfa-parçacığı	α	+2	7.249		Hızlandırıcı, Radyoizotop

Müon	μ^+, μ^-	+1,-1	207	2.15×10^{-6}	Yüksek enerjili nükleer tepkime
Pion (yükü)	π^+, π^-	+1,-1	273	2.65×10^{-8}	Yüksek enerjili nükleer tepkime
Pion (yüksüz)	π^0	0	264		Yüksek enerjili nükleer tepkime
Fisyon parçası (hafif)		~36	~96m _p		Nükleer fisyon
Fisyon parçası (ağır)		~56	~140m _p		Nükleer fisyon

Çizelge 2.1 ile verilen parçacıklar kararsız durumda olan atomlar tarafından kararlı hale geçmek için oluştururlar ve bir zincirleme tepkime meydana getirirler. Bu zincirleme tepkimeler sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

2.2.1 Üstel Bozunum Yasası

Radyoaktif bir örnek kararlı hale gelmek için radyasyon yayını yapacaktır. Yayınımın yoğunluğu ise zamanla üstel bir şekilde azalmaktadır. Üstel bozunum yasası, radyoaktif bir örneğin yayımladığı radyasyonun zamana bağlı olarak nasıl azaldığını göstermektedir. Bu karakteristik zaman özelliği malzemenin kimyasal ya da fiziksel durumundan bağımsızdır (Rangacharyulu 2014).

Üstel bozunum yasası bize herhangi bir zaman aralığındaki bozunum oranını verir. Bu oran yalnızca verilen zaman aralığındaki radyoaktif çekirdeklerin sayısına bağlıdır. Aktivite ise, radyoaktif bir örneğin birim zamandaki bozunum sayısı olarak tanımlanmaktadır (Rangacharyulu 2014).

Bir örneğin aktivitesi o örnekteki radyoaktif çekirdeklerin karakteristik ortalama-ömürlerine ve radyoaktif atomların sayısına bağlıdır. Başlangıçtaki radyoaktif atom sayısı N_0 olan bir numunenin t süre sonunda sahip olduğu radyoaktif atom sayısı

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \quad (2.1)$$

ile, başlangıç anındaki ($t=0$) bozunum oranı A_0 olan bir numunenin t süre sonundaki bozunum oranı ise

$$A(t) = A_0 e^{-t/\tau} \quad (2.2)$$

ile verilir (Rangacharyulu 2014). Burada N_0 , başlangıç anındaki ($t=0$) radyoaktif atom sayısı, τ ise karakteristik zaman olarak tanımlanmaktadır. Bir numunenin karakteristik zamanı, ortalama ömür olarak adlandırılır. Bu süre sonunda ($t=\tau$) numune içindeki radyoaktif atomların sayısı ve bozunum oranı başlangıç anındaki ($t=0$) değerlerinin %36.8'ine düşmektedir. Ortalama ömür

$$\frac{N(\tau)}{N_0} = \frac{A(\tau)}{A_0} = e^{-1} = 0.368 \quad (2.3)$$

ile ifade edilmektedir (Rangacharyulu 2014). Bir örnekteki radyoaktif atomların sayısının ve bozunum oranının başlangıç değerlerin yarısına düştüğü süre yarı ömür olarak adlandırılır. Bu ifade

$$\frac{N(t_{1/2})}{N_0} = \frac{A(t_{1/2})}{A_0} = e^{-\frac{t_{1/2}}{\tau}} = \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

ile elde edilmektedir. Ortalama-ömür ile yarı-ömür arasındaki nümerik ilişki

$$\ln \left[e^{-\frac{t_{1/2}}{\tau}} \right] = \ln \left[-\frac{1}{2} \right] = -0.693, \quad t_{1/2} = 0.693\tau \quad (2.5)$$

ile ifade edilmektedir (Rangacharyulu 2014). Ortalama ömürün tersi ise bozunum sabiti olarak adlandırılmaktadır. Bozunum sabiti

$$\lambda = 1/\tau \text{ (1/s)} \quad (2.6)$$

ile ifade edilmektedir (Rangacharyulu 2014).

2.2.2 Radyoaktivite Birimleri

Radyasyonun büyüklüğünü belirtebilmek için radyoaktivite birimlerinden faydalanılır.

Becquerel (Bq): Bir saniyede gerçekleşen bozunma sayısı olarak tanımlanmaktadır. Örnek verecek olursak; bir numune saniyede 100 bozunma gerçekleştiriyorsa, bu numunenin radyoaktivitesi 100 Bq seviyesindedir.

Curie (Ci): 1 Curie saniyede 3.7×10^{10} bozunmaya eşittir. Bu nedenle, $1 Ci = 3.7 \times 10^{10}$ Bq'dir.

Doz: Ortam tarafından soğurulan enerjiyi ifade etmektedir. SI sistemine göre birimi Gray'dir.

Gray (Gy): 1 Gray kg başına 1 J enerji depolanmasını sağlayan radyasyon miktarıdır. $1 Gy = 1 J/kg$.

Radyasyon maruziyeti: Radyasyonun bir ortamı iyonize edebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Kg başına 1 C yük olarak ifade edilir ve birimi C/kg'dır.

Doz Eşdeğerliliği (H): Bu ifade radyasyonun oluşturacağı fizyolojik etkileri görmek için tanımlanmıştır. Bu etki enerji aktarımı ve radyasyon tarafından oluşturulan iyonizasyonun (doz, radyasyon maruziyeti) bir göstergesidir. Birimi Sievert'tir.

Akış: Birim alandan geçen parçacık sayısını ifade etmektedir. Birimi parçacık sayısı/cm²'dir.

2.3 Doğal Radyasyonlar

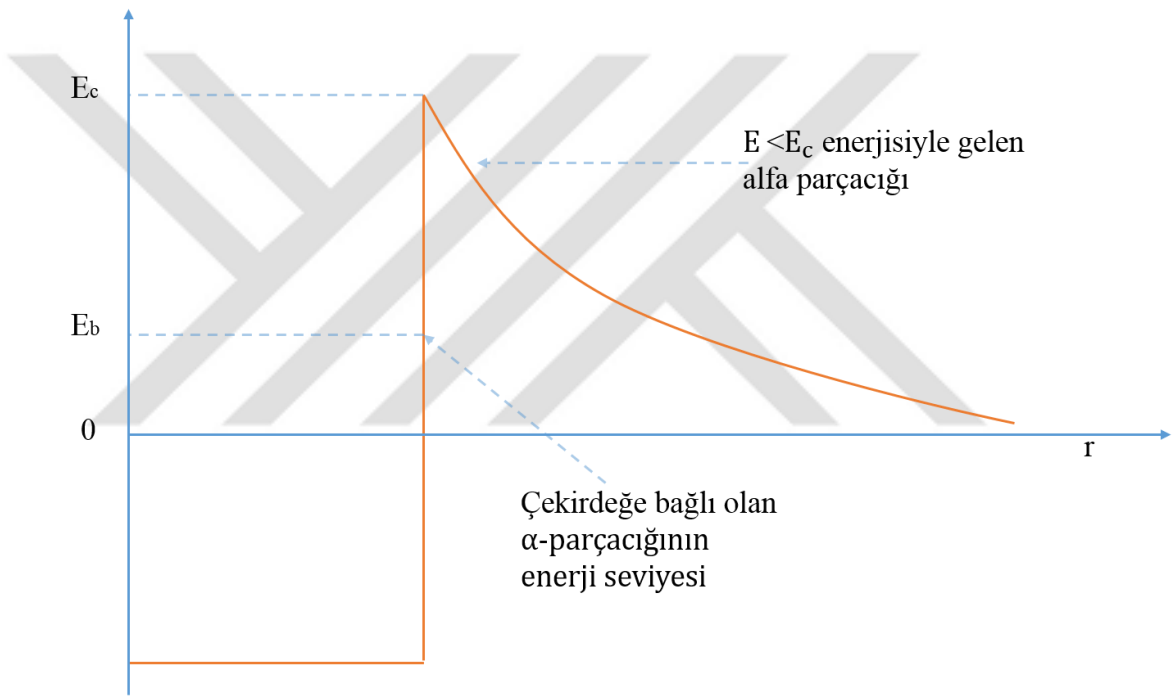
Doğada kararsız enerji seviyelerinde bulunan elementler ve parçacıklar, kararlı enerji seviyelerine geçmek için çeşitli radyoaktif bozunumlar gerçekleştirebilirler. Bu bölümde bu bozunum çeşitleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Doğal radyoaktivite alfa bozunumu, beta bozunumu, elektron yakalanması ve gama bozunumu olarak kendini gösterebilir (Kamal 2014).

2.3.1 Alfa Bozunumu

Alfa bozunumu genellikle, çok ağır çekirdeklerin kararlı hale geçmek için bir α -parçacığı (${}^4_2\text{He}^{+2}$) yayımlayarak bir ürün çekirdeğe dönüşmesi durumudur. Bu geçiş



ile karakterize edilmektedir. α -bozunumu, bir ana çekirdeğin, biri yüksek kütle numaralı diğeri ise düşük kütle numaralı olmak üzere, iki tane ürün çekirdeğe, aniden gerçekleşen fisyonu olarak kabul edilebilir. α -bozunumunun gerçekleşebilmesi için bu nükleon kümesinin Coulomb bariyerini aşması gerekmektedir. Coulomb bariyeri iki nükleonun, bir nükleer reaksiyona girebilmeleri için aşmaları gereken minimum enerjidir. Bu bariyerin kaynağı ise nükleonlar arasındaki elektrostatik kuvvettir.



Şekil 2.3 Alfa-parçacığı bozunması (Leo 1987)

Ağır çekirdeklerdeki bozucu Coulomb kuvveti, özel nükleer bağlanma enerjisine göre daha hızlı bir oranla artış gösterir. Coulomb kuvveti Z^2 'ye bağlıyken, bağlanma enerjisinin artışı A 'ya bağlıdır (Krane 1988). Böylesine bir nükleon kümesi salınımı tek nükleon salınımından daha avantajlıdır. Çünkü α -parçacığı yüksek bağlanma enerjisine sahiptir (Leo 1987).

2.3.2 Beta Bozunumu

Çekirdeğinde fazladan nötron veya proton bulunduran çekirdekler, zayıf etkileşim aracılığıyla beta bozunumu gerçekleştirirler. Beta bozunumunda çekirdek tarafından hızlı elektronlar veya pozitronlar yayımlanmaktadır. Bu bozunum çeşidinde çekirdeğin kütle numarası sabit kalırken yükü değişmektedir. Bu durum,

- Bir elektron ve antinötrino salınımı (β^-),
- Bir pozitron ve nötrino salınımı (β^+),
- Bir nötrinin salınımıyla yörünge elektronlardan birinin çekirdek tarafından yakalanması (ϵ),

şeklinde gerçekleşebilir.

Nötron fazlalığı olan bir çekirdek bir elektron yayımlayarak daha kararlı bir çekirdeğe dönüşebilir. Elektriksel yük korunumundan ötürü ürün çekirdeğinin proton sayısı 1 birim artar. Bu süreç β^- bozunumu olarak isimlendirilir ve dönüşüm



ile ifade edilmektedir (Das ve Ferbel 2003). Proton zengini olan çekirdekler kararlı hale gelmek için bir pozitron yayımlayabilir. Elektrik yükü korunumundan ötürü ürün çekirdeğinin proton sayısı 1 birim azalır. Bu süreç β^+ bozunumu olarak isimlendirilir ve dönüşüm



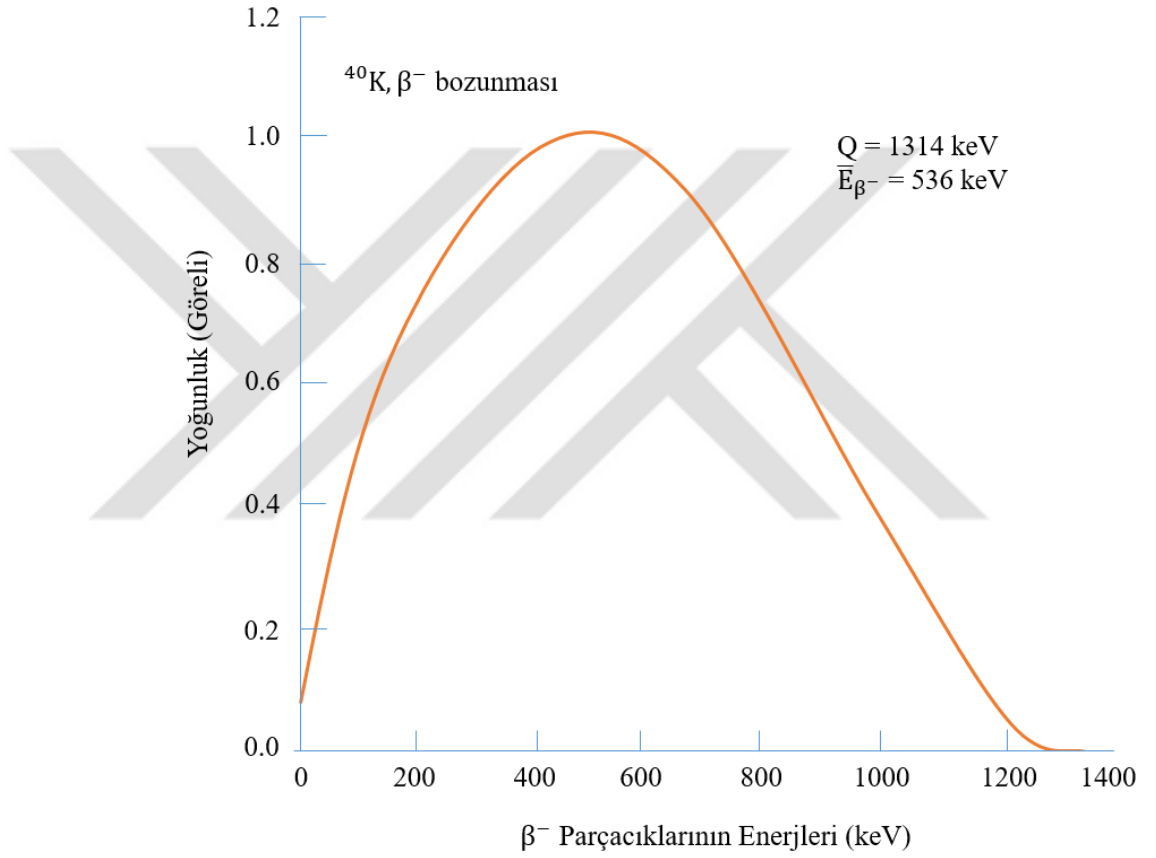
ile ifade edilmektedir (Das, Ferbel 2003). Beta bozunumunun temel karakteristiğinde, elektron, devamlı bir enerji spektrumuna sahip olmaktadır. Bunun nedeni ise tepkime enerjisinin (Q-Değeri), elektron (ya da pozitron) ve antinötrino (ya da nötrino) arasında paylaşılmasıdır. Eğer ürün çekirdeğinin küçük geri tepme enerjisi ihmal edilirse, enerji spektrumunun maksimum değeri, tepkime enerjisine karşılık gelmektedir (Leo 1987).

Proton zengini olan çekirdekler aynı zamanda atomik yörüngelerindeki bir elektronu yakalayıp da dönüşüm geçirebilirler. Bu süreç elektron yakalanması olarak isimlendirilir ve dönüşüm



ile ifade edilmektedir.

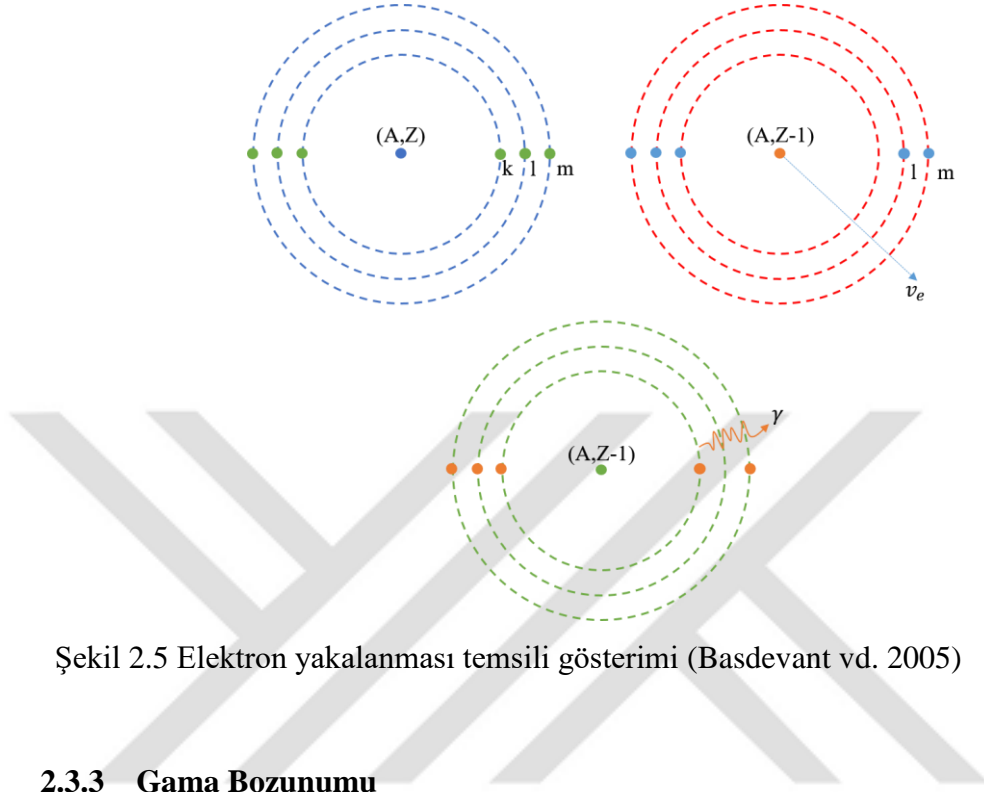
Bu tepkime temel olarak β^{+} bozunumuyla aynıdır ancak β parçacığı sol tarafa geçmektedir. EY (Elektron Yakalanması)'nın nükleer seviye diyagramı β^{+} yayınımla özdeşdir.



Şekil 2.4 Potasyum-40'ın beta bozunması enerji spektrumu (Emfietzoglou vd. 2012)

Sadece nötrino yayımlandığı için EY tespit edilmesi imkansız bir tepkime gibi gözükmektedir. Bununla birlikte elektron yakalanması gerçekleştiğinde yörüngede bir boşluk oluşmaktadır (Şekil 2.5). Bu boşluk, üst seviyelerdeki bir yörünge elektronunun alt seviyeye geçiş yapmasıyla doldurulmaktadır. Süreç sonucunda ise karakteristik bir X-ışını veya Auger elektronları yayımlanmaktadır. EY sürecinin takip edilmesinde bu

ışınımlar kullanılmaktadır. Genel olarak K elektronu yakalanmaktadır, ancak düşük bir olasılıkla L elektronu da yakalanabilmektedir (Leo 1987).



Şekil 2.5 Elektron yakalanması temsili gösterimi (Basdevant vd. 2005)

2.3.3 Gama Bozunumu

Ağır bir çekirdek alfa veya beta parçacığı yayımlayarak bozunduğunda, ürün çekirdeği uyarılmış seviyede kalabilir. Eğer uyarılmış bir çekirdek parçalanmazsa veya başka bir parçacık yayımlamazsa, gama ışını yayımlayarak taban enerji seviyesine dönebilir. Tipik nükleer gama ışınlarının enerjileri 0.1 MeV'den 10 MeV'a kadar değişmektedir (Das ve Ferbel 2003) ve bu enerji aralığı 10^4 fm ile 100 fm dalgaboyu aralığına karşılık gelmektedir (Krane 1988).

Uyarılmış seviyede bulunan bir çekirdek, kararlılığını sağlamak için bir alt enerji seviyesine geçiş yapmaktadır. Ancak bazı çekirdekler uzun bir süre uyarılmış enerji seviyesinde kalabilmektedir. Bu yarı-kararlı seviyelerden kararlı enerji seviyelerine geçiş, genellikle seviyeler arasındaki büyük spin farklarından kaynaklanmaktadır ve bu durum, saniyeler ile yıllar arasında değişen yaşam-sürelerine sebebiyet vermektedir. Bu yarı-kararlı seviyelerden birine hapsolmuş bir çekirdek, normal seviyelerde bulunan çekirdeklerden daha farklı radyoaktif özellikler göstermektedir. Bu çeşit çekirdekler

izomerler olarak adlandırılır ve kütle numarasının yanına yazılan bir “*m*” harfi ile ifade edilirler (Leo 1987).

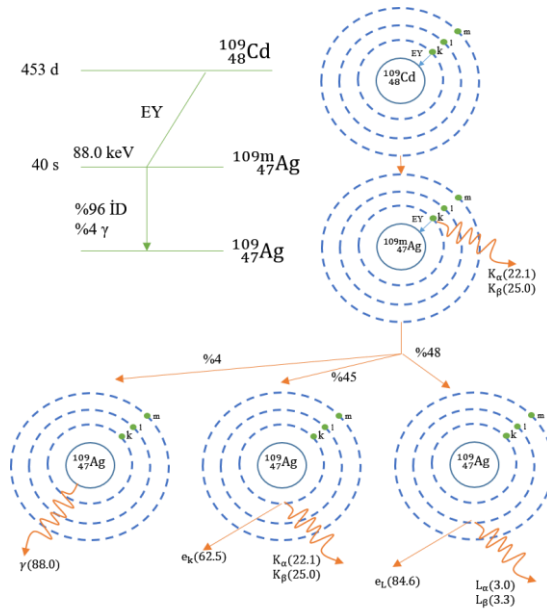


2.3.4 İç Dönüşüm (İD)

Bir atom uyarıldığında, fazladan sahip olduğu enerji çekirdek tarafından soğurulabilmektedir. Çekirdek bu durum sonucunda bir elektron yayımlar. Bu süreç gama ışını yayınımına eşlik etmektedir. Yayımlanan iç dönüşüm elektronunun enerjisi, çekirdek tarafından kaybedilen enerji (seviyeler arasındaki enerji farkı) ile yörünge elektronunun bağlanma enerjisi arasındaki farka eşittir. Bu etkileşim

$$E_e = (E_i - E_s) - E_b \quad (2.12)$$

ile ifade edilir. Burada E_e iç dönüşüm elektronunun kinetik enerjisi, E_i ve E_s sırasıyla, ilk ve son nükleer enerjilerdir. $(E_i - E_s)$ nükleer enerjiler arasındaki geçiş enerjisi ve E_b yörünge elektronunun bağlanma enerjisidir.



Şekil 2.6 Cd-109'un iç dönüşüm bozunması (L'Annunziata 2012)

2.4 Yapay Radyasyonlar

Yapay radyoaktivite proton, nötron veya fisyon aracılığıyla bozunarak kendini gösterebilmektedir (Kamal 2014).

2.4.1 Eş Zamanlı Fisyon

Eş zamanlı fisyon, birçok uranyum ötesi elementte, fisyon ürünlerinin yanında nötron yayımlanmasıyla gerçekleşebilir. Bu fisyon ürünleri ise hızlı bir şekilde β ve γ yayımlayarak bozunum geçirebilirler. Bu fisyon kaynağı ise yeterince kalın bir konteynır ile çevrelenirse, fisyon ürünlerinin oluşturduğu radyasyon sönümlenir ve bu şekilde sadece bir nötron akışı elde edilebilir (Leo 1987).

