

**HIZLANDIRICI GÜDÜMLÜ SİSTEMLERDE KULLANILAN BAZI
HEDEF MATERYALLERİNDE YÜKSEK ENERJİLİ
PROTONLARLA MEYDANA GETİRİLEN REAKSİYON
ÜRÜNLERİNİN KÜTLE DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ**

**Seda ERKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİZİK
GAZİ ÜNİVERSİTESİ**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MART 2014

ANKARA

Seda ERKAN tarafından hazırlanan “HIZLANDIRICI GÜDÜMLÜ SİSTEMLERDE KULLANILAN BAZI HEDEF MATERYALLERİNDE YÜKSEK ENERJİLİ PROTONLARLA MEYDANA GETİRİLEN REAKSİYON ÜRÜNLERİNİN KÜTLE DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Başar ŞARER

Tez danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Pervin ARIKAN

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Başar ŞARER

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi : 14/03/2014

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

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Seda ERKAN



**HIZLANDIRICI GÜDÜMLÜ SİSTEMLERDE KULLANILAN BAZI HEDEF
MATERYALLERİNDE YÜKSEK ENERJİLİ PROTONLARLA MEYDANA
GETİRİLEN REAKSİYON ÜRÜNLERİNİN KÜTLE DAĞILIMLARININ
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Seda Erkan

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mart 2014

ÖZET

Bu çalışmada hızlandırıcı güdümlü sistem (HGS) kullanılarak 1 GeV enerjili, 1mA akıma sahip proton demetinin; Pb katı hedef ve Pb-Bi sıvı hedefine gönderilmesiyle oluşan nükleer reaksiyonlar sonucunda meydana gelen rezidual çekirdeklerin kütle dağılımları incelenmiştir. Bunun için yüksekliği 70 cm, yarıçapı 20 cm olan silindir katı Pb hedef ile yüksekliği 376 cm, yarıçapı 188 cm ve yapı materyali HT9 olan paslanmaz çelik silindir kaptaki bulunan sıvı Pb-Bi hedef kullanılmıştır. Rezidual çekirdeklerin kütle dağılımları Bertini/ABLA, Bertini/Dresner, CEM2K, INCL4/ABLA, INCL4/Dresner, ISABEL/ABLA, ISABEL/Dresner modelleri kullanılarak belirlenmiş ve bu modellerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan iki farklı hedefte oluşan radyoaktif rezidual çekirdekler belirlenerek aktiflikleri hesaplanmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 202.1.108

Anahtar Kelimeler : Hızlandırıcı güdümlü sistem, Rezidual çekirdek,MCNPX

Sayfa Adedi : 59

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Başar ŞARER

**INVESTIGATION MASS DISTRIBUTIONS OF REACTIONS PRODUCTS
OCCURRING BY PROTONS WITH HIGH ENERGY IN SOME TARGET
MATERIALS USED IN ACCERELATOR DRIVEN SYSTEM
(M.Sc. Thesis)**

Seda Erkan

**GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

March 2014

ABSTRACT

In this study, the mass distributions of residual nuclei occurring as a result of nuclear reactions formed by sending the proton beam having 1 GeV energy and 1mA current to the Pb solid target and Pb-Bi liquid using Accelerator Driven System is examined. For this, Pb cylinder solid target with 70 cm of height and 20 cm of radius and the Pb-Bi liquid target being in a cylinder container with 376 cm height, 188 cm of radius and HT9 construction material are used. The mass distributions of residual nuclei are determined with Bertini/ABLA, Bertini/Dresner, CEM2K, INCL4/ABLA, INCL4/Dresner, ISABEL/ABLA, ISABEL/Dresner models and the results of these models have been compared. The radioactive residual nuclei formed at the two different targets used in the study are determined, their activity are calculated and compared with each other.

Science Code : 202.1.108

Key Words : Accelerator Driven System, Residual Nuclei, MCNPX

Page Number : 59

Supervisor : Prof. Dr. Başar ŞARER

TEŞEKKÜR

Tez alıőmamda yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Başar ŞARER'e; ve yardımlarından dolayı Yurdunaz ÇELİK'e, hayatım boyunca beni destekleyen aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. HIZLANDIRICI GÜDÜMLÜ SİSTEMLER.....	2
2.1. Hızlandırıcı Güdümlü Sistemin Temel Elemanları.....	3
2.1.1. Hızlandırıcılar.....	4
2.1.2. Hedef.....	6
2.1.3. Kritikaltı kor.....	8
3. PARÇALANMA REAKSİYONLARI.....	10
3.1. İntra Nükleer Kaskade Model.....	11
3.1.1. Bertini model yaklaşımları.....	11
3.1.2. INCL4 model yaklaşımları.....	13
3.1.3. ISABEL model yaklaşımları.....	15
3.1.4. CEM2K model yaklaşımları.....	17
3.1.5. ABLA ve DRESNER model yaklaşımları.....	18
3.2. Denge Öncesi (Pre-Equilibrium) Model.....	20
3.3. Buharlaşma (Evaporation) Model.....	21
4. REZİDUAL ÇEKİRDEKLER.....	22
4.1. Rezidual Çekirdeklere Aktiflik Hesabı.....	24
4.1.1. Radyoaktiflik.....	24