2.4.2 Nötron Reaksiyonları

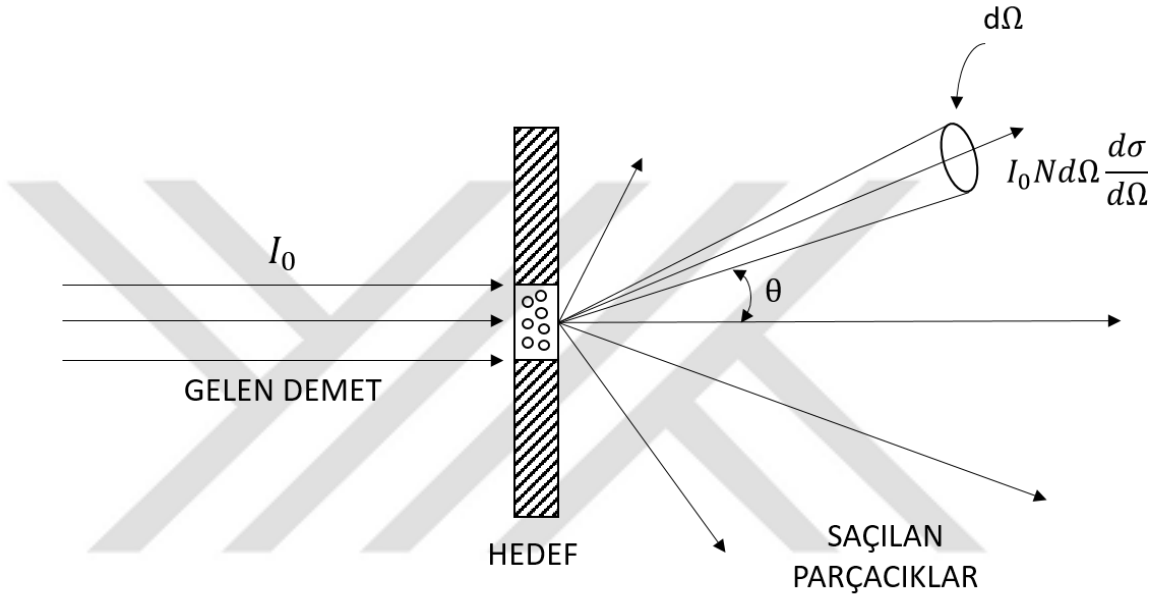
Nötron üretimi (γ, n) veya (α, n) reaksiyonları ile çok daha uygun bir şekilde sağlanabilmektedir. Bu reaksiyonlar birçok çekirdekle gerçekleşebilmektedir (Leo 1987). Hızlandırıcılar ile gama parçacıkları kolaylıkla üretilebilir ve ortama gama verilerek nötron oluşturulabilir.

2.5 Tesir Kesiti

Parçacıkların gerek çarpıştırıcılarda birbirleri ile etkileşimleri, gerekse parçacığın malzeme ile etkileşiminde önemli parametrelerden biri tesir kesitidir. Sabit hedeflere doğru hızlandırılmış parçacıkların nükleer etkileşim süreçlerinin anlaşılması amacıyla, belirli bir nükleer tepkimenin gerçekleşme olasılığının niceliksel bir ölçüsü gerekmektedir. Bu niceliksel ölçü, tesir kesiti olarak adlandırılmaktadır. Tıpkı bir $A(a,b)B$ tepkimesi örnek olarak ele alınabilir. Burada A hedef çekirdek, a gelen parçacık, b ürün parçacık ve B ise ürün çekirdek olarak tanımlanmaktadır. Gelen parçacıkların (a) I_0 akısı ile N adet hedef çekirdeğin (A) ile etkileştikleri varsayılırsa, birim zamanda yayımlanan ürün parçacıkların sayısı (b), I_0 ve N ile orantılıdır. Belirtilen orantılılık sabiti tesir kesitidir (σ) (Satchler 1980). Belirtilen özel tepkime için tesir kesiti

$$\sigma = \frac{\text{yayımlanan parçacık sayısı (b)}}{(\text{birim alana gelen parçacık sayısı}) \cdot (\text{hedefteki çekirdek sayısı})}$$

olarak ifade edilir (Satchler 1980). Birimi alan tanımının birimindedir ve özel olarak barn olarak adlandırılmaktadır. Barn biriminin sembolü b 'dir ve $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$ olarak tanımlanır.



Şekil 2.7 Diferansiyel tesir kesitini tanımlayan diyagram (Satchler 1980)

Şekil 2.7, gelen demete göre θ ve ϕ kutup açıları yönünde, $d\Omega$ katı açısı içerisinde, birim zamanda yayımlanan parçacık sayısının, $d\Omega$ ile olduğu gibi I_0 ve N ile de orantılı olduğunu göstermektedir (Satchler 1980). Bu durumdaki orantılılık sabiti diferansiyel tesir kesiti olarak adlandırılmaktadır, $d\sigma/d\Omega$. Tesir kesiti ve diferansiyel tesir kesiti arasındaki ilişki

$$\sigma = \int_0^{4\pi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega \quad (2.13)$$

ile ifade edilebilir (Satchler 1980). Katı açısı $d\Omega = \sin\theta d\phi$ olarak alınırsa ifade

$$\sigma = \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi (d\sigma/d\Omega) \quad (2.14)$$

şeklinde yazılabilir (Satchler 1980). Verilen bir bombardıman enerjisinde, olası her bir ürün çekirdeğin, uygun olan bütün enerji seviyeleri için bir tesir kesiti tanımlayabiliriz. Farklı tepkime kanalları için tesir kesitleri ekleyebiliriz. Elastik olmayan süreçler için tanımlanan bütün tesir kesitlerinin toplamı, belirtilen enerji seviyesi için tepkime veya soğurma tesir kesiti olarak tanımlanmaktadır. Elastik süreçler için tesir kesiti de hesaba katıldığında, toplam tesir kesiti elde edilir ve bu tanım çarpışma esnasında olabilecek durumların olasılıklarının bir ölçütüdür (Satchler 1980).

Tezin konusu olan demet durdurucusu göz önüne alındığında, elektronların kısa mesafede durdurulabilmesi için elektron malzeme etkileşimi tesir kesiti yüksek, ancak az sayıda nötron üretimine izin vermek için gama-malzeme tesir kesitinin düşük olması talep edilmektedir. Görüldüğü gibi parçacık malzeme etkileşimini ihtiva eden demet durdurucusu probleminde tesir kesitinde bir denge bulunması gerekmektedir ve zincirleme reaksiyon içeren süreçte tesir kesiti hesaplamak oldukça zahmetli bir süreçtir. Diğer yandan kullanılan simülasyon programları her bir farklı nükleer reaksiyon süreci için tesir kesitini hesaplamaktadır.

2.6 Yüklü Hafif Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

2.6.1 Parçacıkların Enerji Kaybı

Yüklü parçacıklar maddeye nüfuz ettikleri zaman, enerjilerini ortamdaki atomların veya moleküllerin iyonizasyonu ve uyarılmasıyla kaybederler. Hareket eden yüklü parçacıklar elektromanyetik kuvvet aracılığıyla yörünge elektronlarıyla etkileşirler ve enerjilerini bu elektronlara aktarırlar. Aktarılan enerji yörünge elektronlarından birinin fırlatılması ile atomu iyonize edebilir veya atomun uyarılmış enerji seviyesine çıkmasına sebep olabilir (Emfietzoglou vd. 2012).

Yüklü ağır parçacıklar, tek çarpışmada enerjilerinin küçük bir kısmını kaybederler. Çarpışma gerçekleştiğinde parçacıkların takip ettiği yörüngedeki sapma ihmal edilebilir. Yüklü ağır parçacıklar neredeyse düz bir çizgide hareket ederler ve sürekli olarak

enerjilerinin küçük bir kısmını yörünge elektronlarıyla gerçekleştirdikleri çarpışmalarla kaybederler. Bazen de ağır parçacıkların yolu çekirdekle gerçekleştirdikleri Rutherford saçılmasıyla bükülebilir (Emfietzoglou vd. 2012).

Elektronlar ve pozitronlar madde içinde yavaşlarken neredeyse sürekli olarak enerji kaybederler. Enerjilerinin büyük bir çoğunluğunu yörünge elektronları ile gerçekleştirdikleri tek bir çarpışmayla kaybederler. Kinematikten elde edilen saçılma açısı genellikle büyük olduğundan yörüngelerinden büyük oranda saparlar (Emfietzoglou vd. 2012). Elektronlar çekirdekle gerçekleştirdikleri elastik saçılmalarla büyük oranda saçılırlar. Elektronlar ve pozitronlar düz bir çizgide ilerlemezler. Bunlara ek olarak elektronların yörüngeleri keskin bir şekilde büküldüğünde, elektronlar **frenleme ışınımı fotonları** yayımlarlar. Frenleme ışınımının **durdurma gücüne** katkısı yüksek enerji bölgelerinde önemli hale gelmektedir. Örnek olarak, 100 MeV elektronlar için suyun **ışınımsal durdurma gücü** neredeyse toplam durdurma gücünün yarısını oluşturmaktadır (Emfietzoglou vd. 2012).

Yüklü parçacıkların bir ortamda birim uzunluk başına ortalama enerji kayıpları, radyasyon fiziği ve radyasyon dozimetrisi alanlarında oldukça önemlidir. Bu kavram ortamın **durdurma gücü** olarak isimlendirilir ve $-dE/dx$ ile temsil edilir ve. Parçacıkların bakış açısından bu nicelik, sıkça doğrusal enerji transferi (DET) olarak isimlendirilir. Birimi eV/m 'dir.

Durdurma gücü ve DET, foton ve nötron gibi yüksüz parçacıklar tarafından üretilen ve geri tepilen yüklü parçacıklar aracılığıyla oluşan doz ile yakından ilişkilidir. Buna ek olarak bu nicelikler çeşitli radyasyonların biyolojik etkileriyle de ilişkilidirler. Durdurma gücü, **çarpışma başına ortalama enerji kaybının** Q_{ort} ve **birim uzunluk başına çarpışma olasılığının** μ , ürünü ile tanımlanır. Burada μ makroskopik tesir kesitidir ve bir malzemenin belirli bir hacminde bulunan bütün hedef çekirdeklerin etkin tesir kesitini ifade eder. Birimi l/m 'dir. Ortalama enerji kaybı,

$$Q_{ort} = \int_{Q_{min}}^{Q_{maks}} QW(Q)dQ \quad (2.15)$$

ile ifade edilir (Emfietzoglou vd. 2012). Burada $W(Q)$, bir çarpışma için kaybedilen enerjinin spektrumudur. Yüklü parçacık ve elektron arasındaki çarpışmadaki minimum enerji kaybı $Q_{min} \cong 0$ olmaktadır (Emfietzoglou vd. 2012). Maksimum enerji kaybı Q_{maks} , kinematik ilişkiden kabaca tahmin edilebilir. M kütesine ve V hızına sahip bir yüklü parçacık, m_e kütesine sahip durgun haldeki bir elektronla çarpışırsa, kafa kafaya çarpışma için maksimum enerji aktarımına erişilir. Enerji ve momentum korunum yasaları çözümlenirse, Q_{maks}

$$Q_{maks} = \frac{4m_eME}{(M + m)^2}. \quad (2.16)$$

olarak elde edilir (Emfietzoglou vd. 2012). Burada $E=MV^2/2$, yüklü parçacığın başlangıç kinetik enerjisidir. Gelen parçacık elektron veya pozitron ise Q_{maks} , E 'ye eşittir. Enerji aktarımının $Q_{min} < Q < Q_{maks}$ aralığında sürekli olarak devam ettiği ve $Q_{ort} \cong 20$ eV olduğu deneysel olarak onaylanmıştır (Emfietzoglou vd. 2012). Doğrusal durdurma gücü

$$-\frac{dE}{dx} = Q_{ort} = \int_{Q_{min}}^{Q_{maks}} QW(Q)dQ. \quad (2.17)$$

ile ifade edilir. Doğrusal durdurma gücünün birimi MeVcm^{-1} 'dir. Malzeme yoğunluğuna (ρ) bölünen nicelik $-dE/(\rho dx)$, **kütle durdurma gücü** olarak adlandırılır ve birimi $\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}$ 'dir. Durdurma gücünün değerleri; parçacıklara, enerjiye ve ortama göre değişmektedir.

2.6.2 Çarpışma Durdurma Gücü

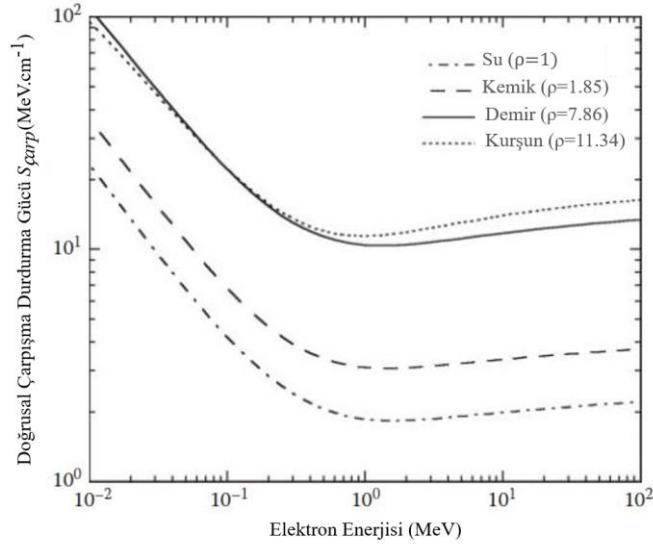
Elektron ve pozitronların durma güçleri ve aralıkları neredeyse aynı olduğundan hem pozitronlar hem de elektronlar, elektron olarak adlandırılır. Elektronların durma gücü, iki nedenden ötürü diğer yüklü parçacıklardan farklıdır. Birincisi, bir elektronun tek bir çarpışma ile büyük miktarda enerji kaybetmesidir. İkincisi, gelen veya hedef elektronu ayırt etmenin imkansız olmasıdır. Çarpışma gerçekleşikten sonra daha yüksek enerjiyle ayrılan elektron, gelen elektron olarak kabul edilir. Bu nedenle, maksimum enerji transferi, T kinetik enerjili elektron için $T/2$ olur (Emfietzoglou vd. 2012). **Çarpışma**

durdurma gücü elektronlar için Denklem (2.18) pozitronlar için ise Denklem (2.19) ile ifade edilir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015).

$$S_{\text{çarp}} = S_{\text{iyon}} = \frac{dE}{dx} = 4\pi r_e^2 z^2 \frac{m_e c^2}{\beta^2} NZ \times \left\{ \ln \left(\frac{\beta \Gamma \sqrt{\Gamma - 1}}{I} m_e c^2 \right) + \frac{1}{2\Gamma^2} \left[\frac{(\Gamma - 1)^2}{8} + 1 - (\Gamma^2 + 2\Gamma - 1) \ln 2 \right] \right\} \quad (2.18)$$

Burada dE/dx parçacık durdurma gücünü (MeV/m), $r_e = 2.818 \times 10^{-15} m$ klasik elektron yarıçapını, $z = 1$ parçacığın elektriksel birim yükünü, $m_e c^2 = 0.511$ MeV elektronun durgun kütle enerjisini, $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ Avagadro sayısını, $N = \rho(N_A/A)$ soğurucu malzemenin $1 m^3$ 'ündeki parçacık sayısını (ρ :soğurucu malzeme yoğunluğu, A soğurucu malzeme atomunun kütle numarasını, Z soğurucu malzeme atomunun atom numarasını, Γ rölativistik faktörü, $(T + m_e c^2)/m_e c^2 = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ 'yi, T parçacığın kinetik enerjisini (MeV), m_e parçacığın durgun kütlesini (MeV/c²), β görelî faz hızını (v/c), I soğurucu malzemenin ortalama uyarılma enerjisini ($I = (9.76 + 58.8.Z^{-1.19})$, $Z, Z > 12$) temsil etmektedir (L'Annunziata 2012).

$$S_{\text{çarp}} = S_{\text{iyon}} = \frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{m_e c^2}{\beta^2} NZ \times \left\{ \ln \left(\frac{\beta \Gamma \sqrt{\Gamma - 1}}{I} mc^2 \right) + \frac{\beta^2}{24} \left[23 + \frac{14}{\Gamma + 1} + \frac{10}{(\Gamma + 1)^2} + \frac{4}{(\Gamma + 1)^2} \right] + \frac{\ln 2}{2} \right\} \quad (2.19)$$



Şekil 2.8 Farklı malzemelerde elektron için doğrusal durdurma gücü grafiği (Emfietzoglou vd. 2012).

Şekil 2.8, elektronlar için çeşitli maddelerin doğrusal çarpışma durdurma gücünü göstermektedir. Her ne kadar elektronlar çarpışmada enerjisinin en fazla yarısını

kaybetseler de, pozitronlar tüm enerjisiyi kaybetme olasılığına sahiptir. Bu nedenle, pozitronlar için çarpışma durdurma güçleri elektronlarınkinden biraz farklıdır.

Pozitronlar için çarpışma durdurma güçleri, 500 keV'den daha büyük enerji aralığında elektronların % 98'i kadardır. Buna karşılık, bunlar elektron verisinden 100 keV'de % 5 ve 10 keV'de %10-20 daha büyüktür (Emfietzoglou vd. 2012). Çizelge 2.2 elektronlar için suyun durma gücüne ilişkin çeşitli verileri göstermektedir.

Çizelge 2.2 Suyun, elektron için durdurma gücü parametreleri (Emfietzoglou vd. 2012)

Kinetik Enerji (MeV)	β^2	$\frac{S_{\text{çarp}}}{\rho}$	$\frac{S_{\text{ışın}}}{\rho}$	$\frac{S_{\text{tot}}}{\rho}$	Radyasyon Verimi	Menzil (gcm^{-2})
		$(\text{MeVcm}^{-2}\text{g}^{-1})$				
0.001	0.0039	126		126		5×10^{-6}
0.002	0.00778	77.5		77.5		2×10^{-5}
0.005	0.0193	42.6		42.6		8×10^{-5}
0.010	0.0380	23.2		23.2	0.0001	0.0002
0.025	0.0911	11.4		11.4	0.0002	0.0012
0.050	0.170	6.75		6.75	0.0004	0.0042
0.075	0.239	5.08		5.08	0.0006	0.0086
0.1	0.301	4.20		4.20	0.0007	0.0140
0.2	0.483	2.84	0.006	2.85	0.0012	0.0440
0.5	0.745	2.06	0.010	2.07	0.0026	0.174
0.7	0.822	1.94	0.013	1.95	0.0036	0.275
1	0.886	1.87	0.017	1.89	0.0049	0.430
4	0.987	1.91	0.065	1.98	0.0168	2.00
7	0.991	1.93	0.084	2.02	0.0208	2.50
10	0.998	2.00	0.183	2.18	0.0416	4.88
100	0.999	2.20	2.40	4.60	0.317	32.5

Çizelge 2.2'de verilen radyasyon verimi, elektronların tamamıyla durana kadar yayımladıkları frenleme ışınımının, toplam enerjisine oranlarıdır.

2.6.3 Frenleme Işınımı

Bir elektron, bir çekirdeğin etki alanına girdiğinde yörüngesinde bir sapma meydana gelir. Bu etkileşim esnasında elektron, etkileşime girdiği çekirdek tarafından yavaşlatılır. Bunun sonucunda elektronun kaybettiği kinetik enerji, frenleme ışınımı fotonları olarak yayımlanır. Bu süreç,

$$h\nu = E_{i\beta} - E_{s\beta}. \quad (2.20)$$

ile ifade edilir (L'Annunziata 2012). Denklem (2.20)'de $h\nu$ frenleme ışınımı fotonlarının enerjisi, $E_{i\beta}$ elektronun başlangıç kinetik enerjisi, $E_{s\beta}$ ise son kinetik enerjisidir. Frenleme ışınımı fotonlarının spektrumu birçok faktöre bağlıdır ve oldukça geniştir. Radyoaktif bir örnekten çıkan ve geniş bir spektruma sahip olan beta parçacıkları, hedef malzemenin içerisinde çeşitli etkileşimler sonucunda geniş spektrumda frenleme ışınımı fotonları oluştururlar. Beta parçacıklarının yavaşlatılması, saptırılması, geri tepilmesi veya ilk aşamada üretilen frenleme ışınımı fotonlarının hedef atomları uyarması sonucu ortaya çıkabilecek ikincil elektronların etkileşimleri, frenleme ışınımı fotonlarının spektrumlarını belirleyen önemli faktörler olarak sıralanabilir.

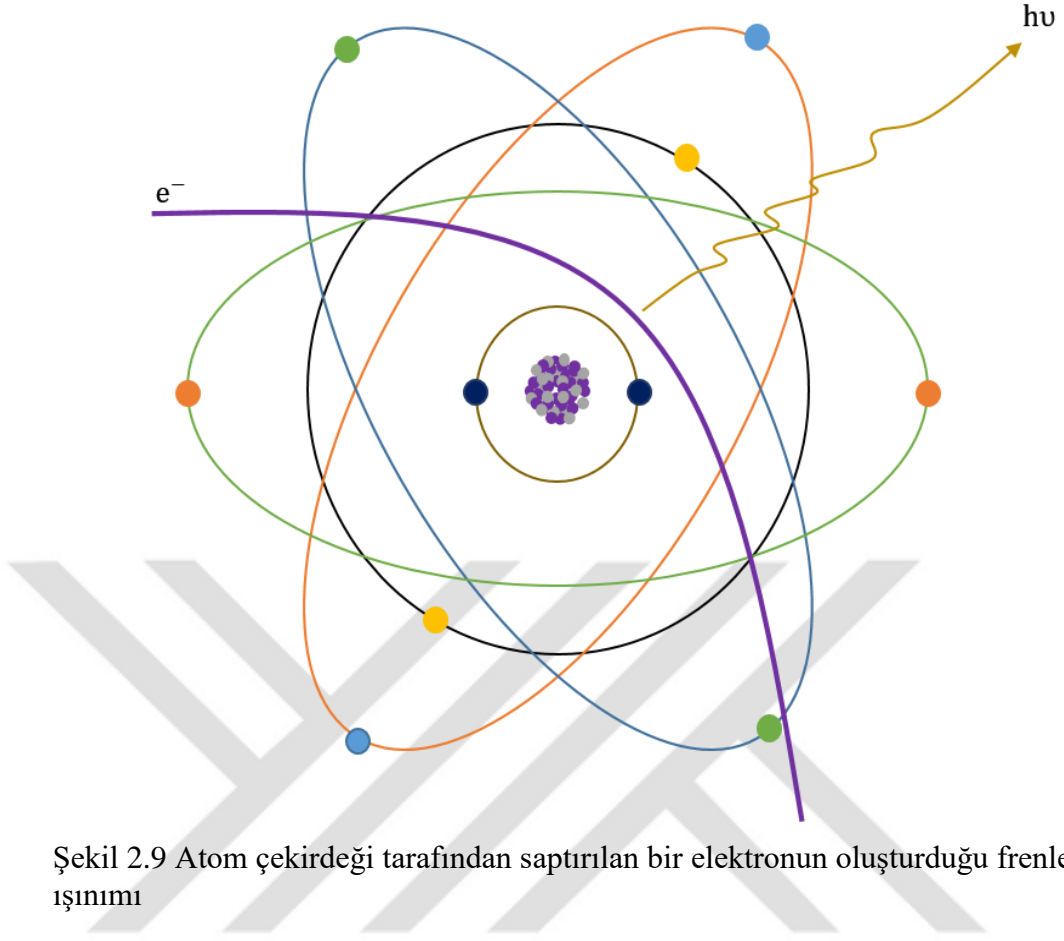
Bir beta parçacığı doğrudan bir atomun çekirdeğiyle etkileşime uğrayıp bütün kinetik enerjisi $h\nu_{maks}$ 'ı frenleme ışınımı fotonları olarak kaybettiğinde, frenleme ışınımı spektrumundaki en kısa dalgaboyu λ_{min} ,

$$h\nu_{maks} = \frac{hc}{\lambda_{min}} \quad (2.21)$$

ile bulunmaktadır (L'Annunziata 2012). Kurşun-cam zırh içinde bulunan ^{32}P 'den ($E_{maks}=1.71\text{MeV}$) gelen ve Pb çekirdeğine çarpan bir 1710 keV beta parçacığı örneğini ele alınacak olduğunda, eğer beta parçacığı tüm enerjisini çarpışmada kaybederse, bu etkileşimden yayılan frenleme ışınımı fotonu dalga boyu

$$\lambda = \frac{hc}{h\nu_{maks}} = 12.4 \frac{keV\text{\AA}}{1710keV} = 0.00725\text{\AA} \quad (2.22)$$

olarak bulunur (L'Annunziata 2012). Elektronların toplam enerji kaybı,



Şekil 2.9 Atom çekirdeği tarafından sapıtılan bir elektronun oluşturduğu frenleme ışınımı

$$\left(-\frac{dT}{dx}\right)_{top} = \left(-\frac{dT}{dx}\right)_{iyon} + \left(-\frac{dT}{dx}\right)_{ışın} \quad (2.23)$$

ile ifade edilir. Elektronlar için frenleme ışınımı kaybının, iyonizasyon kaybına oranı yaklaşık olarak

$$\frac{S_{ışın}}{S_{iyon}} = \frac{E_{fren}}{E_{iyon}} \approx \frac{TZ}{750} \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir (L'Annunziata 2012). Burada $S_{ışın}$ ışınımsal durdurma gücünü, E_{fren} frenleme ışınımı enerjisini, S_{iyon} iyonizasyon gücünü, E_{iyon} iyonizasyon enerjisini, Z soğurucu malzemenin atom numarasını ve T kinetik enerjisi (MeV) temsil etmektedir.