	Sayfa
4.1.2. Alfa aktifliğinin hesaplanması	27
5. MCNPX MONTE CARLO YÖNTEMİ	28
6. HESAPLAMALAR	30
6.1. Demet Yolu ve Demet Penceresi	30
6.2. Hedef.....	31
6.3. Soğutucu	31
6.4. Yansıtıcı.....	31
6.5. Dış Kap	31
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	35
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR	53
EKLER.....	57
EK 1. Rezidual çekirdekler	Hata! Yer işareti tanımlanmamış. 8
ÖZGEÇMİŞ	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2. 1. Dünyadaki toryum rezervleri	2
Çizelge 2. 2. Dünyadaki hızlandırıcılar ve enerjileri	6
Çizelge 3. 1. ABLA ve Dresner	19
Çizelge 3. 2. Modellerin karşılaştırılması	19
Çizelge 6. 1. HT9'u oluşturan izotoplar ve kütle oranları	31
Çizelge 6. 2. Sistem Geometrisi	32
Çizelge 6. 3. 1 GeV p + Pb reaksiyonunda oluşan rezidual çekirdeklerin modellere göre birim kütle ve kaynak proton başına toplam miktarları	37
Çizelge 6. 4. 1 GeV p + Pb-Bi nükleer reaksiyonunda oluşan rezidual çekirdeklerin modellere göre birim kütle ve kaynak proton başına toplam miktarları	38
Çizelge 6. 5. Pb hedefte oluşan bazı rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri.....	39
Çizelge 6. 6. Pb-Bi hedefte oluşan bazı rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri	40
Çizelge 6. 7. 1 GeV p + Pb hedef nükleer reaksiyonunda demet penceresinde oluşan rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri	41
Çizelge 6. 8. 1 GeV p + Pb-Bi hedef nükleer reaksiyonunda demet penceresinde oluşan rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri	42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. Hızlandırıcı güdümlü sistemin temel elemanları	4
Şekil 2. 2. Lineer ve dairesel hızlandırıcılar	5
Şekil 2. 3. 1 GeV enerjili proton demetinin gerçekleştirdiği parçalanma reaksiyonu	8
Şekil 3. 1. Parçalanma reaksiyonları	10
Şekil 3. 2. Eksiton (Exciton) modelin şematik gösterimi	20
Şekil 4. 1. Yüksek enerjili parçacığın çekirdek üzerine gönderilmesi	22
Şekil 4. 2. 800 MeV p + Pb reaksiyonu sonucu oluşan rezidual çekirdeklerin kütle	23
Şekil 4. 3. Kararlılık kuşağı.....	25
Şekil 4. 4. Aktifliğin üstel değişimi	26
Şekil 6. 1. Pb-Bi hedef kullanılan HGS'ye ait bir kesit.....	33
Şekil 6. 2. Pb-Bi hedef kullanılarak HGS'nin üç boyutlu saydam ve opak görünümü	33
Şekil 6. 3. Pb-Bi hedef için üç boyutlu demet penceresi	34
Şekil 6. 4. Pb hedef kullanılan HGS'ye ait bir kesit.....	34
Şekil 6. 5. Pb hedef kullanılan HGS'nin üç boyutlu saydam ve opak görünümü	35
Şekil 6. 6. Pb hedefte nükleer reaksiyonlar sonucunda oluşan rezidual çekirdeklerin	36
Şekil 6. 7. Pb-Bi hedef reaksiyonu sonucunda oluşan rezidual çekirdeklerin kütle ..	38
Şekil 6. 8. 1 GeV p + Pb hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet penceresinde	40
Şekil 6. 9. 1 GeV p + Pb-Bi hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet penceresinde	41
Şekil 6. 10. 1 GeV p + Pb hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet borusunda...	42

Şekil	Sayfa
Şekil 6. 11. 1 GeV p + Pb-Bi hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet borusunda	43
Şekil 6. 12. Pb-Bi hedefte Bertini/ABLA modeliyle hesaplanan rezidual.....	44
Şekil 6. 13. Pb hedefte Bertini/ABLA modeliyle hesaplanan rezidual çekirdeklerin	44
Şekil 6. 14. Pb hedefte Bertini/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin .	45
Şekil 6. 15. Pb hedefte CEM2k modeliyle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle .	45
Şekil 6. 16. Pb hedefte INCL4/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin...	46
Şekil 6. 17. Pb hedefte INCL4/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin.	46
Şekil 6. 18. Pb hedefte ISABEL/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin	47
Şekil 6. 19. Pb hedefte ISABEL/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin	47
Şekil 6. 20. Pb-Bi hedefte Bertini/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin	48
Şekil 6. 21. Pb-Bi hedefte CEM2k modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı	48
Şekil 6. 22. Pb-Bi hedefte INCL4/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin	49
Şekil 6. 23. Pb-Bi hedefte INCL4/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin	49
Şekil 6. 24. Pb-Bi hedefte ISABEL/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin	50
Şekil 6. 25. Pb-Bi hedefte ISABEL/Dresner modelle hesaplanan rezidual	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
γ	Gama
α	Alfa
β	Beta
cm	Santimetre
d	Döteryum
Dy	Disprozyum
fm	Fermi
GeV	Giga elektronvolt
Gd	Gadolinyum
Hg	Civa
^3He	Helyum
^4He	Alfa parçacığı
mA	Miliamper
mHz	Milihertz
MeV	Mega elektronvolt
μPa	Mikropascal
n	Nötron