2.6.4 Menziller

Yüklü parçacıkların duruncaya kadar katettikleri mesafe menzil olarak adlandırılmaktadır. Başlangıçtaki enerji tamamen kayboluncaya kadar yüklü parçacıkların sürekli olarak yavaşladığı varsayılmaktadır. Bu varsayım sürekli yavaşlama yaklaşımı (SYY) menzili olarak adlandırılmaktadır. Bu yaklaşım elektronlar için gerçekçi değildir, çünkü tek bir çarpışma ile enerjinin önemli bir kısmını kaybederler. Ek olarak, ağır parçacıkların aksine elektron yolu kıvrımlıdır. Bununla birlikte, elektron menzili terimi, Denklem (2.25) ile tanımlanan SYY menzilini ifade etmektedir. Bu ifade başlangıçtan, nüfuzun sonuna kadar uzanan ortalama yol uzunluğunu tanımlamaktadır. SYY menzili $R(T)$,

$$R(T) = \int_0^T [S_{\text{çarp}}(T) + S_{\text{ışın}}(T)]^{-1} dT \quad (2.25)$$

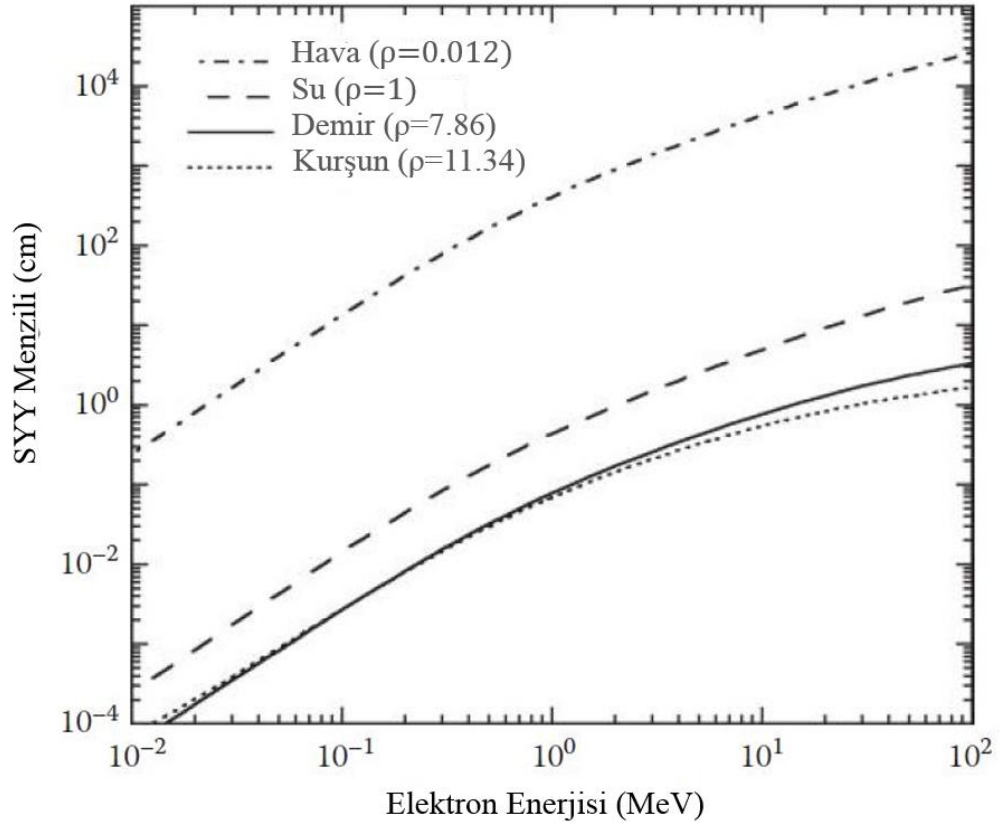
ile ifade edilmektedir (Emfietzoglou vd. 2012). Birimi cm'dir. Eğer ρ (yoğunluk) ile çarpılırsa birimi gcm^{-2} 'ye dönüşür. Şekil 2.10, elektronların farklı malzemelerdeki SYY menzilini cm biriminde göstermektedir.

Büyük Z 'ye sahip malzemelerin çarpışma durdurma güçleri suyunkinden daha küçüktür. Bu nedenle, kurşun için 20 MeV'nin altındaki menzil, suyla karşılaştırıldığında daha büyüktür. Yüksek enerjili bölgede, frenleme ışınımı kaybının artması nedeniyle kurşundaki menzil kısalmaktadır (Emfietzoglou vd. 2012).

Küçük Z materyalleri için elektron menzilin ampirik formülü mevcuttur ve

$$\begin{aligned} R &= 0.412T^{1.27-0.0954\ln T}, \quad 0.01 \leq T \leq 2.5 \text{ MeV} \\ &= 0.530T - 0.106, \quad T > 2.5 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (2.26)$$

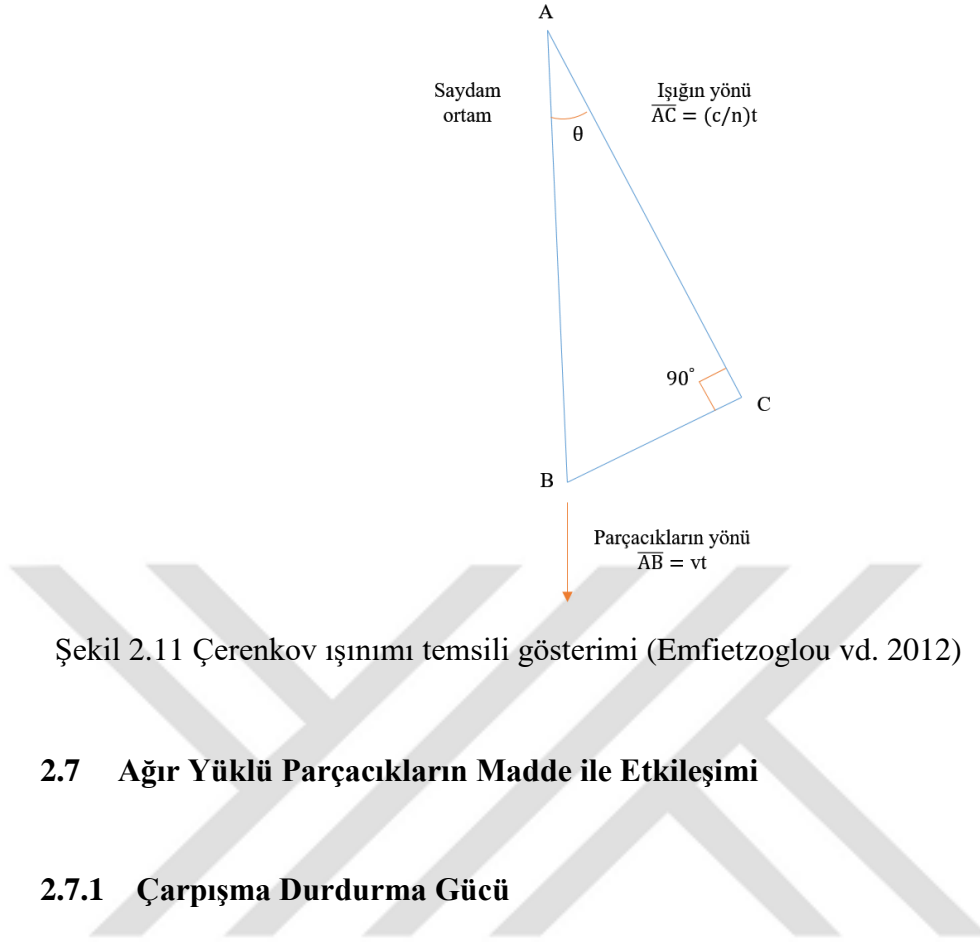
ile ifade edilmektedir (Emfietzoglou vd. 2012). Burada menzil gcm^{-2} ve kinetik enerji MeV birimlerindedir.



Şekil 2.10 Farklı malzemelerde elektron için cm biriminde SY Y menzili (Emfietzoglou vd. 2012)

2.6.5 Cherenkov Işınımı

Yüklü bir parçacık, bir yalıtkan içinden, bu ortamdaki ışığın hızından daha büyük bir sabit hızda geçtiğinde, görünür bir mavi parlaklık yayımlanır. Bu olay Cherenkov ışınımı olarak adlandırılır ve süpersonik bir uçağın şok dalgasına benzemektedir. Yüklü parçacık ilerledikçe, ortamdaki yerel elektromanyetik alanı bozar. Ortamın yörünge elektronları yer değiştirecek ve atomlar yüklü bir parçacığın ilerleyen elektromanyetik alanı tarafından polarize hale gelecektir. Bozulma geçtikten sonra yalıtkanın elektronları kendilerini denge noktasına geri getirdikçe, fotonlar yayımlanırlar.



Şekil 2.11 Çerenkov ışınımı temsili gösterimi (Emfietzoglou vd. 2012)

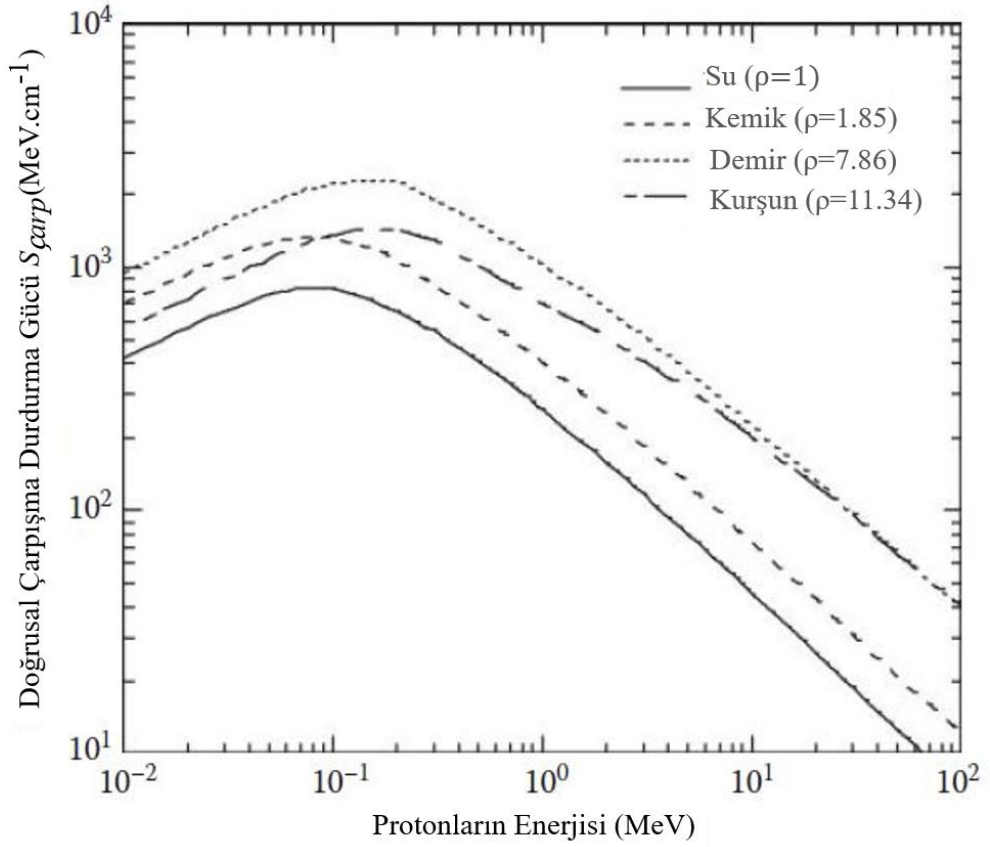
2.7 Ağır Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

2.7.1 Çarpışma Durdurma Gücü

Ağır yüklü parçacıklar için çarpışma durdurma gücü formülü H.A. Bethe tarafından relativistik kuantum mekaniği kullanarak türetilmiştir (Emfietzoglou vd. 2012).

$$S_{\text{çarp}} = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi r_e^2 m_e c^2 z^2 Z N_A}{\beta^2 A} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1 - \beta^2)} - \beta^2 \quad (2.27)$$

Burada $r_e = 2.818 \times 10^{-15}$ m klasik elektron yarıçapını, $m_e c^2 = 0.511$ MeV elektronun durgun kütle enerjisini, z gelen parçacığın elektriksel yükünü (elektron için 1), $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ mol⁻¹ Avagadro sayısını, β görelî hızını (v/c), I soğurucu malzemenin ortalama uyarılma enerjisini, Z soğurucu malzeme atomunun atom numarasını, A soğurucu malzeme atomunun kütle numarasını temsil etmektedir. Şekil 2.12, protonlar için çeşitli malzemelerin doğrusal çarpışma durdurma gücünü göstermektedir. Şekil 2.13 ise α -parçacıkları için olanları göstermektedir.



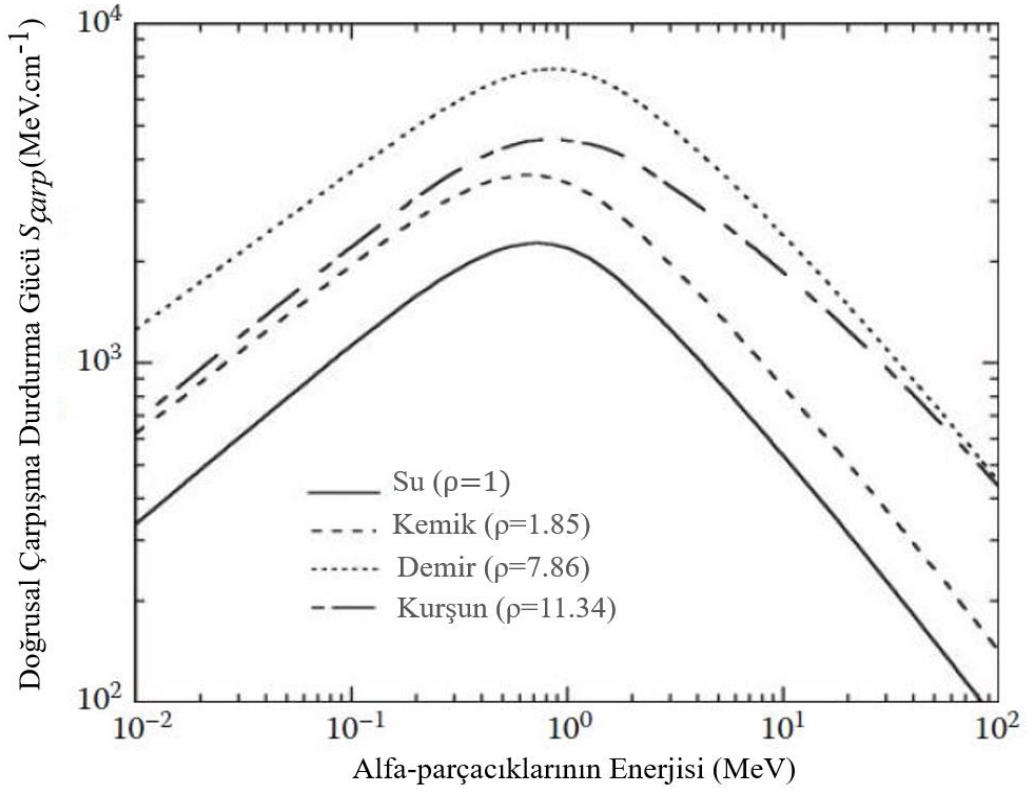
Şekil 2.12 Su, kemik, demir ve kurşun malzemelerinin proton için doğrusal çarpışma durdurma güçleri (Emfietzoglou vd. 2012)

Bir parçacığın durma gücü biliniyorsa, aynı hızdaki farklı bir parçacığın durma gücünü tahmin etmek mümkündür. Örneğin, proton ve farklı bir ağır parçacığın aynı V hızında hareket ettikleri varsayılır. Kinetik enerjiler aşağıdaki gibi verilir.

$$T_p = \frac{1}{2} m_p V^2, \quad T_{AP} = \frac{1}{2} m_{AP} V^2$$

$$T_{AP} = T_p \frac{m_{AP}}{m_p} \quad (2.28)$$

Burada T_p protonun kinetik enerjisini, m_p protonun kütlesini, T_{AP} ağır parçacığın kinetik enerjisini, m_{AP} ağır parçacığın kütlesini ve V parçacıkların hızını temsil etmektedir.



Şekil 2.13 Su, kemik, demir ve kurşun malzemelerinin α -parçacıkları için doğrusal çarpışma durdurma güçleri (Emfietzoglou vd. 2012)

Buna göre α -parçacıklarını ele alırsak, 4 MeV enerjiye sahip α -parçacıklarının hızı 1 MeV enerjili protonların hızına eşittir. S_p 'yi kullanarak S_α

$$S_\alpha = S_p \left(\frac{z_\alpha}{z_p} \right)^2 = 4S_p \quad (2.29)$$

ile ifade edilebilir. Burada S_p proton için çarpışma durdurma gücünü, S_α α -parçacığı için çarpışma durdurma gücünü, z_p protonun elektriksel yükünü ve z_α α -parçacığının elektriksel yükünü temsil etmektedir. Bu nedenle, 4 MeV α -parçacıklarının çarpışma durdurma gücü, 1 MeV enerjiye sahip protonunun dört katına eşittir. Bu ölçeklendirme kanunu, yük değiştirme süreçlerinin ihmal edilebileceği yüksek enerjili bölgeler için etkilidir. α -parçacıkları dışındaki parçacıklar için çarpışma durdurma güçleri, Çizelge 2.3'te gösterildiği gibi ölçeklendirme kanunundan hesaplanabilir.

Çizelge 2.3 Farklı örnekler için ölçeklendirme kanunu katsayıları (Emfietzoglou vd. 2012)

Proton		Döteron		${}^3\text{He}^{+2}$		α		${}^{12}\text{C}^{+6}$	
		T	S	T	S	T	S	T	S
T_p	S_p	$T_p \times 2$	$S_p \times 1$	$T_p \times 3$	$S_p \times 4$	$T_p \times 4$	$S_p \times 4$	$T_p \times 12$	$S_p \times 36$
1	260.6	2	260.6	3	1.042	4	1.042	12	9.382
2	158.5	4	158.5	6	634.0	8	634.0	24	5.706
3	117.1	6	117.1	9	468.4	12	468.4	36	4.216
4	94.0	8	94.0	12	376.0	16	376.0	48	3.384
5	79.1	10	79.1	15	316.4	20	316.4	60	2.848
10	45.6	20	45.6	30	182.4	40	182.4	120	1.642

T : Kinetik enerji (MeV), S : Doğrusal çarpışma durdurma gücü ($\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}$)

2.7.2 Nükleer Durdurma Gücü

10 keV'den daha düşük enerjiye sahip olan ağır yüklü parçacıkların elastik saçılmasından kaynaklanan enerji kaybı göz ardı edilemez. Bu, nükleer durdurma gücü olarak adlandırılır ve kinematik ilişkiden türetilen hedef çekirdeğin geri tepme enerjisi anlamına gelmektedir. Bölüm 2.5'te detaylıca açıklanan diferansiyel tesir kesiti, elastik saçılma için $d\sigma_{el}/d\Omega$ olarak yazıldığında, **nükleer durdurma gücü** $S_{nük}$,

$$S_{nük} = \frac{2\pi N_A \cdot \rho}{A} \int_0^\pi \frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} W(\theta, T) \sin\theta d\theta \quad (2.30)$$

ile ifade edilmektedir (Emfietzoglou vd. 2012). Burada ρ malzemenin yoğunluğudur, $W(\theta, T)$ geri tepme enerjisidir ve saçılma açısı θ ya bağlıdır. T ise yüklü parçacığın kinetik enerjisidir. Gelen parçacığın kütesini M , ve hedef atomun kütesini M_h kullanarak $W(\theta, T)$,

$$W(\theta, T) = 4T \frac{M_h M}{(M_h + M)^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (2.31)$$

olarak elde edilir. Birkaç MeV ve üzerinde enerjiye sahip ağır yüklü parçacıklar için elastik saçılma tesir kesiti, Rutherford tesir kesiti ile tanımlanmıştır.

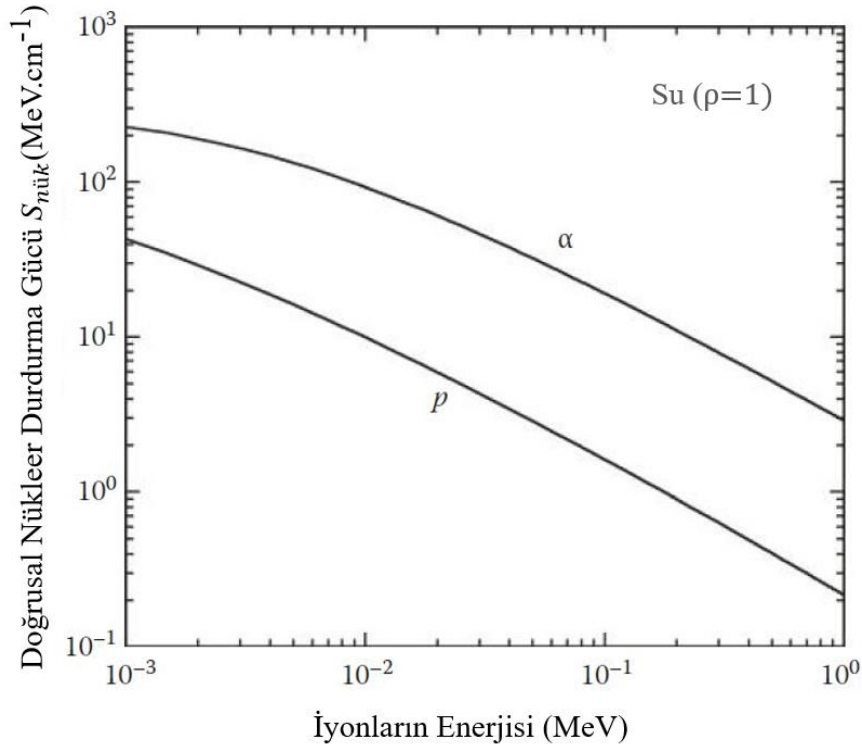
$$\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = \frac{N_A Z^2 z^2 r_e^2}{4A} \left(\frac{mc}{P\beta}\right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (2.32)$$

Burada P yüklü ağır parçacığın momentumudur ve

$$P = \frac{1}{c} \sqrt{(T + Mc^2)^2 - (Mc^2)^2} \quad (2.33)$$

ile ifade edilmektedir. Yüklü ağır parçacıklar için ışınımsal durdurma gücü ihmal edilebileceğinden, toplam durdurma gücü, çarpışma kaybının ve nükleer kaybın toplamıdır.

$$S_{top} = S_{\text{çarp}} + S_{\text{nük}} \quad (2.34)$$



Şekil 2.14 Suyun farklı enerjilerdeki protonlar ve α -parçacıkları için durdurma gücü (Emfietzoglou vd. 2012).

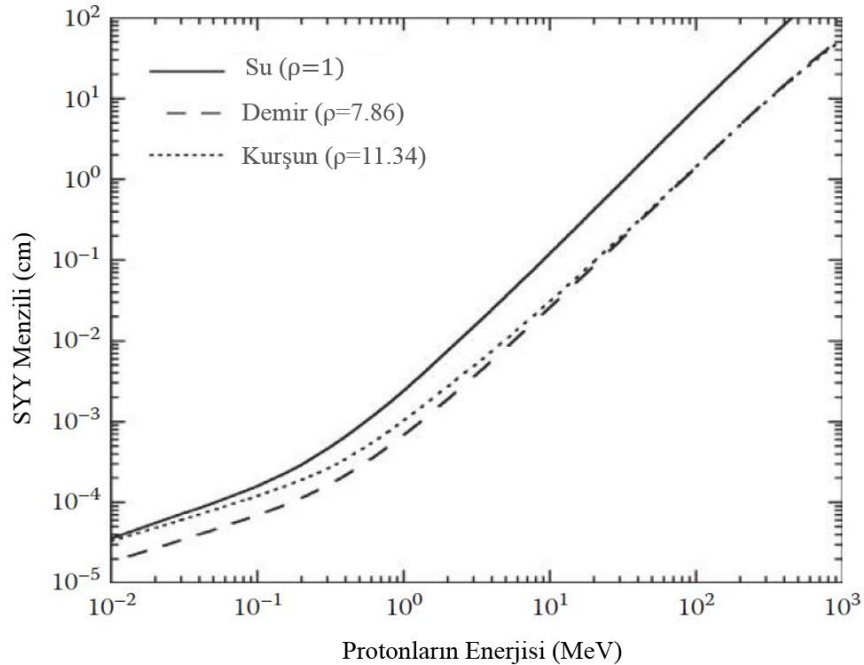
Nükleer durma gücünün toplam durdurma gücüne katkısı 10 keV'den büyük enerji bölgesi için ihmal edilebilir düzeydedir; bununla birlikte, enerji azaldıkça etkisi artar. Bu, 1 keV'de yaklaşık % 30 oranına ulaşmaktadır (Emfietzoglou vd. 2012).

2.7.3 Menziller

Yüklü ağır parçacıklar, elektronların aksine, daha az etkileşirler. Hemen hemen düz bir çizgi üzerinde sürekli yavaşladıkları varsayılmaktadır. Yüklü ağır parçacıklar için SYR menzili $R(T)$,

$$R(T) = \int_0^T [S_{\text{çarp}}(T) + S_{\text{nük}}(T)]^{-1} dT \quad (2.35)$$

ile ifade edilmektedir (Emfietzoglou vd. 2012). Şekil 2.15, farklı enerjilerdeki protonun, çeşitli materyallerdeki menzillerini cm biriminde göstermektedir. Şekil 2.16, standart koşullar altında havadaki α -parçacığının menzili göstermektedir. Bir parçacığın menzili biliniyorsa, başka bir parçacığın menzili de elde edilebilmektedir.



Şekil 2.15 Farklı enerjilerdeki protonun, su, demir ve kurşun içerisindeki menzilleri (Emfietzoglou vd. 2012)

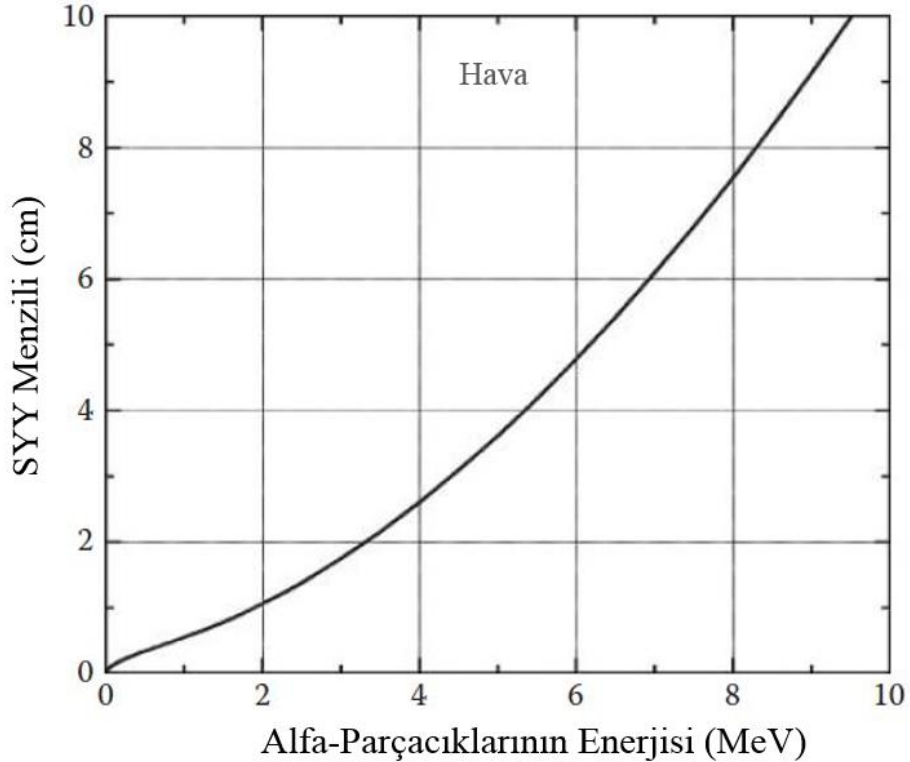
Aynı başlangıç hızına sahip iki farklı parçacığın arasındaki ilişki

$$\frac{R_1(\beta)}{R_2(\beta)} = \frac{z_2^2 M_1}{z_1^2 M_2} \quad (2.36)$$

ile ifade edilmektedir (Emfietzoglou vd. 2012). Burada $R_1(\beta)$ 1. parçacığın menziline, M_1 1. parçacığın kütlesini, z_1 1. parçacığın atom numarasını, $R_2(\beta)$ 2. parçacığın menziline, M_2 2. parçacığın kütlesini, z_2 2. parçacığın atom numarasını ve β göreceli hızı temsil etmektedir. Protonun 2. parçacık olarak menziline bilindiği varsayılırsa, diğer parçacığın menzili, R ,

$$R(\beta) = \frac{M_1}{z_1^2} R_p(\beta) \quad (2.37)$$

ile bulunabilmektedir.



Şekil 2.16 Farklı enerjilerdeki α -parçacıklarının havadaki menzilleri (Emfietzoglou vd. 2012)

2.8 Fotonların Madde ile Etkileşimleri

Enerjik, yüklü parçacıklar hareket halindeyken, madde içindeki atomlarla elektriksel etkileşimler nedeniyle sürekli olarak enerji kaybederler. Diğer taraftan, fotonlar, yük nötrlüklerinden dolayı farklı bir enerji kaybı mekanizmasına sahiptirler. Fotonlar, bir atom ile etkileşime girmeden önce belli bir menzil katedebilmektedir. Bu menzil, ortamın ve fotonun enerjisine bağlı olarak, istatistiksel olarak birim uzunluk başına etkileşim olasılığından etkilenmektedir. Bazen etkileşen fotonlar soğurular ve kaybolur, ya da saçılır ve yön değiştirir. Her iki durumda da enerji kaybının yaşanıp yaşanmaması mümkündür. Thomson saçılması ve Rayleigh saçılması, enerji transferi olmaksızın, madde ile foton etkileşimi süreçleridir. Fotonların madde içindeki enerji birikiminin temel mekanizmaları fotoelektrik etki, Compton saçılması, çift oluşumu ve fotonükleer tepkimelerdir (Emfietzoglou vd. 2012).

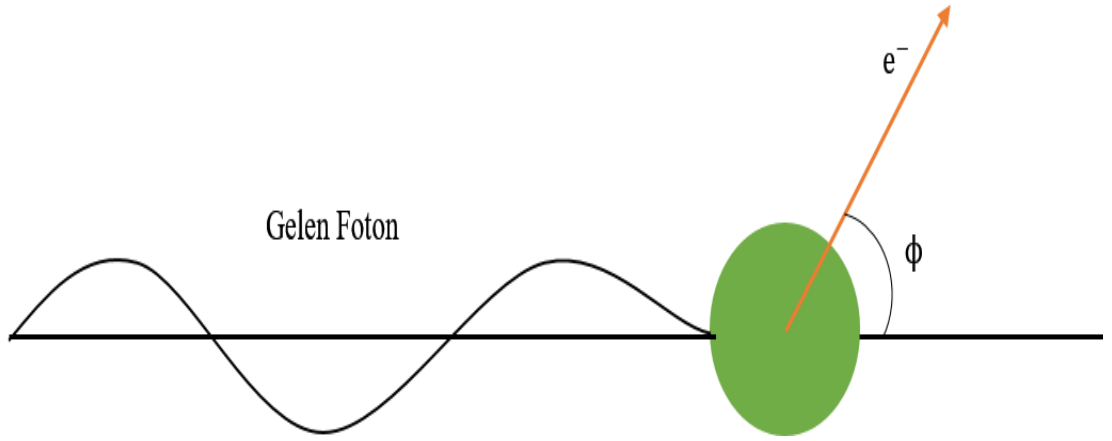
2.8.1 Fotoelektrik Etki

Bir fotonun enerjisi tamamen bir atom tarafından emilebilir. Bu koşullar altında, soğurulan fotonun enerjisi, atomun bir yörünge elektronuna aktarılır ve elektron serbest bırakılır ve bir iyon çiftinin oluşumuyla sonuçlanır (Şekil 2.17). Sonuç olarak, yayımlanan elektronun enerjisi, çarpan fotonun enerjisiyle elektronun bağlanma enerjisinin farkına eşittir. Bu durum Einstein'ın fotoelektrik denklemiyle açıklanmaktadır.

$$E_{ce} = h\nu - E_{be} \quad (2.38)$$

Burada E_{ce} fırlatılan elektronun kinetik enerjisini, $h\nu$ gelen fotonun enerjisini ve E_{be} elektronun bağlanma enerjisini temsil etmektedir.

Fırlatılan elektron bir beta parçacığdır ve daha önce beta parçacıkları için tarif edildiği gibi (Bölüm 2.3.2) madde içinden geçerken iyonlaşmaya (bu durumda ikincil iyonlaşma) sebep olmaktadır.



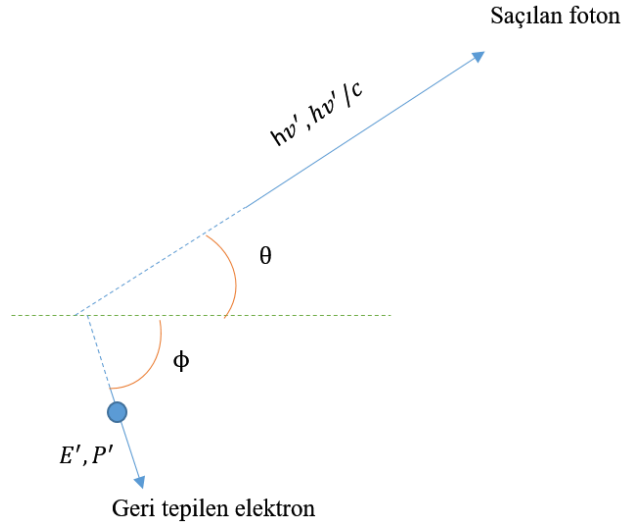
Şekil 2.17 Fotoelektrik olayının temsili gösterimi (Krane 1988)

K veya L kabuğundan bir elektron fırlatıldığında, ortaya çıkan boşluğu doldurmak için dış kabuklardaki elektronlar yüksek enerji seviyelerinden düşük seviyelere geçmektedir. Elektronların enerji seviyelerindeki bu geçişler, yörünge elektronları tarafından yumuşak (düşük enerjili) X-ışınları olarak görünen bir enerji yayınımına sebep olmaktadır. X-ışınımını özellikler açısından gama ışınımını ile aynıdır. Temel fark ise kaynaklarıdır. Gama ışınımını bir atomun çekirdeğinin enerji seviyeleri arasındaki geçişlerden kaynaklanırken, X-ışınımını yörünge elektronlarının enerji seviyeleri arasındaki geçişlerden kaynaklanır (L'Annunziata 2012).

2.8.2 Compton Saçılması

X-ışını veya γ -ışını fotonu, madde içerisindeyken malzeme atomlarının dış elektronlarıyla etkileşir. Bu etkileşim elastik olmayan bir saçılma sürecidir ve Compton saçılımı olarak adlandırılır. Bu etkileşim ışığın sadece bir dalga olarak açıklanamayacağını gösterdiği için önemlidir. Compton'un deneyi; ışığın, enerjisi frekansla orantılı olan parçacıklar olarak davrandığını göstermiştir.

Compton saçılımının kuantum modeli, enerjisi $h\nu$ ve momentumu $h\nu/c$ olan bir fotonun, durgun halinde bulunan serbest bir elektronla etkileşmesidir.



Şekil 2.18 Compton saçılımı foton ve elektron etkileşimi (Emfietzoglou vd. 2012)

Çarpışmadan sonra, foton, enerjisi hv' ve momentumu hv'/c olacak şekilde θ açısıyla saçılır ve bir elektron, E' enerjisi ve P' momentumu ile bir açıda fırlatılır. Elektron durgun kütlesi m_e ve $\beta=v/c$ hızı ve E', P' için

$$E' = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad P' = \frac{m_e c \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.39)$$

ifadeleri yazılabilir. Enerji ve momentum korunum yasalarından

$$hv + m_e c^2 = hv' + E'$$

$$\frac{hv}{c} = \frac{hv'}{c} \cos\theta + P' \cos\phi$$

$$\frac{hv'}{c} \sin\theta = P' \sin\phi \quad (2.40)$$

denklemleri elde edilmektedir. Denklem (2.39) ve Denklem (2.40) kullanılarak saçılmış fotonun enerjisi,

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.41)$$

ifadesi ile, geri tepilen elektronun enerjisi ise

$$T = hv - hv' = hv \frac{1 - \cos\theta}{1 - \cos\theta + m_e c^2 / hv} \quad (2.42)$$

ifadesiyle elde edilmektedir. Eğer $\theta = 180^\circ$ ise, elektron maksimum enerjiye sahiptir:

$$T_{maks} = \frac{2hv}{2 + m_e c^2 / hv} \quad (2.43)$$

Gama-ışını spektroskopisi alanında T_{maks} , **Compton Sınırı** olarak bilinir (Emfietzoglou vd. 2012). T_{maks} 'in $hv \gg m_e c^2$ için hv 'ye yaklaştığı bulunmuştur. θ ve ϕ arasındaki ilişki

$$\cot\left(\frac{\theta}{2}\right) = 1 + \frac{hv}{m_e c^2} \tan\phi. \quad (2.44)$$

ile ifade edilmektedir. θ , 0° 'den 180° 'ye arttığında ϕ , 90° 'den 0° 'ye düşer. Bu, fotonun tüm yönlere dağıldığı, elektronun geri tepilme açısının da ileri açılarla ($0 \leq \phi \leq 90^\circ$) sınırlı olduğu anlamına gelmektedir (Emfietzoglou vd. 2012).

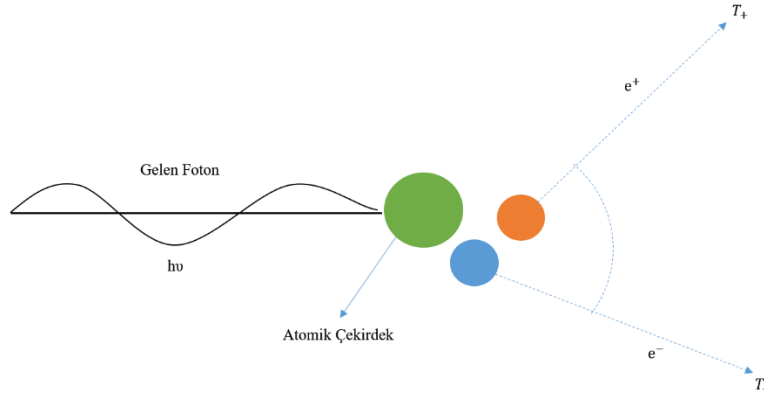
2.8.3 Çift Oluşumu

Enerjisi 1.02MeV ($2m_e c^2$)'den büyük olan fotonların etkileşimlerinde, çift-oluşum süreci büyük bir öneme sahiptir. Bu etkileşim sürecinde foton tamamen soğurulur ve bir pozitron ile elektron üretilir. Gelen fotonun enerjisi hv 'ye eşittir (Emfietzoglou vd. 2012).

$$hv = (T_- + m_e c^2) + (T_+ + m_e c^2) \quad (2.45)$$

Burada T_- ve T_+ sırasıyla elektron ile pozitronun enerjileridir ve $m_e c^2 = 0.511\text{ MeV}$ elektronun durgun kütle enerjisidir.

Çift-oluşumu bir çekirdek alanında gerçekleşir. Çekirdeğin veya yörünge elektronların seviyeleri, ancak çekirdeğin fotonun momentumunu soğurması durumunda değişir. Çift-oluşumu serbest uzayda gerçekleşemez çünkü enerji ve momentum aynı anda korunamaz.



Şekil 2.19 Gelen fotonun atomik çekirdek ile etkileşimi sonucunda gerçekleşen çift oluşumu

Sürecin vakumda gerçekleştiğini düşünecek olursak, üretilen çiftin maksimum toplam momentumu, parçacıklar aynı hızda aynı yönde hareket ettiğinde ortaya çıkacaktır. E enerjisi için momentum

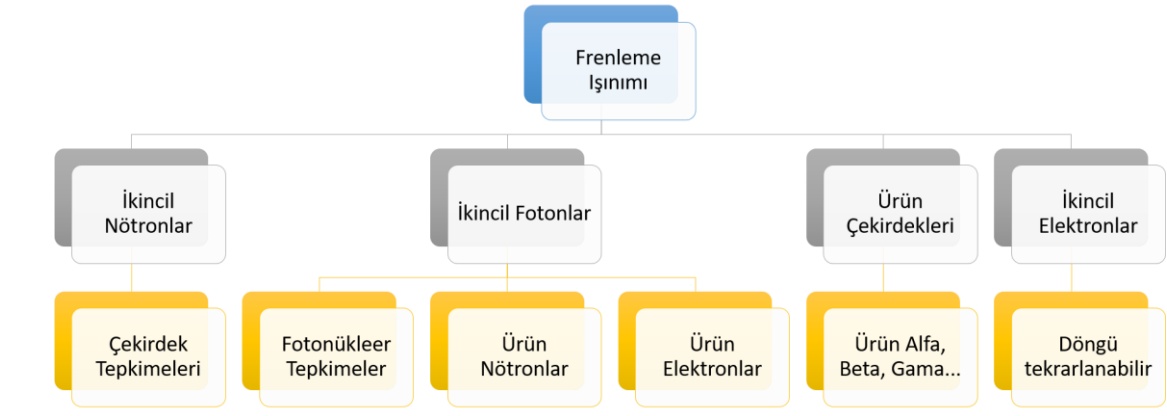
$$P = \sqrt{\left(\frac{E}{c}\right)^2 - (2m_e c)^2} < \frac{E}{c} \quad (2.46)$$

ile verilir. Foton, aynı toplam enerjiye sahip çiftten daha büyük olan momentum $P = E/c$ 'ye sahiptir. Bu nedenle, atom çekirdeğinin momentumu dengelemek için mevcut olması gereklidir (Emfietzoglou vd. 2012).

2.8.4 Frenleme Işınımı Etkileşimleri

Bölüm 2.6.3'te detaylıca tartışılan frenleme ışınımı foton etkileşimlerinin ortaya çıkmasında önemli bir role sahiptir. Demet durdurucu sistemlerinde nükleer etkileşimler zincirleme tepkimeler şeklinde gerçekleşirler. Bu nedenle bir sürece sebep olan kaynak etkileşim, çok çeşitli olabilmektedir. Frenleme ışınımı demet durduruculardaki zincirleme etkileşimlerin temelini oluşturmaktadır. Parçacık demetindeki elektronların oluşturduğu frenleme ışınımı sonucunda ortaya çıkan fotonlar, durdurucu malzemelerinin çekirdekleriyle etkileşirler. Bu etkileşimler sonucunda ikincil fotonlar veya ikincil nötronlar ortaya çıkmaktadır. Oluşan ikincil parçacıklar, çekirdeklerle etkileşerek ikincil

elektronların, nötronların ve radyoaktif izotopların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.



Şekil 2.20 Frenleme ışınımı etkileşim ağacı

2.8.5 Fotonükleer Tepkimeler

Fotonükleer tepkimeler fotonların çekirdek tarafından soğurulmasıyla nükleonların fırlatıldığı süreçlerdir. Örnek olarak, bir $^{206}_{82}\text{Pb}$ çekirdeği tarafından bir gama-ışını yakalandığında bir nötron yayımlanır. Bu tepkimenin gösterimi $^{206}_{82}\text{Pb}(\gamma, n)^{205}_{82}\text{Pb}$ şeklindedir. Bunun gerçekleşmesi için fotonların, nükleonların bağlanma enerjisinden daha fazla enerjiye sahip olması gerekir. Bu enerji seviyesi genellikle birkaç MeV'nin üzerindedir. Yayılan nötronun kinetik enerjisi, fotonun enerjisiyle bağlanma enerjisinin farkına eşittir. Fotonükleer reaksiyonun gerçekleşme olasılığı, fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift-oluşumu ile karşılaştırıldığında çok daha küçüktür. Bununla birlikte, bu tepkime, ışıınımdan korunma açısından önemlidir çünkü, nötronlar üretilmektedir. Ek olarak, tepkimeden sonra kalan çekirdek sıklıkla radyoaktif hale gelir. Bu nedenlerden dolayı bu tepkime, yüksek enerjili elektron hızlandırıcılarının ortamında önemli bir rol oynar. Çizelge 2.4, nötron üreten (γ, n) tepkimelerin, tepkime enerjilerini göstermektedir. (γ, p) tepkimeleri için eşik enerjisi, (γ, n) tepkimelerinin eşik enerjilerinden daha büyüktür, çünkü protonların Coulomb bariyerinin itme kuvvetini aşması için daha yüksek enerjiye ihtiyaç vardır. Tepkimeler $(\gamma, 2n)$, (γ, np) ve (γ, α) , (γ, n) ve (γ, p) 'den farklıdır (Emfietzoglou vd. 2012).