Simgeler	Açıklama
Pb	Kurşun
Pb-Bi	Kurşun-Bizmut
Po	Polonyum
p	Proton
Pm	Prometyum
Sm	Samaryum
Th	Toryum
U	Uranyum
Kısaltmalar	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BNL	Brookhaven Ulusal Laboratuvarı
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CEM	Kaskade Eksiton Model
ENDF	Nükleer Veri Kütüphanesi
FEAT	İlk enerji yükseltici testi
HGS	Hızlandırıcı Gdümlü Sistem
HT9	Paslanmaz çelik
INC	İntra nükleer kaskade
LHC	Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
LAHET	Birleştirilmiş kod

Kısaltmalar**Açıklamalar****LANL**

Los Alamos Ulusal Laboratuvarı

MEGAPIE

Megawatt öncü deneyi

MYRRHA

Hızlandırıcı Güdümlü Sistem projesi

MCNP

Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu

MCNPX

Monte Carlo Geliştirilmiş N-Parçacık Kodu

TESLA

DESY Elektron-Pozitron Hızlandırıcı

TEVATRON

Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı

HERA

DESY Elektron-Proton Hızlandırıcı



1. GİRİŞ

Toplumun gittikçe artan enerji tüketimi ve ihtiyacı tüm ülkeleri yeni kaynak aramaya yöneltti [1]. Dolayısıyla nükleer endüstride U^{238} ve Th^{232} 'den kaliteli nükleer yakıt elde etme, güvenli nükleer enerji üretme ve depolama alanlarındaki atık miktarını azaltma çalışmaları başladı. Bu çerçevede hızlandırıcı güdümlü sistemlere olan ilgi arttı.

HGS'ler (Hızlandırıcı Güdümlü Sistemler) reaktör teknolojisindeki yakıt, güvenlik gibi sınırlamaları ortadan kaldıran ve nükleer atığı yakmak için çalışan yeni teknolojilerden en önemlisidir. Hızlandırıcı güdümlü sistem, temel olarak hızlandırıcı, hedef ve kritikaltı kor'dan oluşur, bir hızlandırıcıdan gönderilen proton demetinin katı veya sıvı hedefe gönderilmesi temeline dayanır. Sistemde, yüksek enerjili parçacık ile hedef arasında meydana gelen nükleer reaksiyonlar sonucu radyoaktif veya radyoaktif olmayan çekirdekler oluşmakta ve bu çekirdekler rezidual çekirdekler olarak adlandırılmaktadır. Rezidual çekirdekler sistemin diğer elemanları olan demet borusu ve demet penceresinde de oluşmaktadır. Rezidual çekirdeklerin oluşumu hakkında elde ettiğimiz bilgiler; HGS tasarımı için gereklidir ve HGS'de kullanılacak hedefin belirlenmesinde bize ipucu vermektedir.

2. HIZLANDIRICI GÜDÜMLÜ SİSTEMLER

Glen Seaborg 1941 yılında hızlandırıcı kullanarak plutonyum üretti. Bununla ilgili ilk çalışma 1940’larda E.O Lawrance ve Eski Sovyetler Birliğinde W.N Semenov tarafından bir nötron kaynağından oluşturulan nötronların kullanılmasıyla yapıldı [2]. 1960’larda Lawrance ve arkadaşları yapay olarak materyal oluşturabilen hızlandırıcı patenti aldı.

HGS’nin ilk gerçekçi tasarımı Amerika’da bulunan LANL ve BNL laboratuvarlarında (1991) yapıldı. Daha sonra Carlo Rubia’nın başkanlığında, CERN’de çalışan bir grup bilim adamı, yüksek yoğunluğa sahip proton hızlandırıcı ile beslenerek uzun ömürlü fisyon ürünlerini dönüştürmek ve minör aktinitlerle enerji üretmek için kullanılan “enerji yükseltici” olarak adlandırdıkları tasarımı geliştirdiler. Bu sistemin doğrulanması 1994 yılında yapılan FEAT ve 1997 ile 1998 yılları arasında yapılan deneylerle ispatlandı [3]. 2000’li yıllarda HGS ile ilgili yapılan çalışmalarda dönüm noktasına gelindi. Hızlandırıcı güdümlü sistemi oluşturan hızlandırıcı, hedef, kritikaltı kor için deneyler yapıldı [4].

HGS’ler, işletimde olan reaktörlerin ortaya çıkardığı yüksek seviyeli atıkları yakan ve çok düşük düzeylerde yüksek seviyeli atık üreten, zengin yakıt kompozisyonlarına sahip, kaza riski olmayan, son derece güvenilir yeni bir teknolojidir. Ayrıca bu reaktörlerde toryumun yakıt olarak kullanılması büyük avantajdır zira toryum tabiatta uranyumun yaklaşık 4 katı kadar fazla bulunmaktadır.

Çizelge 2. 1. Dünyadaki toryum rezervleri

ÜLKELER	ÇIKARILABİLİR	BELİRLENMİŞ*
ABD	158 000	298 000
Avustralya	44 000	49 000
Brezilya	16 000	18 000
Kanada	100 000	100 000
Hindistan	292 000	300 000
Malezya	4 000	4 000
Norveç	166 000	183 000
G.Afrika Cumhuriyeti	117 000	196 000
TÜRKİYE		380 000

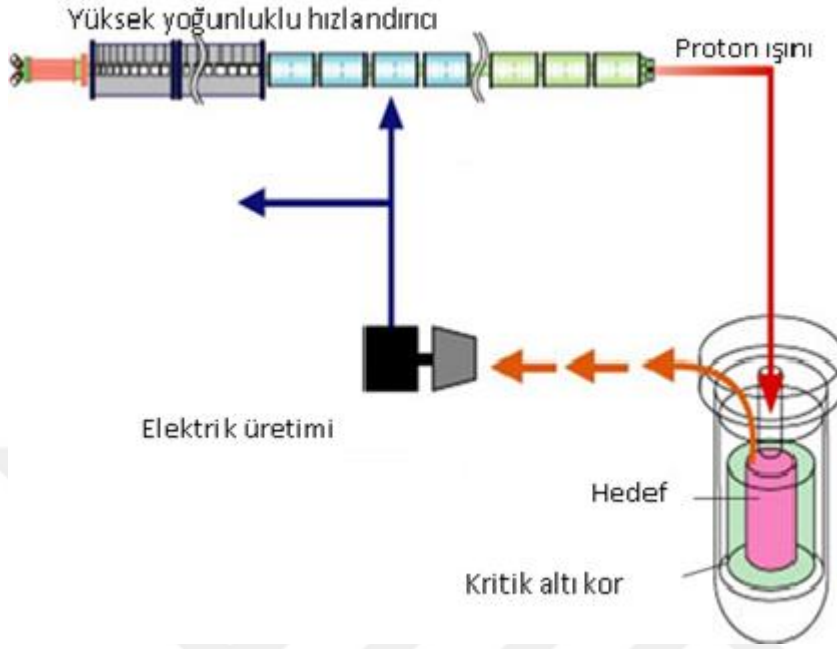
Toryumla çalışan, aktif nükleer reaktör bulunmamaktadır. Bu santrallerin çalışmaları ABD, İngiltere, Almanya, Hindistan ve Japonya’da yapılmaktadır [6].

Hızlandırıcı güdümlü sistemler temel olarak hızlandırıcı ve bir kritikaltı reaktörün birleştirilmesiyle oluşmuştur. Sistemde; kritikaltı düzenek ve nötronları çoğaltmak için bölünebilir malzeme (hedef) bulunmaktadır. Bu düzenekte hızlandırıcıdan gönderilen yüksek enerjili (~ 1 GeV) proton demetinin hedefe çarpmasıyla meydana getirdiği parçalanma reaksiyonu sonucunda nötronlar oluşur. Nükleer reaksiyon sonucu oluşan yüksek enerjili nötronlar, bölünebilir izotopları ve uzun ömürlü fisyon ürünlerini kısa ömürlü radyoizotoplara veya kararlı çekirdeklere dönüştürürler [7]. Hızlandırıcıdan hedefe gönderilen parçacıklar proton, nötron, vb. olabilir. Fakat nötron üretimine bakıldığında en uygun parçacık olarak proton görülmektedir. Reaktörlerde kritiklik önemli bir konudur. HGS'ler kritikaltı kora sahip olmalarından dolayı kritik olarak çalışan nükleer reaktörlere göre daha güvenlidirler [8]. Hedefe gönderilen demet akımının kesilmesi reaktörde meydana gelecek reaksiyonların durmasını sağlayarak kaza riskini ortadan kaldırmaktadır. Bu özellik sistemin son derece verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu durum kritiklik artışı sonucunda yaşanan Çernobil, Three Mile Island tipi kazaların olmasını önleyecektir.

2.1. Hızlandırıcı Güdümlü Sistemin Temel Elemanları

Hızlandırıcı güdümlü sistemler temel olarak 4 bölüme ayrılmaktadır. (Şekil 2.1)

1. Hızlandırıcı: Protonları hızlandırarak hedefe gönderir
2. Hedef (sıvı veya katı): Hızlandırıcıdan gelen protonlarla nükleer reaksiyonu sonucunda nötron oluşmasını sağlar
3. Kritikaltı kor: Uzun ömürlü fisyon ürünlerini nötronları kullanarak dönüşümünü sağlar
4. HGS sistemleri: Reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan enerjiyi kontrol altına alırlar



Şekil 2. 1. Hızlandırıcı güdümlü sistemin temel elemanları

2.1.1. Hızlandırıcılar

Yüksek ışın yoğunluğuna (10-25 mA) sahip hızlandırıcılar, hızlandırıcı güdümlü sistemlerde nükleer atık yakımı ve enerji oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. HGS'lerde genellikle protonları hızlandırmak için kullanılan hızlandırıcılar, lineer (linak) ve dairesel (siklotron) hızlandırıcılardır. Parçacıkların, yolları üzerinde atom ya da moleküllere rastlayıp çarparak hız kaybetmemeleri için, hızlandırma işinin, vakumlanmış bir tüpün içinde yapılması gerekir. Eğer tüp bir doğru şeklindeyse, bu doğrusal bir hızlandırıcı olur.

Parçacıkların ne kadar yüksek enerjilere çıkması isteniyorsa, tüpün de o kadar uzun olması gerekir. Bu durum, tüpün yerleştirileceği tünelin maliyetini artırır. Bunun alternatifi, ek bir manyetik alan uygulamak suretiyle, parçacıkları dairesel yörüngeler üzerinde döndürerek hızlandırmaktır. Buna göre inşa edilen dairesel hızlandırıcılar, hızlandırma işlemi için kullanılan alan türlerine ve şekillerine bağlı olarak 'siklotron' ya da 'sinkrotron' denir [9]. Parçacıklar hızlandırılma sürecinde, ivmelendirilen her yüklü parçacığın yaptığı gibi ışınarak enerjilerinin bir kısmını kaybeder.