Çizelge 2.4 Nötron üreten (γ, n) tepkimeleri ve enerjileri (Emfietzoglou vd. 2012)

Tepkime	Tepkime Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdeğin Bozunma Türü
$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	-19.0	β^+
$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	-10.7	β^+
$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	-16.3	β^+
$^{23}\text{Na}(\gamma, n)^{22}\text{Na}$	-12.1	β^+
$^{27}\text{Al}(\gamma, n)^{26}\text{Al}$	-14.0	β^+
$^{40}\text{Ca}(\gamma, n)^{39}\text{Ca}$	-15.9	β^+
$^{56}\text{Fe}(\gamma, n)^{55}\text{Fe}$	-11.2	EC
$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$	-10.9	β^+
$^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$	-10.2	EY(100) β^- (38), β^+ (19)
$^{206}\text{Pb}(\gamma, n)^{205}\text{Pb}$	-8.25	EY
$^{207}\text{Pb}(\gamma, n)^{206}\text{Pb}$	-6.85	Kararlı
$^{208}\text{Pb}(\gamma, n)^{207}\text{Pb}$	-8.1	Kararlı

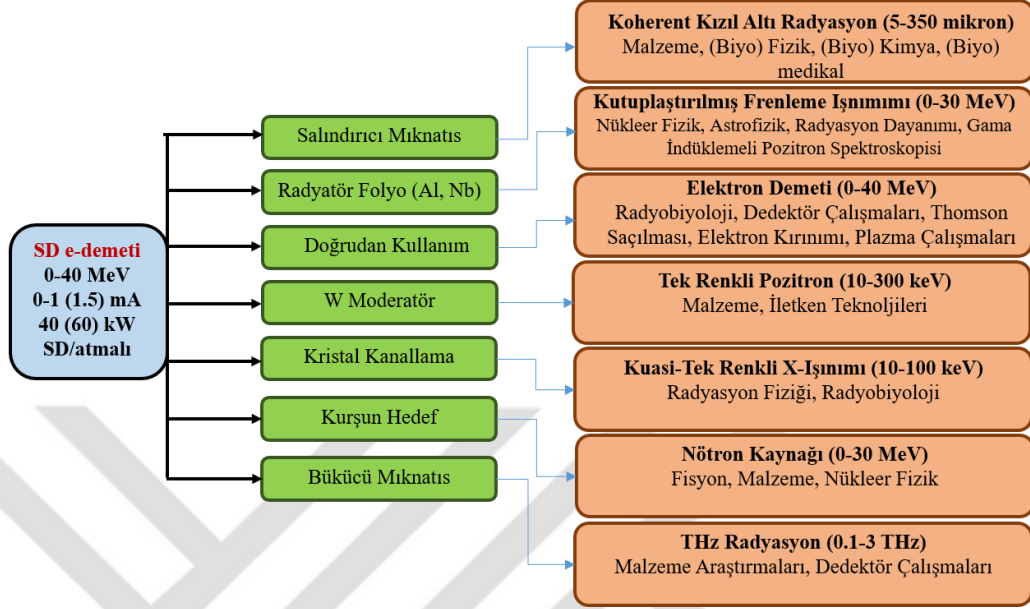
3. ELEKTRON HIZLANDIRICISI VE LAZER TESİSİ (TARLA)

Elektron Hızlandırıcısı ve Lazer Tesisi (TARLA) hızlandırıcılara dayalı ışınım kaynağı olarak tasarlanmıştır ve kurulumu Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü (HTE) bünyesinde devam etmekte olan bir tesistir. Hızlandırıcısı **son teknoloji ürünü süper iletken** teknolojiye dayalı olan TARLA tesisinde elektronlar 40 Milyon Elektron Volta (MeV) hızlandırılarak, hızlandırılan demet ile ilk aşamada **Gama ışını (nükleer radyasyon)** ve kızıl-ötesi bölgesinde **Serbest Elektron Lazeri (yüksek güçlü lazer)** üretilmesi amaçlanmaktadır (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015).

TARLA, “**çok güçlü**” elektron demeti ve bu demet ile üretilen ikincil ışınım ile birlikte ülkemiz ve bölgemizde ilk hızlandırıcıya dayalı araştırma altyapısı tesisi olacaktır. 2018 yılından başlayarak kademeli olarak çalışır hale gelmeye başlayan bu tesis ve eklenecek 5 deney istasyonu, Türkiye’nin ileri araştırma alanında dünya haritasında yer almasını sağlayacaktır. Deney istasyonlarının artırılması ile tesis, birçok ikincil demeti üretebilir nitelikte olup, dünyada önde gelen araştırma altyapılarından biri olma özelliğine sahiptir. TARLA, Türkiye’nin yanı sıra Doğu Akdeniz bölgesinde de eşsiz araştırma fırsatları sunan, çok yönlü araştırma altyapısı araçlarından biri olacaktır. Orta Avrupa’da 12 sinkrotron ve 7 SEL tesisi bulunurken TARLA, hızlandırıcısı ve diğer ikincil parçacıkları ile Polonya’daki SOLARIS ve Ürdün’deki SESAME sinkrotron tesislerini tamamlar nitelikte, AB-13 ve Doğu Akdeniz ülkeleri arasındaki coğrafi boşluğu tamamlayacak, bölgede tek hızlandırıcı tabanlı araştırma ve ışınım kaynağı tesisi olacaktır (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015).

Tesis tamamlandığında bünyesinde bulunan elektron demeti ve ışınım kaynakları ile başta **malzeme bilimi, enerji, uzay ve nükleer teknolojiler, izotop üretimi, sağlık bilimi ve teknolojileri** gibi alanlardaki modern araştırmaların ülkemizde de yapılmasını olanaklı kılacaktır. Diğer yandan tesisi oluşturan hemen hemen tüm bileşenler ileri teknoloji ürünüdür. Bir başka deyişle, **süper iletkenlik, yüksek frekans, yüksek güçlü elektromanyetizma, kriyojenik (soğu-bilim), çok yüksek vakum (UHV), hassas mekanik (mikro-hassasiyet), gerçek zamanlı kontrol, gömülü sistemler, lazer,**

X-ışını ve THz radyasyon üretebilme kabiliyetine sahiptir. Bu ışınların üretim metodu ve kullanım alanları hakkında özet bilgi Şekil 3.2’te gösterilmiştir.



Şekil 3.2 TARLA tesisinin potansiyel kullanım alanları (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015)

3.1 TARLA hızlandırıcısı

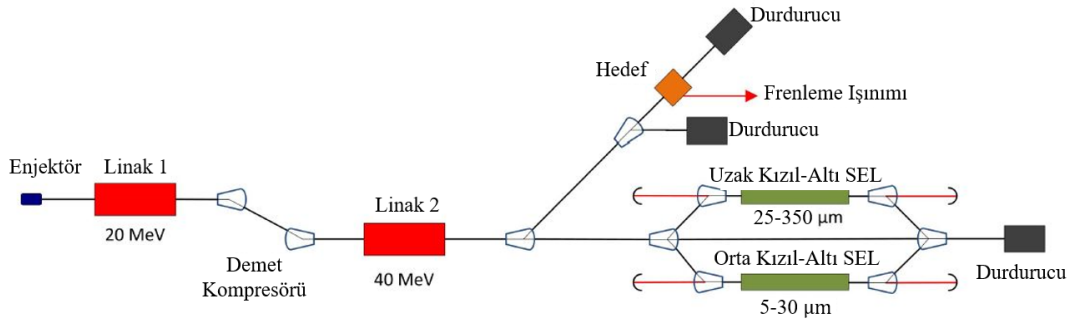
Hızlandırıcı, özet olarak, i. Enjektör, ii. Ana Linak (lineer hızlandırıcı), iii. Taşınım hatları olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır (Aksoy ve Lehnert 2014).

Enjektör 250 keV'da yüksek akım SD elektron demetininin üretiminden sorumludur. Paket sıkıştırıcı ile ayrılmış iki süperiletken hızlandırıcı modülü, demeti 15-40 MeV enerjisine hızlandıracak ve iki bağımsız optik rezonatör sistemi SEL ışınımını üretmek için kullanılacaktır (Aksoy ve Lehnert 2014).

Yaklaşık 6 m uzunluğundaki TARLA enjektör sistemi, ısıl yükünel (termiyonik) doğru akım elektron tabancası, 260 MHz ve 1.3 GHz frekanslarda çalışan iki adet paketleyici kovuk, odaklayıcı solenoid mıknatıslar ve dipol mıknatıslardan oluşmaktadır. Enjektör sisteminde ayrıca çok sayıda demet teşhis donanımı bulunmaktadır (Aksoy ve Lehnert 2014).

Ana hızlandırıcı bölümü her biri iki adet TESLA kovuğu (Aune vd. 2000) içeren iki adet süper iletken hızlandırıcı modülü ile, modüller arasına yerleştirilmiş bir paket sıkıştırıcıdan oluşmaktadır. Her bir TESLA kovuğu sürekli modda 12 MV/m gradyan sağlamak için tasarlanmış olup, TARLA hızlandırıcısı ile prensipte maksimum 48 MeV'lik demet enerjisine ulaşmak mümkün olacaktır. Ancak SEL üretiminde ihtiyaç duyulan düşük enerji yayılımı, düşük enerjili enjektör ile yüksek enerjili linak arasındaki yakalama süreci, kriyojenik kayıp gibi etmenlerden dolayı tesiste 40 MeV enerji öngörülmektedir (Aksoy ve Lehnert 2014).

Uygulama noktasına demetin taşınması için izosenkron ve akromatik demet hatları öngörülmüş olup, demetin gerek SEL üretim bölgesine, gerekse frenleme ışınımı üretim bölgesine taşınmasında emittans artışını en düşük seviyelere indirgeyecek şekilde demet hatları tasarlanmıştır (Aksoy ve Lehnert 2014). Tesiste üretilecek demet parameterleri ile ana hızlandırıcı bölümleri ve üretilecek ikincil demetler sırasıyla Çizelge 3.1 ve Şekil 3.3 ile verilmiştir.



Şekil 3.3 TARLA Tesisi makine şematığı (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015)

Çizelgede görüldüğü gibi 1.5 mA akım ile 40 MeV enerjiye hızlandırılan demet yaklaşık 60 kW demet gücünü bünyesinde barındırmaktadır ve demetin boyutları göz önünde tutulduğunda bu güç yaklaşık 10 mm²'ye odaklanmıştır. Bu denli yüksek güçlü elektron demetinin kullanılmadan sonra durdurulması gerekmekte olup, demet durdurucularının sayısı ve konumu Şekil 3.3 ile verilmiştir. Bu tez kapsamında, TARLA'nın ihtiyaçları

doğrultusunda maksimum 40 MeV enerjide ve 1.5 mA akımda hızlandırılan elektron demetin durdurulması amacıyla demet durdurucusu tasarlanmıştır.

Çizelge 3.1 TARLA tesisi demet parametreleri (Aksoy ve Karsli (Eds) 2015)

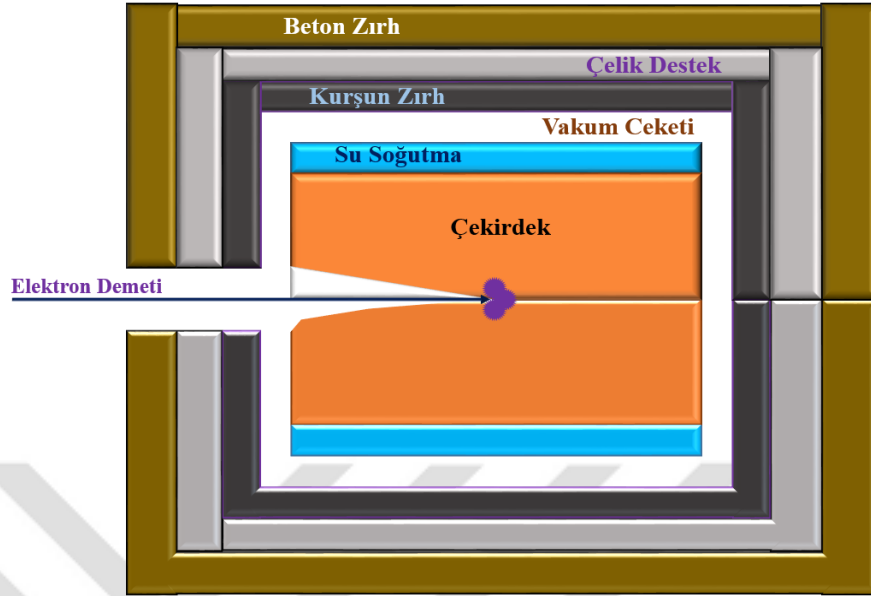
Parametre	Birim	Değer
Demet Enerjisi	MeV	15-40
Maks. Ortalama Demet Akımı	mA	1.5
Maks. Demet Yüğü	pC	120
Yatay Emittans	mm.mrad	<15
Dikey Emittans	mm.mrad	<12
Boyuna Emittans	keV.ps	<85
Demet Boyu	ps	0.4-6
RMS Enerji Saçılımı	keV	<100
Demet Tekrarlama Oranı	MHz	13
Makro Atma Süresi	µs	50→Sürekli Dalga
Makro Atma Tekrarlama Oranı	Hz	1→Sürekli Dalga

3.2 Demet Durdurucu

Demet durdurucular parçacık hızlandırıcılarda; parçacık demetinin güvenli bir şekilde durdurulduğu, nötrleştirildiği ve soğurulduğu sistemlerdir. Parçacık demetleri kontrollü şekilde durdurulmazlarsa demet hattına, hızlandırıcı bileşenlerine ve bulunduğu ortama zarar verebilirler. Hızlandırıcılarda enerjilendirilen bu demetler, etkileşime girdikleri yapıyı uyararak yapının radyoaktif hale gelmesine sebebiyet verirler. Bu nedenle demet durdurucular tasarlanırken insan ve çevre faktörü değerlendirilerek tasarım yapılır.

Demet durdurucular Şekil 3.4’de görüldüğü üzere temel olarak 4 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; çekirdek, su soğutması, vakum ceketi ve dış zırhlamadır. Parçacık demeti ile demet durdurucu eş eksenslidir ve demet Şekil 3.4’de görülen yarıktan geçerek çekirdek

kısmına doğrudan çarpmaktadır. Demet çarptığında, çekirdek malzemeyi hem ısıtır hem de radyoaktif hale getirir.



Şekil 3.4 Demet durdurucusunun şematik gösterimi

Bir demet durdurucusunda dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda özetlenmiştir:

- TARLA’da hızlandırılacak olan demetin gücü etkin bir şekilde soğurulmalıdır: 40 MeV, 1.5 mA, Güç = 40 MeV*1.5 mA = 60 kW
- Demetin durdurulması esnasında mümkün olan en az izotop ve ikincil parçacık üretimi sağlanmalıdır: Minimum gama radyasyonu, minimum nötron→ minimum zırhlama gereksinimi
- Demet durdurucuda oluşacak ısı dışarı aktarılabilir: Mümkün olan en iyi ısı iletkenlik ve soğutma sistemi, erime sıcaklığı yüksek malzeme
- Demet durdurucu kullanımı sonrası minimum aktivasyon: Demetin çarpması-durması sonrası ancak yarı ömrü kısa olan izotoplar izinlidir. Örn. Hızlandırıcı odasına 20 dk sonra girilebilir.
- Demet durdurucusunun değiştirilebilir olması: Herhangi bir durum sonucunda demet durdurucusunun değiştirilebilir olması, oluşan radyoaktif ürünlerin insan sağlığına zarar verecek seviyede olmaması gerekir.

Yukarıda maddelenen etkenler, bir demet durdurucusunun tasarım sürecinde temel rollere sahiptir. Bu etkenlere bağı olarak demet durdurucusuna uygun bir malzeme temin edilmelidir. Bu tez çalışmasında ise Çizelge 3.1’de verilen demet parametrelerine ve TARLA Tesisi’nin ihtiyaçlarına uygun olarak, demet durdurucusu tasarımı öncelikli olarak analitik hesaplamalarla ve sonrasında simülasyon programları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Belirtilen çalışmalar Bölüm 4.1 ve Bölüm 5’te detaylı şekilde ele alınmıştır.



4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Demet Durdurucular

Demet durdurucular; Bölüm 3.2’de belirtildiği gibi parçacık demetlerinin güvenli bir şekilde durdurulması ve soğurulması amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu bölümde bir demet durdurucusunun tasarımı için dikkate alınması gereken nükleer süreçler, temel hesaplamalar ile incelenmiştir.

Bir demet durdurucusunun fiziği incelenirken dikkat edilmesi gereken özellikler;

- Parçacıkların durdurucu malzemesi içerisindeki menzilleri,
- Etkileşim sonucu ortaya çıkan radyoaktif izotoplar ve yarı-ömürleri,
- Parçacık demeti durdurucu çekirdeğine çaptığında ortaya çıkan ısı ve güç değerleri,
- Demet durdurucu malzemelerinin temin ve imal edilebilirlik özellikleri,
- Durdurucu durum kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için teşhis sistemlerinin kullanılabilirliği,

şeklinde sıralanabilir (Takei vd. 2010).

Literatür taraması, elektron demet durdurucularının çekirdek kısmı için en uygun malzemelerin bakır, karbon (grafit) ve alüminyum olduğunu göstermektedir (Cossairt 2007, Brugger vd. 2014). Bu yüzden demet durdurucu çekirdeği için çalışmalarımızda bu üç malzeme üzerinde durulmuştur.

Bu bölümde, demet durdurucu analizlerinin gerçekleştirilmesinden önce, analitik olarak yukarıda belirtilen özellikler incelenmiştir. İlk aşamada belirtilen 3 malzeme için elektronların bu malzemelerdeki menzili hesaplanmıştır. Sonrasında elektron demeti enerjisine bağlı olarak oluşabilecek radyoaktif ürün çekirdekler ve olası bozunum çeşitleri incelenmiştir. Son olarak demet çarpışması gerçekleştiğinde ortaya çıkacak olan ısı miktarı ve güç değerleri hesaplanarak, malzemelerin karakteristik özellikleri analitik olarak karşılaştırılmıştır.

4.1.1 Durdurma Güçleri

Demet durdurucusu tasarımında parçacıkların malzemeler tarafından durdurulması, bu malzemelerin elektronları durdurma güçlerine bağlıdır. Durdurma güçleri elektronların bu malzemelerde ne kadar ilerleyebileceğini belirleyen bir etmendir. Bu yüzden durdurma ve ışımsal durdurma güçlerinin hesaplanması gerekmektedir. Elektronların, Çizelge 4.1'deki malzemelerin çarpışma durdurma güçlerini hesaplamak için Matlab (www.mathworks.com/products/matlab, 1994) programı kullanılmıştır. Denklem (2.18)'deki değişkenlerin değerleri; bakır, alüminyum ve karbon (grafit) için Çizelge 4.1'e ve Çizelge 4.2'ye göre atanırsa, bu malzemelerin elektronlar için durdurma güçleri, Çizelge 4.3'teki gibi elde edilir.

Çizelge 4.1 Önerilen çekirdek malzemelerinin özellikleri

Malzemeler	Bakır	Karbon (Grafit)	Alüminyum
Atom Ağırlığı (A)(gram/mol)	63.930	12.010	26.981
Atom Numarası (Z)	29	6	13
Yoğunluk (p)(g/cm ³)	8.960	1.700	2.700

Çizelge 4.2 Menzil hesabı için gerekli sabitler

Sabitler (40 MeV Elektron demeti için)	Değer	Birim
Klasik elektron yarıçapı (r_e)	2.818×10^{-15}	m
Parçacık yükü (z)	1	-
Durgun kütle enerjisi ($m_e c^2$)	0.511	MeV
Avagadro sayısı (N_A)	6.022×10^{23}	atom/mol
β faktörü	0.999	-
γ faktörü	79.277	-

Çizelge 4.3 Analitik olarak elde edilen sonuçlar

Malzemeler				
Parametreler	Bakır	Karbon	Alüminyum	Birim
Uyarılma Enerjisi	314.051	73.800	162.998	eV
1 m ³ 'teki atom sayısı	8.440x10 ²⁵	8.523x10 ²⁵	6.026x10 ²⁵	(Atom/m ³)
Çarpışma Durdurma Gücü ($S_{\text{çarp}}/\rho$)	1.704	2.317	2.117	MeVcm ² /g
Işınımsal Durdurma Gücü ($S_{\text{işin}}/\rho$)	2.942	0.741	1.468	MeVcm ² /g
Toplam Durdurma Gücü (S_{top}/ρ)	4.844	3.058	3.585	MeVcm ² /g

Çizelge 4.4 NIST veritabanından alınan durdurma güçleri (<https://www.nist.gov/pml>, 1998)

Malzemeler				
Parametreler	Bakır	Karbon	Alüminyum	Birim
Çarpışma Durdurma Gücü ($S_{\text{çarp}}/\rho$)	1.582	1.877	1.769	MeVcm ² /g
Işınımsal Durdurma Gücü ($S_{\text{işin}}/\rho$)	2.650	0.750	1.379	MeVcm ² /g
Toplam Durdurma Gücü (S_{top}/ρ)	4.233	2.627	3.148	MeVcm ² /g

Değerler 40 MeV enerjiye sahip elektronlar için geçerlidir.

Buradan anlaşılacağı üzere 40 MeV'lik elektron demeti bakır içerisinde diğer malzemelere göre daha az bir mesafe katedecektir.

4.1.2 Isıl Etmenler

Parçacık demeti durdurucu ile etkileşime geçtiğinde sahip olduğu enerjiyi durdurucuya aktarır. Aktarılan enerji durdurucu çekirdeğinin ısınmasına yol açar. Oluşan ısı, durdurucu malzemesinin karakteristiklerine bağlı olarak, malzemenin yüksek sıcaklıklara çıkmasına sebep olur. Isının atılabilmesi için yeterli güçte bir soğutma sistemi kullanılmalıdır (White 1983). Soğutma sistemi için ise durdurucuya aktarılan enerji ve durdurucu sıcaklığı parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde parçacık demeti etkisiyle durdurucu çekirdek malzemesinin ısıl değişimleri incelenmiştir.

Durdurucu çekirdek malzemesi olarak kullanılması önerilen bakırın, alüminyumun ve karbonun (grafit) ısı hesaplarının yapılması amacıyla aynı hacme sahip 3 farklı durdurucu baz alınmıştır. Isı transferi;

$$Q_{ISI} = M_D \cdot c_D \cdot \Delta T_D \quad (4.1)$$

ile ifade edilir. Burada Q_{ISI} parçacık demeti tarafından durdurucuya aktarılan enerjiyi, M_D durdurucu kütlesini, c_D durdurucu malzemesinin özısı katsayısını, ΔT_D ise durdurucunun sıcaklık değişimini temsil etmektedir.