Şekil 2. 2. Lineer ve dairesel hızlandırıcılar

Yüklü parçacık hızlandırıcıları; parçacıkların izlediği yörüngeye göre lineer ve dairesel hızlandırıcılar olarak iki ayrı grupta ele alınır. Dairesel hızlandırıcılarda parçacıklar, hızlandırıcı yapıyı periyodik olarak dolanır ve her defasında belli bir miktar enerji kazanarak kapalı yörüngeleri izler. Lineer hızlandırıcılarda ise parçacıklar hızlandırıcı yapıyı sadece bir kez geçer.

Linaklarda hızlandırma gradyeni ve uzunluğa göre hafif parçacıklarda günümüzde bir kaç GeV enerjilere ulaşılmaktadır. 250 GeV'lik elektron-pozitron demetine sahip ve 33 km uzunluğundaki TESLA hızlandırıcısı ise 2009'da çalışmaya başlamıştır. En tipik olanı sinkrotronlardır. Bu güne kadar inşa edilmiş en büyük sinkrotron CERN'deki elektron-pozitron çarpıştırıcısı LEP (Large Electron Positron) olmuştur. Bu sinkrotronda çevre uzunluğu 27 kilometredir. Demet enerjileri demet başına 100 GeV mertebesine ulaşmıştır. Günümüzde TeV enerjili sinkrotronlar mevcuttur (TEVATRON, LHC vb.). Ayrıca siklotron ve mikrotron da dairesel hızlandırıcı tipleridir. Ancak, boyut olarak daha küçük ve fizik açısından daha ağır olan parçacıkların ve iyonların hızlandırılmasına daha uygun olan diğer bir dairesel hızlandırıcı tipi ise siklotronlardır.

Lineer (Linak) hızlandırıcı

Lineer hızlandırıcı, klistron (300-400000 mHz frekansta salınım yaratan elektronik alet) gibi bir araçla meydana getirilen radyo frekanslı bir elektrik alanı aracılığıyla protonları ve elektronları düz ve havası boşaltılmış bir odacıkta hızlandıran parçacık hızlandırıcısıdır. Yüksek enerjili modern lineer hızlandırıcılarda klistronlar odacık boyunca düzenli aralıklarla radyo frekansı verir. Radyo frekans boşlukları arasında manyetik merceklerle sağlanan küçük bir manyetik alan, parçacıkları aynı doğrultuda tutar. Lineer hızlandırıcıda enerji kazanma her metrede protonlar için 1,5 MeV elektronlar için 7 MeV'dir [10].

Siklotron hızlandırıcı

Doğrusal hızlandırıcılardaki bileşenler, hızlandırma işlevinde yalnızca bir kez kullanılabilirler. Çok yüksek enerjiler elde edilmek istendiğinde, doğrusal hızlandırıcıların boyunu çok uzun tutmak gerekir. Dairesel hızlandırıcıların üstünlüğü buradadır. Hızlandırılmış tanecikler döndürülüp, hızlandırıcı istasyonundan yeniden geçirilirse, elde edilecek kazanç çok büyük olur. Bu tür bir hızlandırıcı ilk kez E.O. Lawrence tarafından yapıldı ve "siklotron" diye adlandırıldı. Yüklü tanecikler bir vakum odasının merkezine gönderilirler. Vakum odası yassı bir silindir gibidir ve içi D biçimli iki yarım dairesel bölmeyle ayrılmıştır. Bu bölmeler arasında bir boşluk bulunur ve elektrik alan bu boşluğa uygulanır. Odanın çevresindeki dairesel mıknatıs, taneciklerin yol aldığı tüm hacimlere değişmez bir alan uygular. Bunun sonucu olarak, tanecikler oda içine merkezden gönderilirler ve boşluğa geldiklerinde elektrik alanı tarafından hızlandırılırlar [11].

Çizelge 2. 2. Dünyadaki hızlandırıcılar ve enerjileri [12]

Hızlandırıcı	Parçacık	Enerji (GeV)
KEK (Dairesel)	P	12
SLAC (Doğrusal)	e ⁻	25
PS (Dairesel)	P	28
AGS (Dairesel)	P	32
SPS (Dairesel)	P	250
Tevatron II (Dairesel)	P	1000

2.1.2. Hedef

Hızlandırıcıdan gelen protonlarla etkileşimi sonucu nükleer reaksiyon meydana getirerek yüksek enerjili nötronlar oluşmasını sağlayan hedef, HGS'nin temel elemanlarından biridir. Hedef, kiritikaltı korun merkezinde bulunmaktadır. Hedefin yüksek enerjili proton demetine dayanıklı olması (hedefte meydana gelen radyasyon zararının küçük olması gerekir), kaynama noktasının yüksek olması ve parçalanma reaksiyonlarıyla ortaya çıkan ısıyı iyi iletmesi gerekir [13]. Genel olarak kurşun hedef üzerine gönderilen 1 GeV enerjili proton başına yaklaşık olarak 20 ile 30 arası nötron üretilir [14]. Gelen parçacıkla hedefin etkileşmesi sonucu oluşan nötronların sayısı zincirleme reaksiyonun devamı ve sistemin kritikliği için önemlidir. Oluşan nötronların akısı ise protonların hızlandırıcıdan gelme gücüne bağlı olarak 10^{14} - 10^{15}

$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ değerleri arasındadır. Nükleer atıkların dönüşümünü sağlamak için $10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ nötron/proton akıya ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bunun belirli bir değeri yoktur. Bu yüzden $<10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ değeri gerekli olan akı olarak göz önünde bulundurulmaktadır [8]. Sistem için hedef belirlenirken dikkat edilmesi gereken özellikler, nötron üretimi, termal özellikler ve aktivasyondur. Bunların yanı sıra hedefe gönderilen parçacık ve hedefin geometrisi de dikkat edilmesi gereken özelliklerdir.

Hızlandırıcı güdümlü sistemler için önerilen hedef ikiye ayrılmaktadır. Bunlar parçalanma reaksiyonları sonucu oluşan çekirdeklerin atık yönetimi ve güvenlik açısından uygun özelliklere sahip olan, nötron verimi yüksek, radyasyona dayanıklı mekanik sıvı metal hedefler (Pb-Bi) ve yüksek yoğunluğa ve iyi ısı iletimine sahip katı hedeflerdir (kurşun, tungsten, tantal).

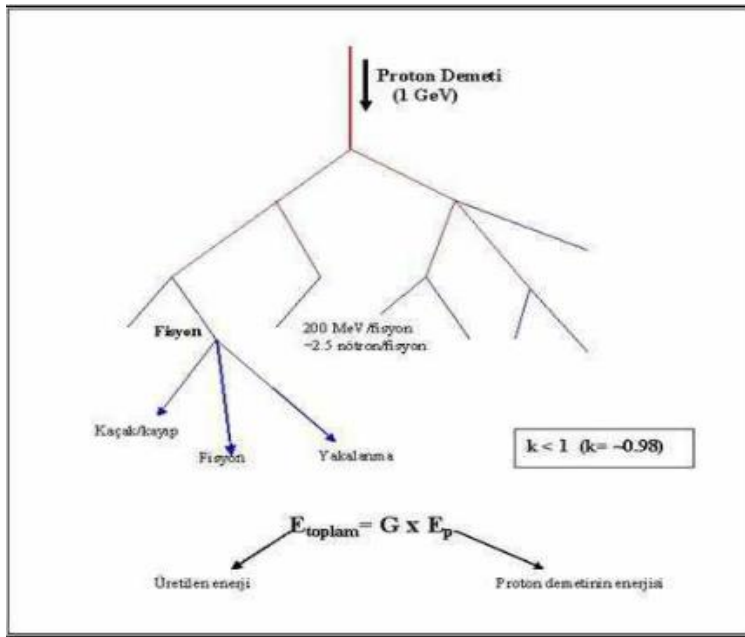
Sıvı metal hedefler; pencereless hedef ve penceresiz hedef olmak üzere iki şekilde kullanılır. HGS’de sıvı hedef kullanıldığında hızlandırıcı ve hedef arasındaki bağ iki temel şekilde yapılmaktadır. Hızlandırıcı ile hedefin birleştii noktada katı bir pencerenin bulunması ile pencereless hedef veya hızlandırıcıdan gelen parçacıkların doğrudan sıvı hedefe çarpmasıyla olan penceresiz hedef kullanılır. Proton hızlandırılırken yüksek vakuma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden hızlandırıcı ve hedef, yüksek sıcakluğa ve yüksek radyasyon basıncına dayanıklı pencere ile ayrılmak zorundadır. Eğer bu pencere kırılırsa sistemin tümü büyük zarar görebilir. Bu nedenle de penceresiz sistemler önerilmiştir. Penceresiz sistemlerde pencereless sistemde bahsettiğimiz problemler söz konusu değildir. Fakat penceresiz sistemde karşımıza çıkan problem parçalanma ürünlerinin buharlaşması sonucu demet borusunun kirlenmesidir [15,16].

Sıvı metal hedef için sadece iki seçenek vardır. Bunlar: Hg (civa) ve Pb-Bi (kurşun bizmut) sıvılarıdır. Soğutucu özelliğine sahip olduğu için birincil hedef olarak ise kurşun-bizmut sıvı hedefi kullanılmaktadır. Kurşun-bizmut sıvı hedefin yüksek kaynama sıcakluğı, buna oranla düşük olan erime sıcakluğı ve genleşme olduğunda hacminde değişikliğin hemen hemen hiç olmaması, Pb-Bi hedefin avantajlarıdır. Sıvı hedeflerin katı hedeflere göre tercih edilmesinin sebebi katı hedefte radyasyon

zararının fazla olması, nötron yutma özelliği az olduğundan ısıyı az üretmesi, hızlandırıcı kapatıldıktan sonra geç soğumasıdır. Bu nedenlerden dolayı sıvı hedefler katı hedeflere göre tercih edilmektedir [13]. Bunların yanı sıra Pb-Bi sıvı hedefin dezavantajları bizmutun nötronlarla etkileşimi sonunda kısa ömürlü zararlı alfalar ile ^{210}Po yayınlamasıdır. Kurşun bizmut sıvı hedefi MEGAPIE ve MYRRHA projelerinde de parçalanma hedefi olarak kullanılmıştır [16].

2.1.3. Kritikaltı kor

Hızlandırıcı güdümlü sistemlerin önemli parçalarından biri de kritikaltı korlardır. Burada önemli olan çoğaltma faktörünün değeridir. Çoğaltma faktörü bir nesilden diğerine termal nötronların sayısındaki net artışı vermektedir. Reaktörlerde çoğaltma faktörü k ile gösterilir ve eğer $k = 1$ ise reaktör kritik, $k > 1$ kritik üstü, $k < 1$ ise kritikaltı çalışmaktadır. Hızlandırıcı güdümlü sistemde de $k < 1$ 'dir ve bu da sistemin güvenli olmasını sağlar. Eğer proton ışını kesilirse, nötron oluşumu durur ve reaktör otomatik olarak kapanır. Hızlandırıcıda kritikaltı sistem kontrol mekanizmasını sağlar. Bu sistem kritik reaktörlerdeki kontrol çubuklarından daha güvenlidir.