Çizelge 4.5 Önerilen 3 durdurucu çekirdek malzemesinin ısıl karakteristikleri

Parametreler	Malzemeler		
	Bakır	Karbon (Grafit)	Alüminyum
M_D (kg)	570	108	171
c_D (J/g.°C)	0.390	0.710	0.897
ΔT_D (°C)	0.269	0.781	0.389

Bu analitik hesaplamada saniyede ortalama 60 kW güç ile demet durdurucuya çarpmaktadır ve bu da 60.000 Joule anlamına gelmektedir. Durdurucu çekirdeğinin kütlelerinin belirlenmesi için durdurucu geometrisi kullanılmıştır (Şekil 5.1). Aynı hacme sahip 3 farklı malzemeden oluşan durdurucu esas alınmıştır. Denklem (4.1) kullanılarak Matlab (www.mathworks.com/products/matlab, 1994) programı aracılığıyla Çizelge 4.5'teki sonuçlar elde edilmiştir. Burada anlaşılacağı üzere demet durdurucuya

çarpıtığında en büyük sıcaklık değişimi karbon malzemede, en düşük sıcaklık değişimi ise bakır malzemede gerçekleşmektedir.

Elde edilen analitik sonuçlar, FLUKA ve Geant4 programları kullanılmadan önce malzemelerin nasıl bir karakteristik göstereceklerini temel olarak göstermektedir. Bölüm 5'te simülasyon sonuçları ve malzemelerin karakteristikleri detaylıca aktarılmıştır.

4.2 Monte Carlo Metodu

Bir Monte Carlo simülasyonunda, önceden tanımlanmış bir şekilde değişim göstermeyen ve zamana bağlı olan modeller takip edilmeye çalışılır. Bu modeller Monte Carlo simülasyonu esnasında üretilen rastgele sayıların dizilişine bağlı olasılıksal bir karakteristiğe sahiptir. Bir birim zaman sonra farklı rastgele numaralar dizisi oluşturulur ancak ilk üretilenlerle özdeş sonuçlar vermez. Buna rağmen belirli bir istatistiksel hata içerisinde ilk sonuçlarla uyuşur (Landau ve Binder 2005). Bu şekilde Monte Carlo metodu ile birçok istatistiksel problem modellenerek çözülmektedir. FLUKA ve Geant4, Monte Carlo metodu esasına dayanarak parçacık etkileşimlerini, taşınımalarını ve süreçlerini inceleyen simülasyon programlarıdır. Bu programlar Bölüm 4.3 ve Bölüm 4.4'te detaylandırılmıştır.

4.3 FLUKA

FLUKA kodu çeşitli malzemeler içindeki, birkaç keV'tan kozmik ışın enerji aralığında olan hadronların, ağır iyonların ve elektromanyetik parçacıkların, etkileşimlerini ve taşınmaları için oluşturulmuş bir Monte Carlo kodudur. Bütünlük ve hassasiyet yönünden en olası fizik modellerini içermesi amacıyla oluşturulmuş ve sürdürülmüştür. Bu mikroskopik yaklaşımda her adım fiziksel bir temele dayanmaktadır. Ortaya çıkan performanslar tek bir etkileşim seviyesindeki üretim ile karşılaştırılarak optimize edilmektedir. Elde edilen sonuç dosyalarında herhangi bir ayarlama yapılmamaktadır. Bu nedenle son tahminler minimum serbest parametre ile elde edilmektedir. Karmaşık durumlardaki sonuçlar, ölçeklendirme yasaları ve özellikler programın temelini oluşturan

fizik modellerinden ve öncelik tanınan temel korunum yasalarından çıkmaktadır (Battistoni vd. 2007).

FLUKA koduyla; elektromanyetik parçacıkların ve müonların taşınımı, yüklü parçacık taşınımı, hadronik etkileşim modelleri, düşük enerjili nötronlar, çekirdek-çekirdek etkileşimleri, radyasyon etkisi ile olan hasar simüle edilebilmektedir (Battistoni vd. 2007).

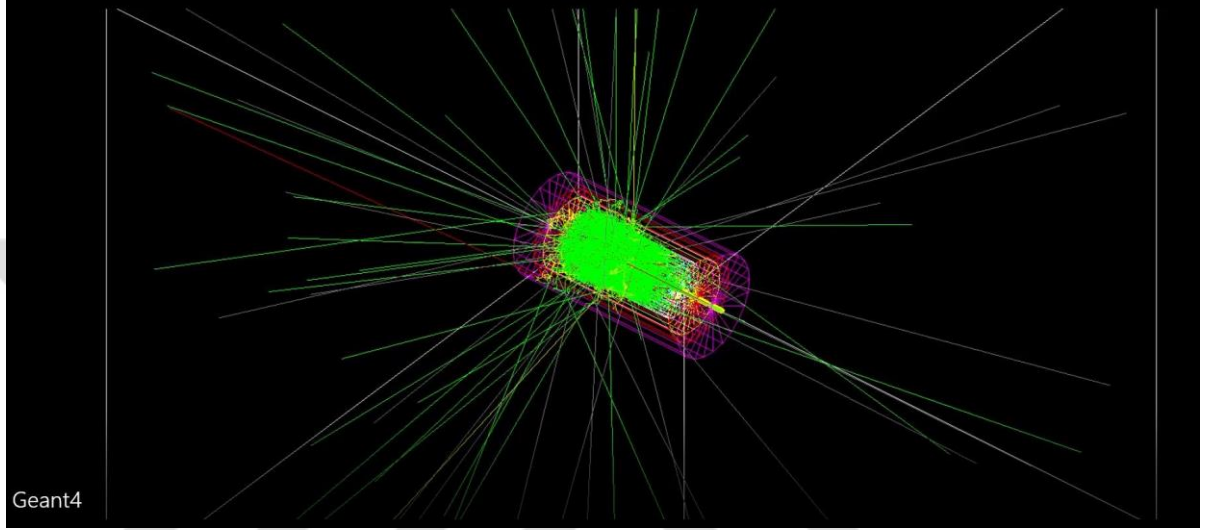
FLUKA kodunun nükleer fizik ve yüksek enerji fiziği alanlarında çeşitli uygulamaları mevcuttur. Bu uygulama alanlarına; hedef tasarımı, demet engelleme sistemleri, pencereler, durdurucular, dedektör optimizasyonu, doz tahminleri, radyolojik tedavi planlamaları, zırlama vb. alanlar örnek olarak verilebilir (Battistoni vd. 2011).

Bu tez çalışmasında demet durdurucusunun depolanan enerji, nötron ve gama üretimi analizleri yapılırken FLUKA programı kullanılmıştır. Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için Bölüm 5.1’de detaylandırılan geometri, TARLA tesisi demet parametreleri ve tez bünyesinde aktarılan fizik etkileşimleri FLUKA girdisi olarak kullanılmıştır. Demet durdurucusu 1 aylık ışınlama altında, her birinde iki milyon birincil parçacık yollanan 5 aşamalı (toplam 10 milyon birincil parçacık) simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda 5 aşamadan elde edilen sonuçlar FLUKA aracılığıyla istatistiksel olarak işlenmiştir.

4.4 GEANT4

Geant4 simülasyon programı, yeni nesil yüksek enerji fiziği deneyleri için gereklilikleri karşılamak amacıyla oluşturulmuştur. Şu anda astrofizik, nükleer fizik, medikal fizik, uzay bilimi ve radyasyon arkaplanı gibi çalışma alanlarını da kapsamaktadır. Geant4’te fonksiyonellik, modülerlik, kapsamlılık ve açıklık ihtiyaçlarının karşılanması için ileri seviye yazılım teknikleri benimsenmiştir. Nesneye yönelik programlama teknolojisinin benimsenmesi sayesinde Geant4 genişletilmeye ve geliştirilmeye açık hale gelmiştir (Pia 2003).

Demet durdurucu sisteminin simülasyonları Geant4 programında iki farklı modülde gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki depolanan enerji değerlerini inceleyebilmek için oluşturulan modül, ikincisi ise ürün çekirdeklerin incelenmesi için oluşturulan modüldür. Geant4 programında durdurucu geometrisi, gerekli fizik laboratuvarları ve parçacık takip mekanizmaları uygun kaynak dosyalarının hazırlanılmasıyla simüle edilmiştir.



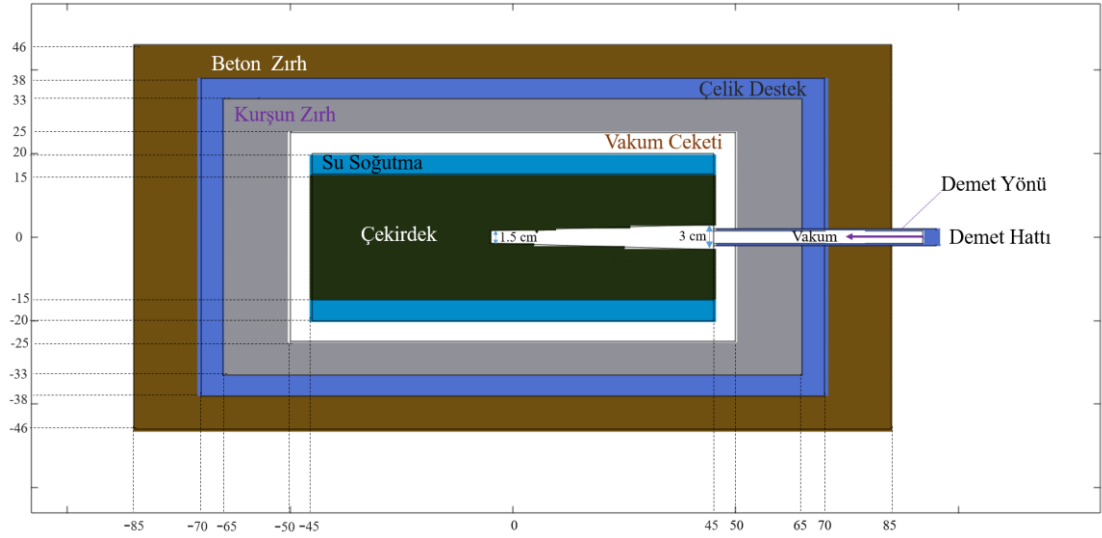
Şekil 4.1 TARLA demet durdurucusunun ve parçacık yörüngelerinin Geant4 programı aracılığıyla elde edilen görüntüsü

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

TARLA Tesisi ihtiyacına yönelik istenilen demet durdurucu sisteminin nükleer fizik etkileşimleri FLUKA ve Geant4 programları aracılığıyla incelenmiştir. Demet durdurucusunun tasarımı birkaç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama nükleer fizik etkileşimlerinin incelenmesi, ikinci aşama mekanik tasarım, üçüncü aşama imalat ve montaj ve dördüncü aşama ise deneysel testin gerçekleştirilmesi olarak sıralanabilir (Agostinetti vd. 2011). Nükleer fizik etkileşimlerinin incelenmesi olan ilk aşama, diğer aşamaların iskeletini oluşturmaktadır. Tasarım sürecinin işlemesi için ilk aşamada nükleer fizik etkileşimlerine uygun olarak malzemelerin ve geometrinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için durdurucuda kullanılacak malzemelerin Bölüm 5.2’de detaylıca bahsedilen özelliklere göre incelenmesi gerçekleştirilmiştir. İdeal demet durdurucu malzemesini tespit edebilmek için kullanılan malzemelere bağlı olarak demet durdurucusundaki enerji depolanması FLUKA ve Geant4’te, nötron ile gama akışı FLUKA’da ve oluşan radyoaktif izotoplar ise Geant4’te incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5’te detaylandırılmıştır.

5.1 Geometri

Çeşitli ölçülerin ve geometrik yapıların, simülasyon programları aracılığıyla incelenmesi sonucunda ideal ölçülerin ve yapının Şekil 5.1’deki gibi olması gerektiğine karar verilmiştir. Geometrik ölçü faktörü malzeme yapılarından bağımsız bir şekilde düşünülemez. Bu nedenle ölçüler ve geometrik yapı, malzeme çalışması sonuçlarına bağlı olarak belirlenmiştir. İlk aşamada sabit bir geometri ile malzeme çalışmaları gerçekleştirilmiş sonrasında ise belirlenen malzemeye göre geometri faktörü iyileştirilmiştir. Demet durdurucu için uygun olan malzemeler ise Bölüm 5.2’de belirtilen etkenlere göre belirlenmiştir.



Şekil 5.1 Durdurucu geometrisinin görüntüsü

5.2 Malzeme

Durdurucunun tasarımında en önemli etkenlerden birisi malzemedir. Sistemin işlevselliğinin tam anlamıyla kazanılabilmesi için çeşitli çekirdek ve zırh malzemeleri denenmiştir. Malzemenin belirlenmesindeki etkenler ise:

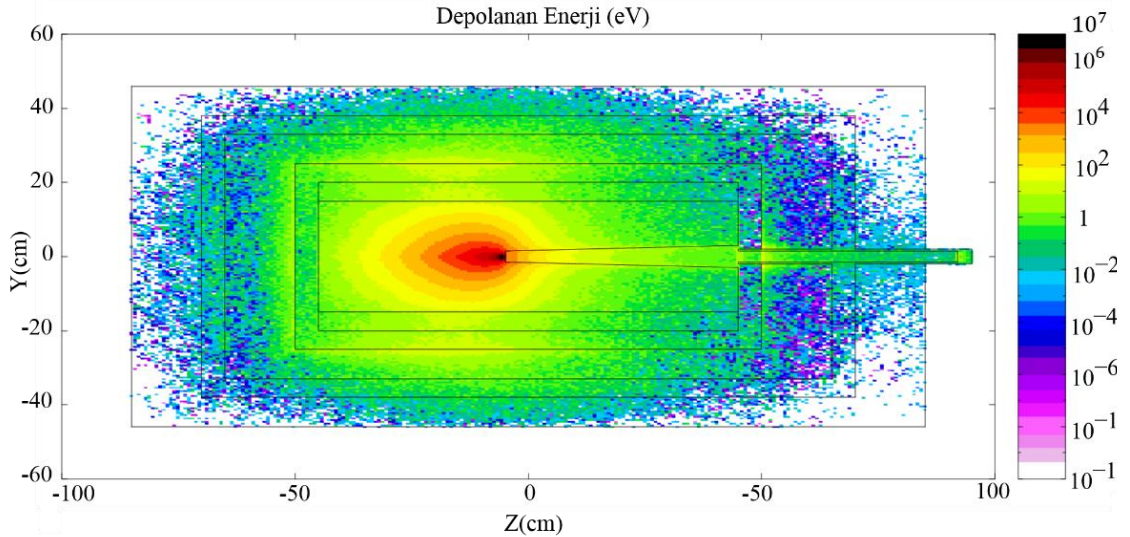
- Malzemenin ısısal iletkenliği ve erime noktası değeri,
- Demet ile etkileşime girildiğinde depolanan enerji miktarı,
- İkincil parçacık üretimi (nötron ve gama),
- Radyoaktif izotop üretimi,
- İmal edilebilirlik, temin edilebilirlik ve sürdürülebilirlik,

olarak sıralanabilir. Belirtilen özelliklere uygun olarak yapılan literatür araştırmalarının sonucunda demet durdurucu çekirdek malzemesi için alüminyum, bakır ve karbon (grafit) malzemeleri (Cossairt 2017), zırh malzemesi olarak ise gama ışınlarının durdurulması amacıyla kurşun, nötronların durdurulması amacıyla ise normal beton ve bor katkılı beton (Abdullah vd. 2010, Ogawa vd. 2010) test edilmiştir. Test edilmesine karar verilen bu çekirdek ve zırh malzemeleri, FLUKA ve Geant4 programlarında belirtilen özellikler esas alınarak incelenmiştir. Yapılan araştırma ve çalışmalar neticesinde zırh malzemelerinin kurşun ve bor katkılı beton olması gerektiği tespit edilmiştir. Diğer yandan çekirdek için farklı malzemeler kıyaslanmıştır. Simülasyon aşamasında alüminyum malzeme olarak

alüminyum 1070 serisi, bakır malzeme olarak da oksijen-içermez bakır tercih edilmiştir. Bunun sebebi ise bu malzemelerin %95 oranı ve üstünde saflıkta olmasıdır.

5.3 Enerji Depolanması

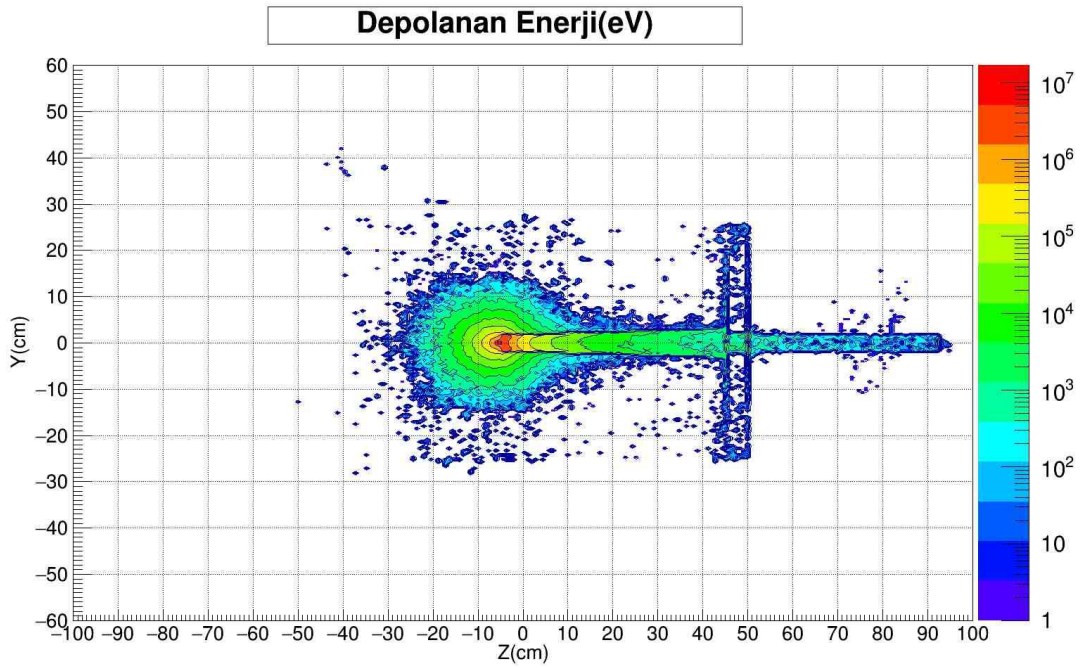
TARLA'da 1.5 mA'lık elektron demeti 40 MeV enerjiyle demet durdurucusuna çarpacaktır. FLUKA ve Geant4 simülasyon programlarında, Bölüm 5.2'de belirtilen çekirdek ve zırh malzemeleri için demetin durdurucuya bıraktığı enerji değerleri simüle edilmiştir. Elde edilen enerji değeri ve enerjinin dağılımı en önemli faktörlerdendir. Çünkü bu enerji, durdurucu malzemesinin erimesine veya durdurucunun kalıcı zarar görmesine sebep olabilir. Bu enerji ısı şeklinde ortaya çıkar ve bu ısının çarpma noktasından uzaklaştırılması gerekmektedir. Isının uzaklaştırılması ise sistem için tasarlanacak olan soğutma sistemiyle gerçekleştirilecektir. Bu sebeple enerji depolanmasından elde edilen sonuçlar demet durdurucusunun mekanik tasarım aşaması için önem arz etmektedir. Depolanan enerji analizleri alüminyum, bakır ve karbon (grafit) çekirdek malzemeleri ile kurşun ve bor katkılı beton zırh malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 Bakır için durdurucuda depolanan enerjinin FLUKA sonucu

Bakır çekirdek malzemesi için FLUKA'da elde edilen depolanan enerji dağılımı ve seviyesi Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Depolanan enerjinin maksimum değeri 10^7 eV

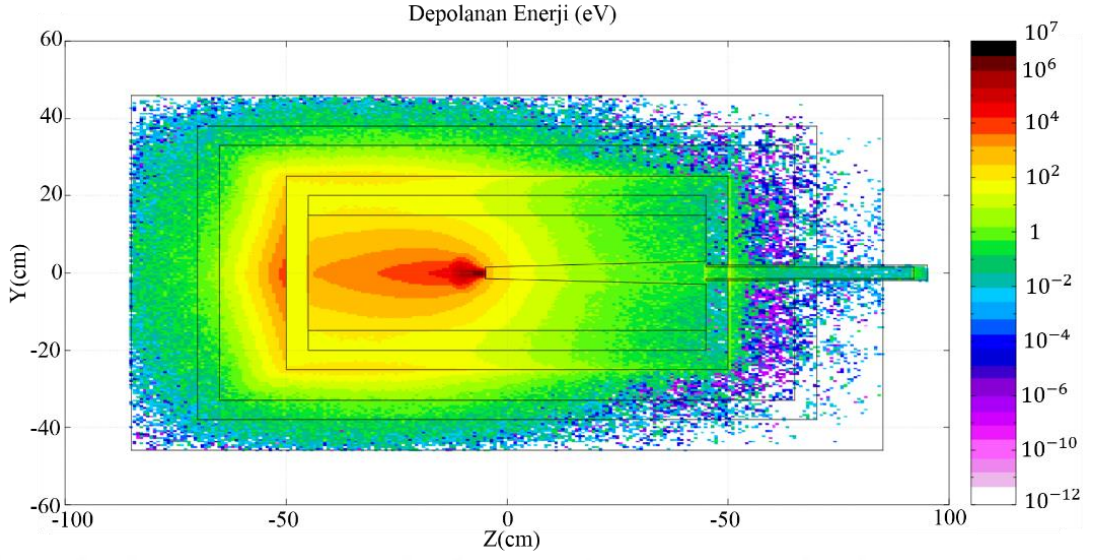
mertebesindedir. Aynı zamanda enerji seviyesinin hızlı bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bakırın test edilen diğer iki çekirdek malzemesinden çok daha yüksek bir ısısal iletkenliğe sahip olması bu enerji dağılımını açıklamaktadır. Yüksek ısısal iletkenlik özelliği bakır çekirdek malzemesi olarak iyi bir seçenek haline getirmektedir. Öte yandan bakırın erime noktasının alüminyumunkinden daha yüksek olması bu malzemeyi daha iyi bir seçenek haline getirmektedir.



Şekil 5.3 Bakır için durdurucuda depolanan enerjinin Geant4 sonucu

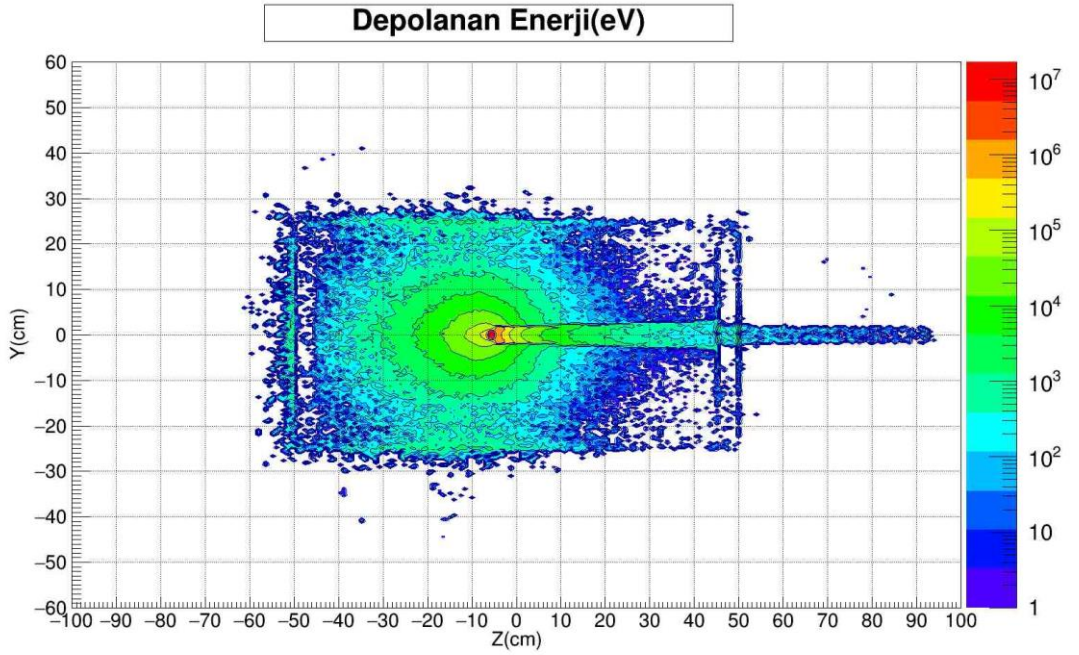
Geant4'te, bakırın çekirdek malzemesi olarak kullanıldığı demet durdurucusunun depolanan enerji grafiği Şekil 5.3 ile gösterilmektedir. Elde edilen sonuca göre maksimum depolanan enerji FLUKA'da elde edildiği gibi 10⁷ eV mertebesindedir. Renk paletleri incelenecek olursa durdurucu geometrisinde enerji dağılım değerleri iki simülasyon programı sonucu için de aynı elde edilmiştir.

Alüminyum çekirdek malzemesi için depolanan enerji değerlerinin FLUKA sonucu Şekil 5.4'te, Geant4 sonucu ise Şekil 5.5'te verilmiştir. Alüminyum malzeme durdurucu çekirdeğinde kullanıldığında enerji dağılımının ileriye doğru konikleştiği görülmektedir.



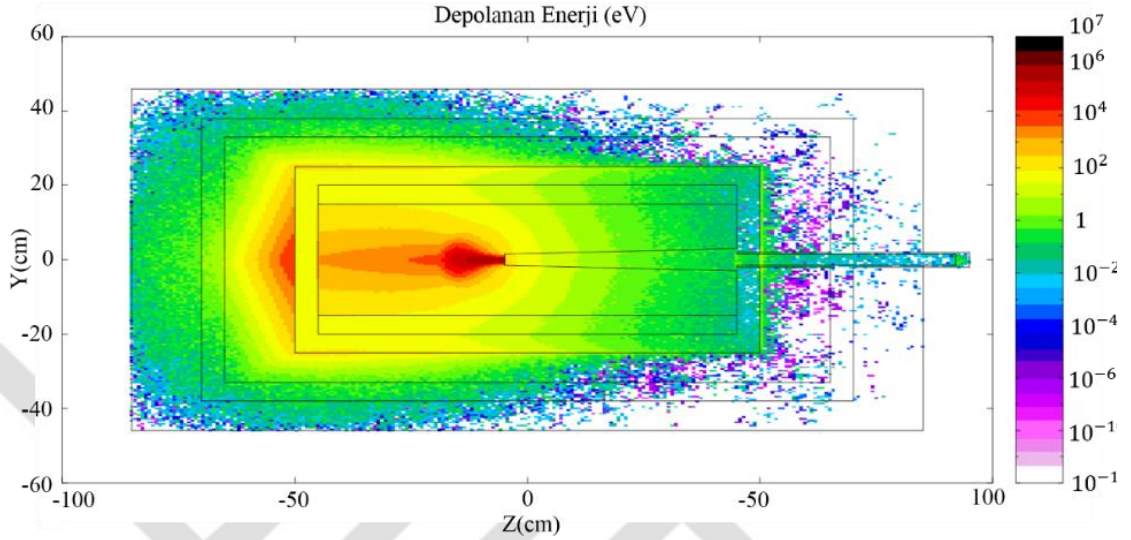
Şekil 5.4 Alüminyum için durdurucuda depolanan enerjinin FLUKA sonucu

Aynı zamanda bakırın kullanıldığı durumdan farklı olarak 10^4 eV mertebesindeki enerjinin, kurşun zırh bölgesinde toplandığı görülmektedir.



Şekil 5.5 Alüminyum için durdurucuda depolanan enerjinin Geant4 sonucu

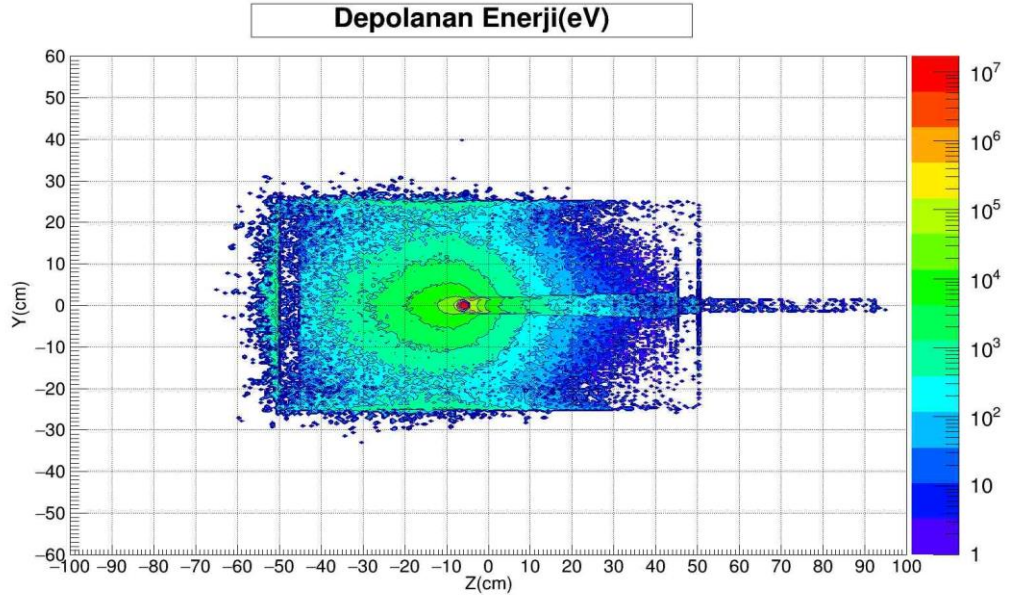
FLUKA’da elde edilen sonuçla uyumlu olarak Geant4’te de çekirdek malzemesinin enerji dağılımında ileriye doğru bir konikleşme ve FLUKA sonucunda olduğu gibi 10^4 eV seviyesindeki enerjinin kurşun zırhın bulunduğu bölgede toplandığı görülmektedir.



Şekil 5.6 Karbon (Grafit) için durdurucuda depolanan enerjinin FLUKA sonucu

Karbon (Grafit) için FLUKA’da elde edilen sonuçlar Şekil 5.6’da, Geant4’te elde edilenler ise Şekil 5.7’de gösterilmektedir.. Karbon (Grafit) kullanıldığında enerji dağılımı çok daha dar bir açıyla ileriye doğru konikleşmektedir. Alüminyum kullanılan durumdan farklı olarak daha yoğun bir enerjinin kurşun bölgesinde toplandığı görülmektedir. Karbon (Grafit) kullanılabilir 3 malzeme arasında en düşük ısısal iletkenliğe sahip malzemedir. Durdurucunun işlem süresince belirli bir sıcaklık seviyesinin altında kalması gerekmektedir. Karbon (Grafit)’un düşük ısısal iletkenliği kısa sürede soğumasını zorlaştırmaktadır. Bu durum ise sürekli çalışma durumunda durdurucuya kalıcı hasar gelmesine sebep olabilir.

Geant4’te elde edilen enerji dağılımı FLUKA’da elde edilen değerler ile uyuşmaktadır. Malzemelerin hangisinin en uygun olduğuna karar vermek için incelenen gama ve nötron üretimleri Bölüm 5.4’te, oluşan ürün çekirdekleri ise Bölüm 5.5’te incelenmiştir.



Şekil 5.7 Karbon (Grafit) için durdurucuda depolanan enerjinin Geant4 sonucu

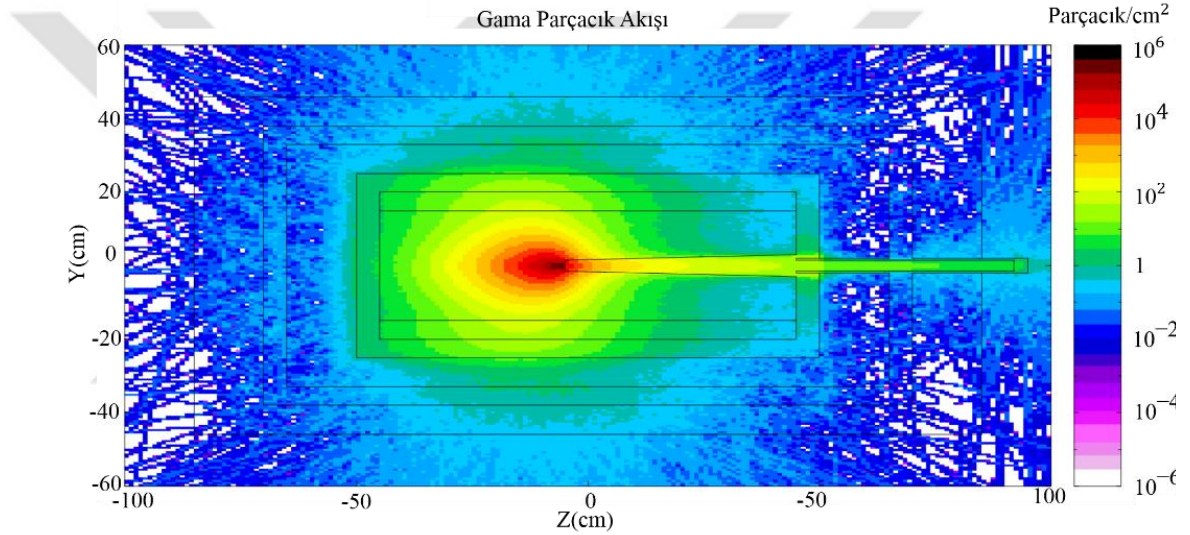
5.4 Gama ve Nötron Üretimi

Gama ve nötron üretimi, demet durdurucusu tasarımı aşamalarındaki diğer önemli etkenlerdir. Bu iki parçacığın üretimi, çeşitli çekirdek etkileşimlerine sebep olarak, durdurucu içerisinde radyoaktif bir etkileşim zinciri oluşturmaktadır. Aynı zamanda son ürün olarak da çıkabilen bu parçacıklar etkileşim yapıları nedeniyle durdurulması en zor parçacıklardandır.

Gama yüksüz bir parçacıktır ve bu nedenle malzemeleri aşabilmektedir. Bu da zırhalamada ve durdurucu tasarımında kısıtlamalara neden olmaktadır. Gama soğrulmasında zırhlama malzemesi olarak kullanılan temel malzemeler demir ve kurşundur (Chatterjee vd. 2017, Singh vd. 2017). Kurşun çok daha iyi bir soğurma yapısına sahiptir ancak demir mekanik dayanım ve şekil değişiminin kurşuna oranla az olmasından ötürü avantajlıdır. Aynı zamanda kurşun insan vücudu için zehirli bir yapıya sahiptir. Bu temel bilgiler ışığında mekanik özellikleri ve olumsuz sağlık etkilerine rağmen kurşun, gama ışınlarının soğrulmasında çok daha verimli bir karakteristiğe sahiptir. Bu nedenle tasarımda, gama zırhlama malzemesi olarak kurşun kullanılmıştır.

Nötronlar da gamalara gibi yüksüz olduklarından ötürü durdurulmaları zordur. Nötronlar için ideal soğurucu beton ve türevleridir. Çalışmada, normal beton ve bor katkılı beton denenmiştir. Simülasyonlar sonucunda bor katkılı betonun daha iyi bir nötron soğurucusu olduğu görülmüştür. Bor katkılı betonun karakteristiği aynı zamanda literatür incelemeleriyle de doğrulanmıştır (Ogawa vd. 2010).

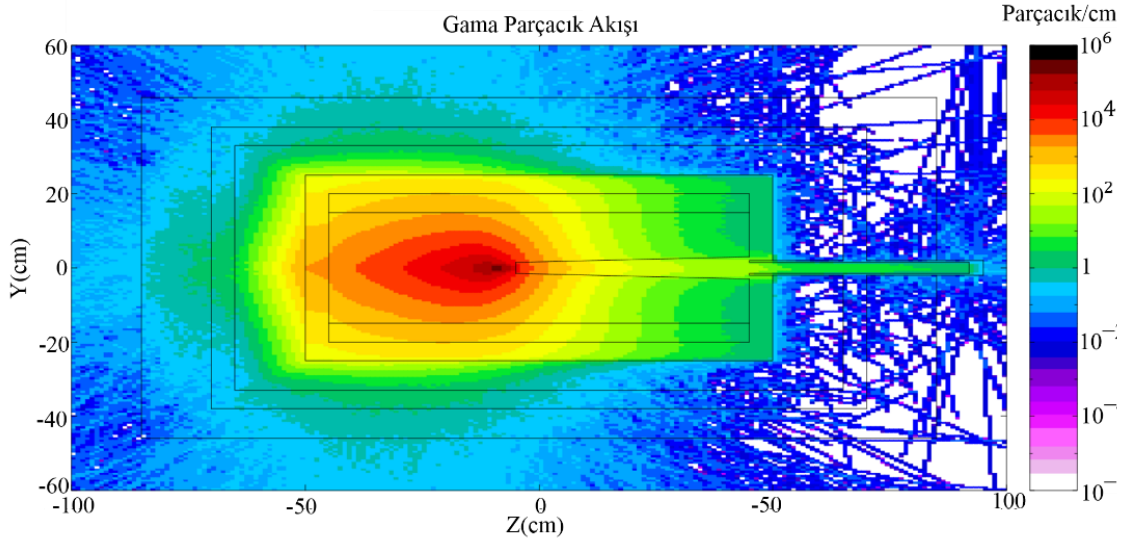
Nötron ve gama parçacıklarının üretimleri FLUKA’da nötron ve gama akışları olarak 3 farklı çekirdek malzemesiyle incelenmiştir. Çekirdek malzemelerinin gama ve nötron üretimleri birbirinden farklıdır. Bütün incelemeler sonucunda en uygun çekirdek malzemesine göre zırhlama malzemelerinin geometrileri iyileştirilmiştir.



Şekil 5.8 Bakır malzeme için gama parçacık akış grafiği

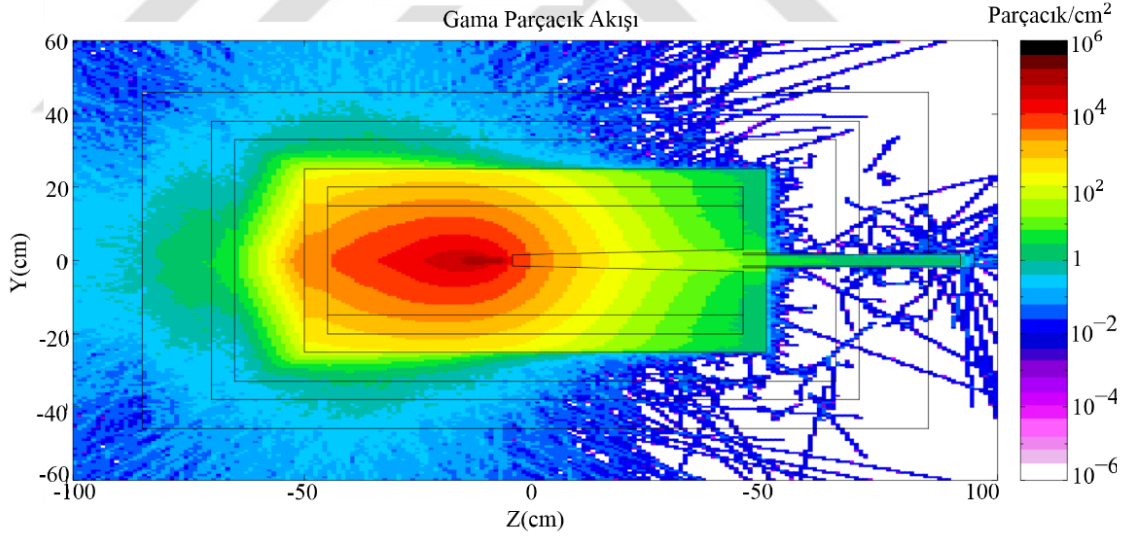
Gama parçacık akış grafikleri, santimetrekaredeki gama parçacığı sayısını vermektedir. Bu grafikler incelenirken sadece maksimum değerler değil, parçacık yoğunluğunun nasıl değiştiği de dikkatle incelenmelidir. Maksimum parçacık akışı değeri 3 aday malzeme için de aynı olmakla beraber, bu parçacıkların dağılımları ve yoğunlukları değişmektedir.

Bakırdaki gama parçacık akışı homojen bir dağılıma sahip olmakla birlikte, parçacık yoğunluğunun maksimum değerinin merkezde toplandığı Şekil 5.8 ile açıkça gösterilmektedir. Yoğunluk dış katmanlara doğru hızlı bir şekilde azalma göstermektedir.



Şekil 5.9 Alüminyum malzeme için gama parçacık akış grafiği

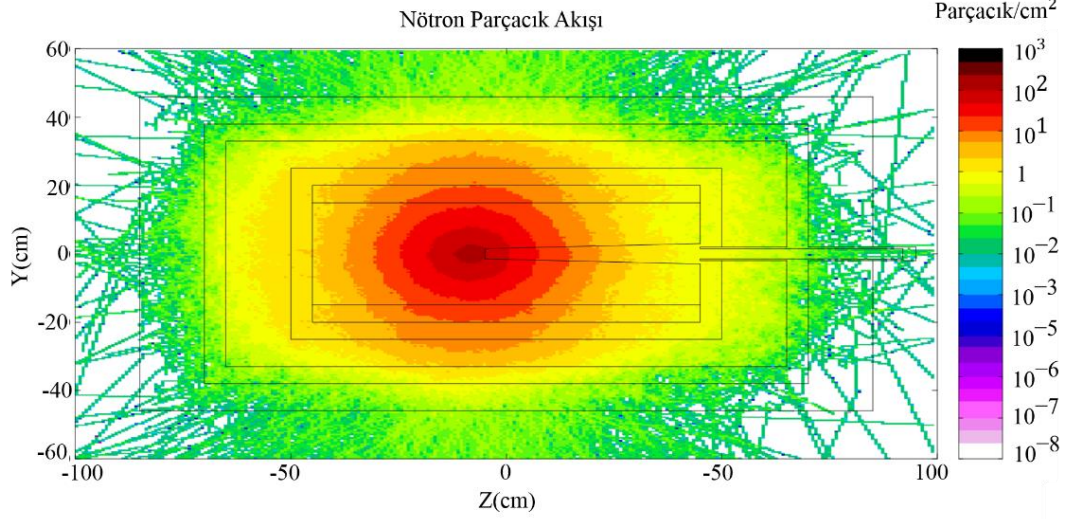
Alüminyum malzemesinin kullanılması durumunda ise gama yoğunluğunun yavaş bir şekilde azalma gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.10 Karbon (Grafit) malzeme için gama parçacık akış grafiği

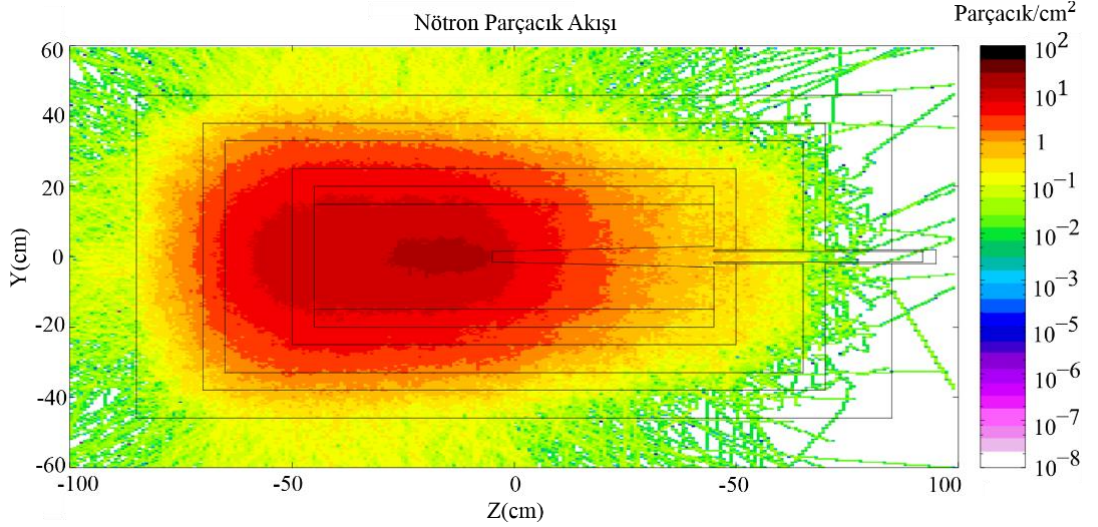
Karbon (Grafit) malzemesinin kullanıldığı durumda ise geri saçılan parçacık miktarının diğer malzemelere oranla daha az olduğu görülmektedir (Şekil 5.10). Öte yandan gama parçacık akışının merkezden dışarıya doğru yavaş bir şekilde azalış gösterdiği bulunmuştur.

Malzemelerin gama parçacığı akış karakteristikleriyle beraber, oluşan nötron akışının da incelenmesi gerekmektedir. Fotonükleer etkileşimler neticesinde ortaya çıkan nötronlardan özellikle gamalar sorumludur.



Şekil 5.11 Bakır malzeme için nötron parçacık akış grafiği

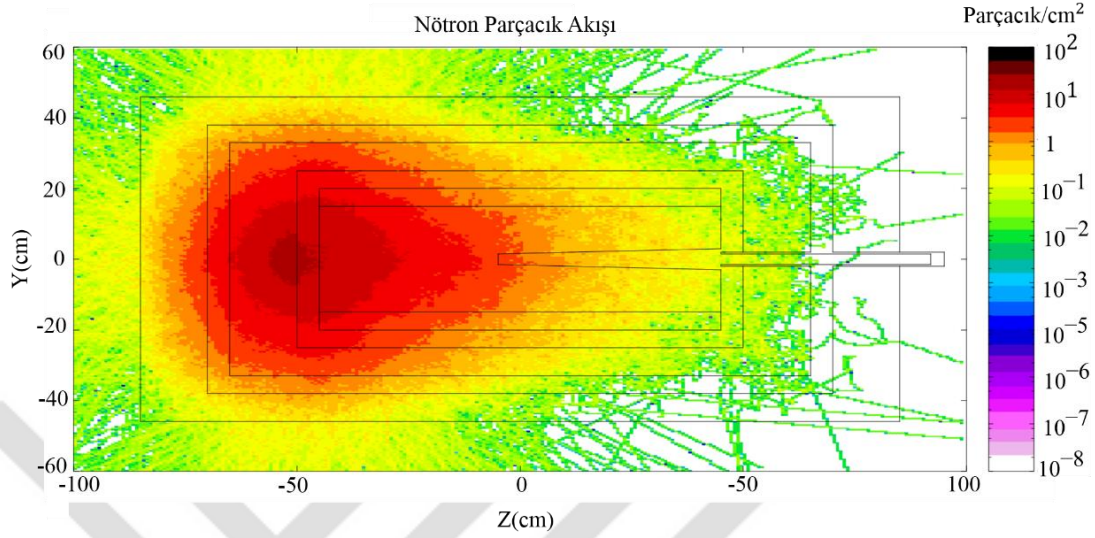
Bakır malzemesinde gama parçacık akışında olduğu gibi nötron akışında da homojen bir dağılım görülmektedir (Şekil 5.11). Nötron dağılımında bakır diğer malzemelere göre daha yavaş bir azalma göstermektedir.