Şekil 2. 3. 1 GeV enerjili proton demetinin gerçekleştirdiği parçalanma reaksiyonu [17]

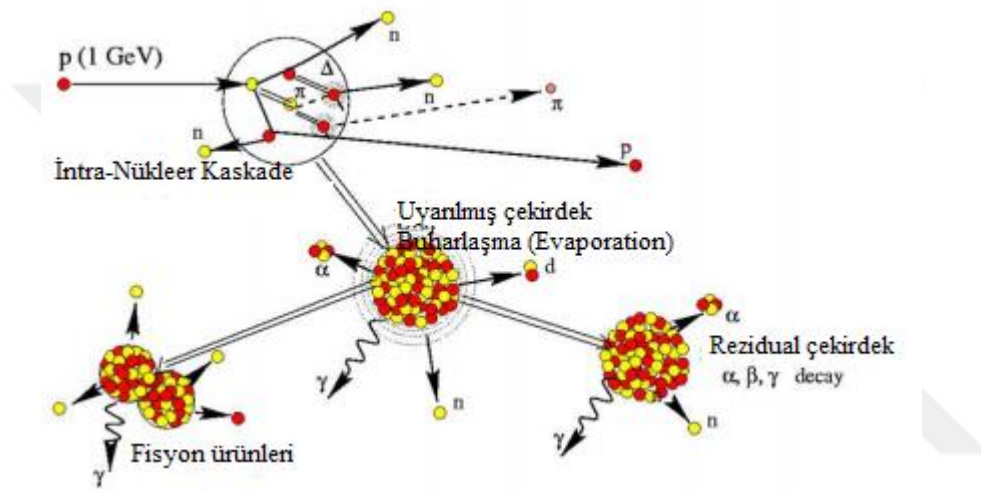
HGS'lerde nötronlar, hedefe gelen yüksek enerjili parçacıkla hedefin etkileşmesi sonucu nükleer reaksiyonlarla oluşur ve bu nötronlar hedefin çevresinde bulunan yakıtlarla reaksiyona girerek onları düşük seviyeli atıklara veya radyoaktif olmayan çekirdeklere dönüştürür. Hızlandırıcının akımı kesildiğinde parçalanma reaksiyonları durur ve nötron üretimi gecikir. Bu da reaktörün kritikliğini kritik üstü yapacak kadar nötron çoğalmasının olmayacağı anlamına gelir. HGS'lerde güvenlik sınırları göz önüne alındığında k değerinin yaklaşık 0,98 olması gerekir. Eş. 2.1'de net enerji üretiminin fonksiyonu verilmiştir.

$$G = \frac{G_0}{1-k} \quad (2.1)$$

G reaktörün termal gücünü, G_0 ise hızlandırıcının tükettiği elektrik gücünü ifade eder. Yapılan araştırmalar ve analizler k değerinin 0,96'nın altına düştüğünde HGS'de üretilen enerjinin ekonomik olmadığını ortaya koymuştur [8,17].

3. PARÇALANMA REAKSİYONLARI

Hedef çekirdek ve yüksek enerjili (birkaç GeV) parçacığın etkileşimi ile oluşan nükleer reaksiyonlar parçalanma (spallation) reaksiyonları olarak adlandırılmaktadır. “Spallation” kelimesinin kökeni İngilizce bir kelime olup parçacık oluşumu anlamına gelen “to spall” kelimesinden gelmektedir.



Şekil 3. 1. Parçalanma reaksiyonları [18]

Şekil 3.1’de parçalanma reaksiyonlarının şematik şekli görülmektedir. Ağır çekirdek hedefi ile yüksek enerjili parçacık demetinin etkileşimine parçalanma reaksiyonu denir. Hedefe gönderilen yüksek enerjili parçacık önce INC (İntra nükleer kaskade) ve buharlaşma (evaporation) reaksiyonlarını başlatır. Gelen parçacığın enerjisi birkaç yüz MeV ile birkaç GeV arasında değişir. Bu enerjilerdeki mekanizmayı Serber modellemiş ve parçacık-çekirdek çarpışmalarındaki mermi parçacığının de Broglie dalga boyunun ortalama nükleonlar arasındaki mesafeden ($1 \text{ fm} = 10^{-13}$) daha küçük olduğunu fark etmiştir. (Yaklaşık olarak 10^{-14} cm) INC (İntra nükleer kaskade) modelinin geçerli olabilmesi için mermi parçacığının sahip olduğu en düşük enerji 200 MeV olmalıdır.

1947 yılında Serber parçalanma reaksiyonlarının iki aşamada gerçekleştiğini öne sürdü. Birinci aşama, INC olarak adlandırılan ve 10^{-22} saniyede gerçekleşen hızlı

aşamadır. Hedef çekirdeğin nükleonları ile parçacıkların etkileşimi sonucu oluşan reaksiyon olarak kabul edilir. İkinci aşama, buharlaşma aşaması, INC aşamasının sona erdiği ve uyarılmış çekirdeğin oluşmasıyla başlayan aşamadır. Kaskadeden daha yavaştır, yaklaşık 10^{-20} saniye sürer. Bu esnada çekirdek parçacık yayarak (de-excitation) (α, β, γ) ya da fisyon yaparak temel duruma gelir [18].