Şekil 5.12 Alüminyum malzeme için nötron parçacık akış grafiği

Alüminyumun kullanılması durumunda, nötron parçacık akışının çarpma noktasına yakın bir noktada yoğunlaştığı ve yoğunluk değerinin dış katmanlara doğru yavaşça azaldığı

görülmektedir (Şekil 5.12). Şekilden de anlaşılacağı üzere bakırdan farklı olarak santimetrekaredeki maksimum parçacık sayısı 100 adetle sınırlıdır.

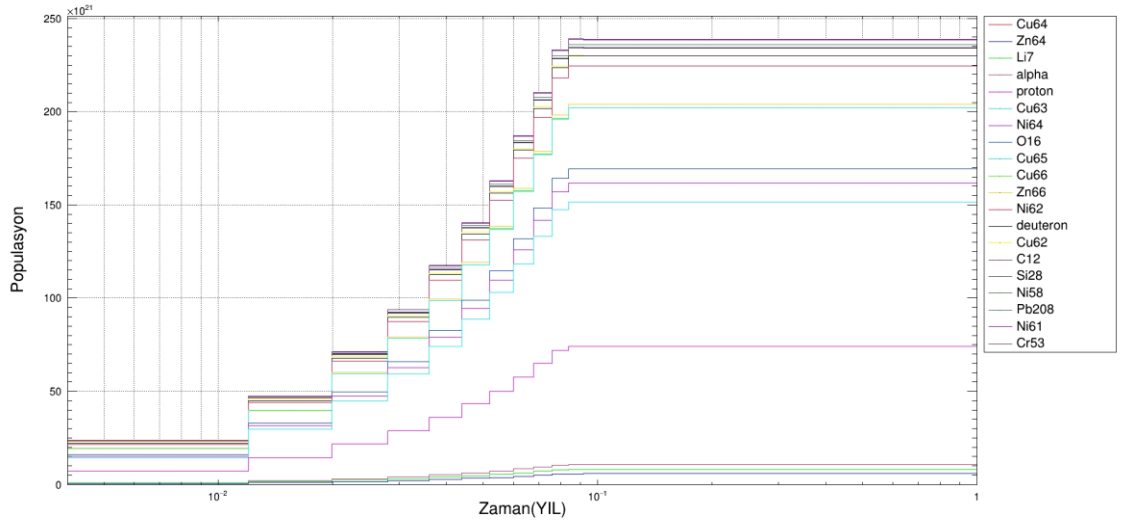


Şekil 5.13 Karbon (Grafit) malzeme için nötron parçacık akış grafiği

Karbonun (grafit) kullanılması durumunda maksimum parçacık akışının santimetrekare başına 100 adet olduğu görülmektedir (Şekil 5.13). Bununla beraber yüksek değerli yoğunluk dağılımı, alüminyuma göre daha küçük bir bölgede toplanmıştır. Nötron parçacık akışı açısından karbon (grafit) diğer malzemelere göre daha iyi bir seçenek olduğu ortaya çıkmaktadır. Dış katmanlara doğru dağılım hızlıca azalış göstermekte ve hızlandırıcı yönünde oluşan parçacık sayısı diğer 2 malzeme seçeneğine göre daha azdır.

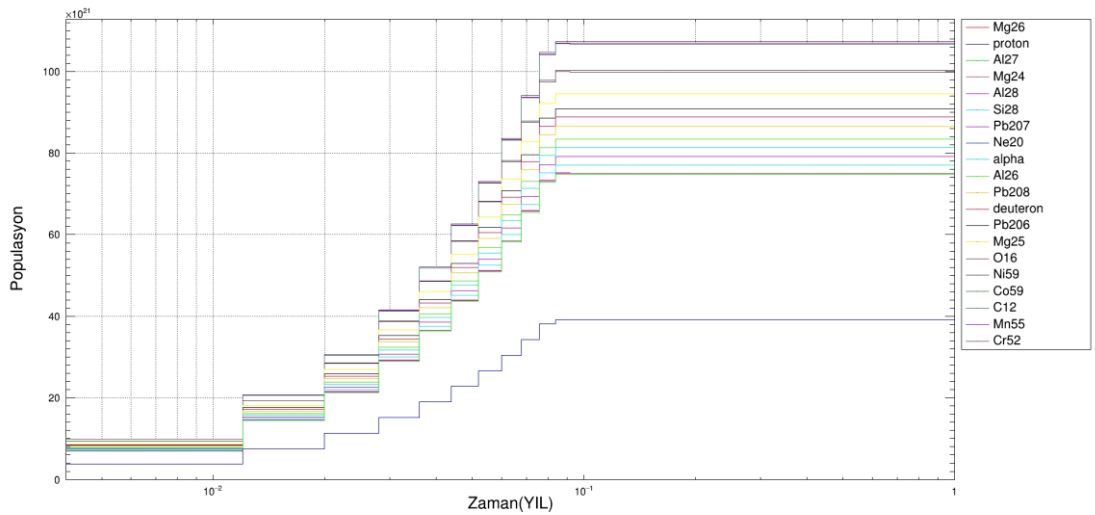
5.5 Ürün Çekirdekler

Ürün çekirdekler gerçekleşen nükleer etkileşimler sonucunda ortaya çıkan kararlı veya kararsız izotoplardır. Ortaya çıkan ürün çekirdekler kararlılık durumlarına bağlı olarak sistem içerisindeki aktiviteyi belirlemektedirler. Demet durdurucusu tasarımında TARLA Tesisi'ne uygun olarak aktivitesi düşük, kararsız haldeki çekirdekleri hızlıca kararlı hale geçen ve yüksek yarı-ömürlü çekirdek sayısı az olan bir yapının elde edilmesi önemlidir. Bu nedenle, demet durdurucusunda ortaya çıkan ürün çekirdeklerin miktarları ve çeşitleri Geant4 programı aracılığıyla hesaplanmıştır.



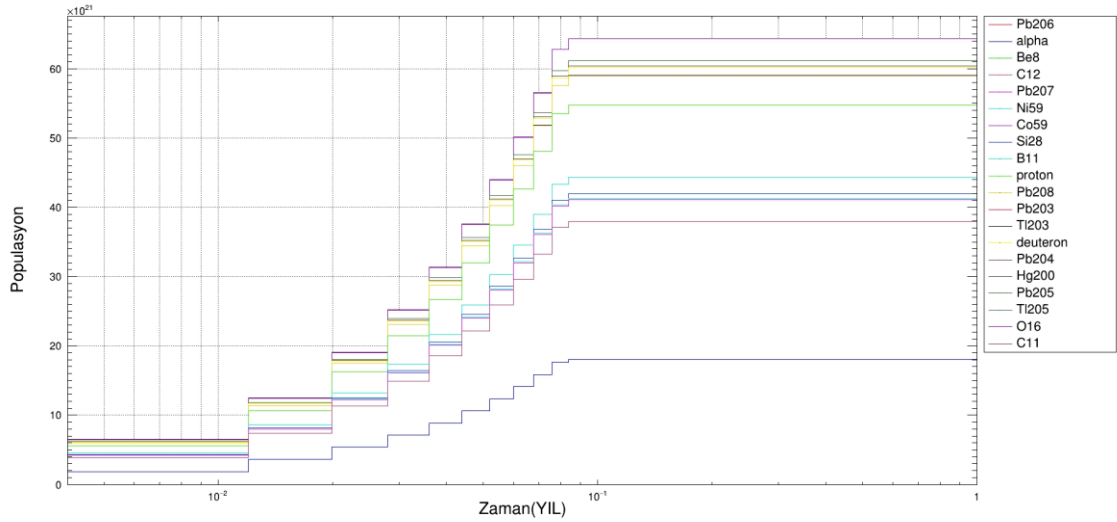
Şekil 5.14 Bakır için ürün çekirdekleri

Bakır için ürün çekirdekler incelendiğinde, demetin aktif olduğu 30 günlük süreçte, kararlı hale geçen parçacıkların artış gösterdiği görülmektedir. Bu süreçte böyle bir artışın olmasının sebebi, kararsız çekirdeklerin radyoaktif bozunumlar aracılığıyla kararlı çekirdeklere dönüşmesidir. Bakır bu süreç içerisinde en yüksek aktiviteye sahip olan malzemedir (Şekil 5.14).



Şekil 5.15 Alüminyum için ürün çekirdekleri

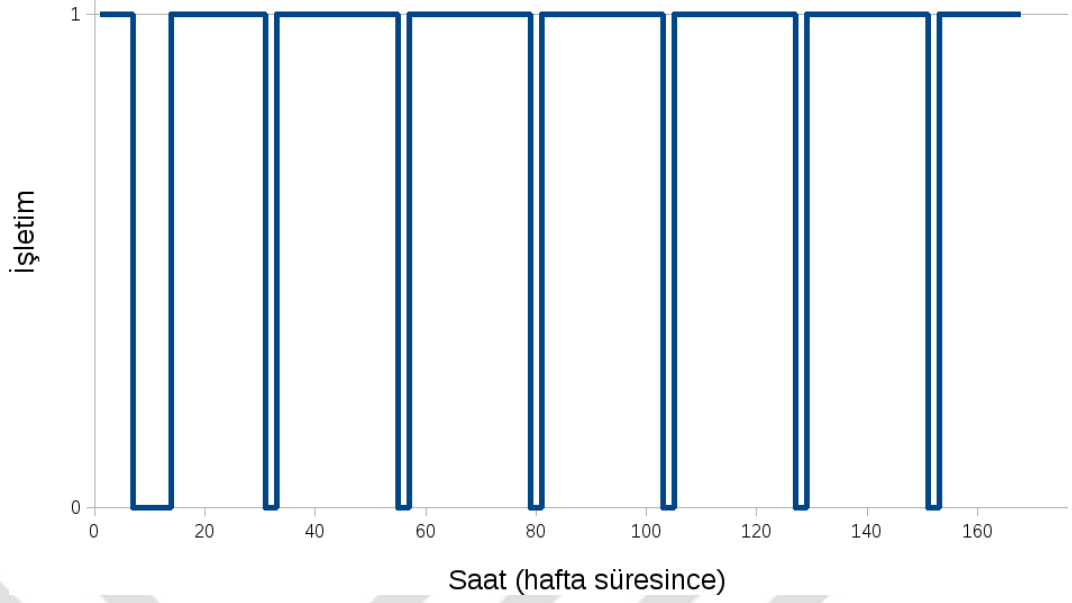
Aynı durum alüminyum çekirdek için incelendiğinde, aktiflik sürecinin yaklaşık olarak aynı şekilde devam ettiği görülmektedir (Şekil 5.15).



Şekil 5.16 Karbon (Grafit) için ürün çekirdekleri

Karbon (Grafit) incelendiğinde ise aynı süreç içerisinde çok daha az bir aktivite ortaya çıktığı görülmektedir. Bu açıdan karbon (grafit) diğer malzemelere göre daha kararlı bir nükleer karakteristik göstermektedir (Şekil 5.16).

Simülasyon esnasında elektron demeti 1 ay boyunca aktif edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, demetin aktif olduğu süreçte, karbon (grafit) malzemesi en az aktifliği göstermiştir. Simülasyonlar gerçekleştirilirken, ortaya çıkabilecek maksimum aktiviteyi görmek amacıyla demet 1 ay sürekli olarak gönderilmiştir. Ancak TARLA tesisi Şekil 5.17'de gösterilen işletim planlamasına uygun olarak çalıştırılacaktır. Burada y-ekseni TARLA demetinin aktif (1) veya kapalı (0) olup olmadığını göstermektedir. X-ekseni ise 1 haftalık sürecin saat bazında gösterimini içermektedir.



Şekil 5.17 TARLA haftalık işletim planı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında TARLA Tesisi için nükleer fizik tasarımı gerçekleştirilen demet durdurucusunun çeşitli özelliklere bağlı olarak karakteristikleri incelenmiştir. İnceleme aşamasında malzemelerin Çizelge 6.1'deki özellikleri baz alınarak karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçlara uygun olarak demet durdurucusunun geometrisi ve durdurucuda kullanılacak malzemeler belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 Önerilen durdurucu malzemelerinin karşılaştırılması

Parametreler	Bakır	Alüminyum	Karbon(Grafit)
Isısal İlektenlik	***	**	*
Erime Sıcaklığı	**	*	***
Depolanan Enerji	***	**	*
Gama ve Nötron Üretimi	**	*	***
Radyoaktif İzotop Üretimi	*	**	***
İmal ve Temin Edilebilirlik	***	**	*

Derecelendirme *en kötü, **orta, ***en iyi olarak yapılmıştır.

Bütün sonuçlar incelendiğinde nötron zırhlaması için bor katkılı betonun, gama zırhlaması için kurşunun ve çekirdek malzemesi olarak da bakırın TARLA Tesisi demet durdurucusu için ideal olduğu sonucuna varılmıştır. Bakırın yüksek ısıl iletkenliğinin, imal ve temin edilebilirliğinin kolay olması önemli bir tercih sebebidir. Bununla birlikte nükleer etkileşim karakteristikleri açısından karbonun (grafit) daha iyi özellikler göstermesine rağmen tercih edilmemesinin geçerli sebepleri aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek vakum altında, vakum ortamına diğer malzemelere göre daha çok partikül bırakması (Lahiri 2013),
- Diğer malzemelerle mekanik olarak bağlantısının yapılmasındaki zorluklar,
- TARLA Tesisi'nin yoğun çalışma programı düşünüldüğünde, soğutma sistemi ihtiyacının artması ve bu nedenle soğutma sisteminin karmaşıklaşması, olarak sıralanabilir.

TARLA Tesisi demet durdurucusu tasarımı FLUKA ve Geant4 programları aracılığıyla incelenmiş olup, ilerleyen süreçlerde mevcut sonuçların geliştirilmesi için yapılması planlanan çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Geant4 programında ikincil parçacık üretiminin detaylı bir şekilde haritalandırılması,
- FLUKA ve Geant4 programlarında elde edilen sonuçların ortak bir birim ve formata dönüştürülmesi,
- Ortak birime dönüştürülen sonuçların aynı arayüz ile kıyaslanması,
- Geant4 programında hazırlanan kod dosyalarının kullanıcı dostu bir hale getirilmesi ve arayüz oluşturulması.

TARLA Tesisi için üretilecek olan demet durdurucusunun nükleer fizik tasarımı kavramsal olarak tamamlanmış olup ilerleyen süreçlerde, mekanik tasarım aşamasında karşılaştırmalı çalışmalar ile elde edilen sonuçlarda geliştirmeler yapılacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdullah, Y. Yusof, M., Muhamad, Azali., Samsu, Z., Abdullah, N. 2010. Cement Boron Carbide Concrete As Radiation Shielding Material. *Journal of Nuclear and Related Technologies*, 7 (2); 74-79.
- Agostinetti, P., Antoni, V., Cavenago., Chitarin, G., Marconato, N., Marcuzzi, D., Pilan, N., Serianni, G., Sonato, P., Veltri, P., Zaccaria, P. 2011. Physics and engineering design of the accelerator and electron dump for SPIDER. *Nucl. Fusion*, 51 (6); 063004-1-16.
- Aksoy, A., Karsli, O.(Eds) 2015. The technical design report of turkish accelerator and radiation laboratory in ankara. Tech. Rep., Ankara University.
- Aksoy, A., Lehnert, U. 2014. Beam transport and bunch compression at TARLA. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 762; 54–63.
- Aune, B., Bandelmann, R., Bloess, D., Bonin, B., Bosotti, A., Champion, M., Crawford, C., Deppe, G., Dwersteg, B., Edwards, D., A., Edwards, H. T., Ferrario, M., Fouaidy, M., Gall, P.D., Gamp, A., Gössel, A., Graber, J., Hubert, D., Hüning, M., Juillard, M., Junquera, T., Kaiser, H., Kreps, G., Kuchnir, M., Lange, R., Leenen, M., Liepe, M., Lilje, L., Matheisen, A., Möller, W. D., Mosnier, A., Padamsee, H., Pagani, C., Pekeler, M., Peters, H. B., Peters, O., Proch, D., Rehlich, K., Reschke, D., Safa, H., Schilcher, T., Schmäser, P., Sekutowicz, J., Simrock, S., Singer, W., Tigner, M., Trines, D., Twarowski, K., Weichert, G., Weisend, J., Wojtkiewicz, J., Wolff, S., Zapfe, K. 2000. Superconducting TESLA cavities. *Physical Review Accelerators and Beams*, 3 (9); 092001-1-25.
- Basdevant, J., Rich, J., Spiro, M. 2005. *Fundamentals In Nuclear Physics From Nuclear Structure to Cosmology*. Springer, 515, USA.
- Battistoni, G., Broggi, F., Brugger, M., Campanella, M., Carboni, M., Empl, A., Fassò, A., Gadioli, E., Cerutti, F., Ferrari, A., Ferrari, A., Lantz, M., Mairani, A., Margiotta, M., Morone, C., Muraro, S., Parodi, K., Patera, V., Pelliccioni, M., Pinsky, L., Ranft, J., Roesler, S., Rollet, S., Sala, P., Santana, M., Sarchiapone, L., Sioli, M., Smirnov, G., Sommerer, F., Theis, C., Trovati, S., Villari, R., Vincke, H., Vincke, H., Vlachoudis, V., Vollaie, J., Zapp, N. 2011. Applications of FLUKA Monte Carlo code for nuclear and accelerator physics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 269; 2850-2856.
- Battistoni, G., Cerutti, F., Fassò., Muraro, S., Ranft, J., Roesler, S., Sala, P. 2007. The FLUKA code: description and benchmarking. *Hadronic Shower Simulation Workshop*, CP896; 31-49.
- Brugger, M., Errahhaoui, A., Kim, M., Lee, H., Roesler, S., Vincke, H. 2014. Activation benchmark study at a 2.5 GeV electron accelerator. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4; 363-366.
- Bryant, P. 1994. *A Brief History And Review Of Accelerators*. CAS - CERN Accelerator School : 5th General Accelerator Physics Course; 1-16.
- Chatterjee, S., Banerjee, K., Pandit, D., Roy, P., Bandyopadhyay, T., Ravishankar, R., Bhattacharya, C., Bhattacharya, S., Datta, D., Banerjee, S. 2017. Optimization of beam dump shielding for K-130 cyclotron at VECC. *Applied Radiation and Isotopes*, 128; 216-223.

- Cossairt, J. 2007. Induced Radioactivity at Accelerators. Proceedings of the 2008 HPS Professional Development School: Topics in Accelerator Health Physics, FERMILAB-PUB-07-201-ESH; 1-95.
- Das A., Ferbel T., 2003. Introduction to Nuclear and Particle Physics (Second Edition). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 417, Singapore.
- Emfietzoglou, D., Nikjoo, H., Uehara, S. 2012. Interaction of Radiation with Matter. CRC Press, 343, USA.
- Henning, W., Shank, C. 2010. Accelerators for America's Future. U.S. Department of Energy, 1-100.
- Kamal, A. 2014. Nuclear Physics. Springer-Verlag, 625, Berlin Heidelberg
- Krane, K. 1988. Introductory Nuclear Physics. Wiley. 549, USA
- L'Annunziata, M. 2012. Handbook of Radioactivity Analysis (Third Edition). Academic Press, 1418, USA.
- Lahiri, S. Mohapatra, S., Mishra, K., Thakur, B., Bapat, A. 2013. Study on characterization of outgassing of graphite. AIP Conference Proceedings, 1538(38); 38-42.
- Landau, D., Binder, K. 2005. A Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics (Second Edition). Cambridge University Press, 432, USA.
- Leo, W. 1987. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment. Springer-Verlag, 377, Berlin Heidelberg.
- Matlab The Mathworks Inc., 1994. Web Sitesi. www.mathworks.com/products/matlab. Erişim tarihi: 26.09.2018
- NIST Physical Measurement Laboratory, 1998. Web Sitesi. <https://www.nist.gov/pml>. Erişim Tarihi: 19.09.2018
- Ogawa, T., Morev, M., Abe, T., Iimoto, T., Kosako, T., Kimura, K., Kinno, M. 2010. Experimental evaluation of neutron performance in boron-doped low activation concrete, Radiation Protection Dosimetry, 140 (1); 89–95.
- Pia, M. 2003. The Geant4 Toolkit: simulation capabilities and application results. Nuclear Physics B, 125; 60-68.
- Rangacharyulu, C. 2014. Physics of Nuclear Radiations Concepts, Techniques and Applications. CRC Press, 345, USA.
- Satchler, G. 1980. Introduction to Nuclear Reactions. The Macmillan Press Ltd., 316, London
- Singh, R., Singh, S., Singh, G. and Thind, K. 2017. Gamma Radiation Shielding Properties of Steel and Iron Slags. New Journal of Glass and Ceramics, 7, 1-11.
- Takei, H., Takeda, Y. 2000. Beam Dump for High Current Electron Beam at JNC. KEK Proceedings, 200 (20); 255-263.
- Tsoufanidis, N., Landsberger, S., 2015. Measurement & Detection of Radiation (Fourth Edition). CRC Press, 562, New York.
- White, J., Fessenden, T., Fontaine, R., Harvey, A., Paul, A. 1983. Beam Dump/Diagnostics Assembly for A 10-kA, 50-MeV, 50-ns Electron Beam. IEEE Transaction on Nuclear Science, NS-30 (4); 1-3.
- Wiedemann, H. 2007. Particle Accelerator Physics (Third Edition). Springer, 948, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Denizhan Erenler

Doğum Yeri: Mersin

Doğum Tarihi: 01. 01. 1993

Medeni Hali: Bekar

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu:

Lise : Abdülkerim Bengi Anadolu Lisesi, 2008-2011

Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, 2011-2015, Mekatronik
Mühendisliği Bölümü (İkinci Öğretim)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Nükleer
Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı- Hızlandırıcı
ve Dedektör Teknolojileri, 2016-

Çalıştığı Kurum:

TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara), 01.01.2016-
01.05.2016,

Mekatronik Mühendisi olarak,

- Süperiletken Tesla Kavite için Piezo Frekans Ayarlayıcı Mekanizması Tasarımı,
- 3 Eksenli Manyetik Alan Haritalayıcı Sistem Tasarımı,
- Elektron Demet Teşhis Sistemi için Pnömatik Eyleyici ve Tutucu Mekanizma Tasarımı

projelerine katkıda bulunulmuştur.