3.1. İntra Nükleer Kaskade Model

Parçalanma reaksiyonlarını iki aşamaya ayırabiliriz. Bunlardan ilki, INC'dir ve 10^{-22} saniyede gerçekleşir. INC hedef çekirdeğin nükleonları ile parçacıkların etkileşimi sonucunda oluşur.

3.1.1. Bertini model yaklaşımları

INC model ilk olarak 1947 yılında Serber tarafından önerildi. İlk bilgisayar simülasyonu 1958'de Metropolis tarafından yapıldı. Bertini'nin 1968'de bulduğu sonuçları yayınlamasıyla INC uygulamalarının standart metodu oluştu. En önemli ekleme olan eksiton (exciton) model 1966' da Griffin tarafından yapıldı [19].

Bertini modelin limiti

Modelin geçerliliği için gerekli şartlar şunlardır:

$$\lambda_B/v \ll \tau_c \ll \Delta t \quad (3.1)$$

λ_B nükleonların de Broglie dalga boyu, vortalama bağıl nükleon nükleon hızı, Δt çarpışmalar arasındaki zaman aralığıdır.

INC+EQ (İntra nükleer kaskade model +Equilibrium (Denge) model) veya INC +PE+ EQ (İntra nükleer kaskade model +PreEquilibrium (Denge öncesi) model+ Equilibrium (Denge) model)

Hedef Çekirdek: Bütün çekirdekler

En yüksek enerji: Çekirdek+Çekirdek etkileşimleri için 3,5 GeV, Çekirdek+Nükleon etkileşimleri için 2,5 GeV

En düşük enerji: 20 MeV-150MeV

Bertini modelin çekirdek yoğunluğu

Model, çekirdek yoğunluğunu Eş. 3.2'deki gibi hesaplamaktadır.

$$P(r) = \rho_0 \left[1 + \exp\left[\frac{r-c}{a}\right] \right]^{-1} \quad (3.2)$$

$$c = 1,07A^{1/3} \text{fm} \quad a = 0,545 \text{fm} \quad (3.3)$$

$$P(r) = a_i \rho_0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

$$a_1 = 0,9 \quad a_2 = 0,2 \quad a_3 = 0,01$$

Bertini model, çekirdeği üç ortak merkezli iç içe geçmiş kürelere ayırmaktadır. Bertini modelde çekirdeklerin yarıçapı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

1. Eğer hedef çekirdek hidrojen ($A=1$) ise, direk parçacık parçacık çarpışması olur ve bunun için nükleer model kullanılmamaktadır.
2. $1 < A < 4$ ise, çekirdek modeli 8.0 fm yarıçaplı bir katmandan oluşmaktadır.
3. $4 < A < 11$ ise, çekirdek model üç ortak merkezli küreden oluşmaktadır.
4. $11 < A$ ise, yine çekirdek modeli üç ortak merkezli küreden oluşmuştur [19].

Çekirdek içindeki proton ve nötronların 0°C 'de Fermi enerji dağılımına sahip olduğu varsayılır. Protonların potansiyel kuyu derinliği her bölgedeki protonun 0°C 'daki Fermi enerjisinden daha büyük olan 7 MeV alınmaktadır. Nötronlarda da buna benzer şekilde hesaplanmakta ve yine 7 MeV alınmaktadır. 7 MeV çekirdekten bir nükleonun ayrılma enerjisine eşittir [20].

Bertini modelin durma zamanı

Çekirdek; INC aşamasında nükleer reaksiyonlar gerçekleştikten sonra dengeye geldiğinde kaskadenin durduğu düşünülmektedir. Durma zamanı için iki yaklaşım bulunmaktadır; biri zaman temelli, diğeri enerji temelli. Bertini model enerji temelli durma zamanını esas alır. Çekirdekteki nükleonların enerjisi Eş 3.5'de verilen eşik enerjisinden daha düşük olduğunda aşamanın bittiği kabul edilir.

$$E_{\text{eşik}}=7 \text{ MeV} \quad (3.5)$$

Bertini modelde Pauli dışarlama ilkesi

Bertini modelde Pauli dışarlama ilkesi geçerlidir. Fermi gaz modeline göre; proton ve nötronlar en düşük seviyeden başlayarak ayrı ayrı ve ikişer ikişer seviyeleri doldurur. Pauli ilkesi şunu gerektirir: gelen mermi parçacık bir nükleonla etkileştiği zaman onu uyarır ve o nükleon üst seviyeye çıkar, çıkacağı bu üst seviyenin dolu olmaması gerekir. Yani eğer gelen mermi parçacığın enerjisi uyardığı nükleonu boş bir seviyeye çıkarmaya yetmiyorsa etkileşim yasaklanır.

3.1.2. INCL4 model yaklaşımları

Intra Nuclear Cascade Model of Liège (INCL4), J.Cugnon tarafından geliştirildi. Parçalanma reaksiyonlarının INC safhasını açıklamak için kullanılır. INCL4, FORTRAN yazılımı ile hazırlanmış bir Monte Carlo simülasyon kodudur. Bu model 1980 yılında ağır iyonlar arasındaki çarpışmaları çalışmak için oluşturuldu [21,22]. Daha sonraları bu model yüksek enerjili protonla çekirdek arasındaki çarpışma reaksiyonlarına uyarlandı [18].

INCL4 modelin limiti

Proton ile nükleonlar arasındaki etkileşimin başladığı ilk anı belirlemek için kullanılan 2 farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilkinde; çekirdek, nükleonların her birinin bir “ortalama serbest yol”unun bulunduğu, sürekli bir yapı olarak kabul edilir. INCL4’ün de kullandığı ikinci yaklaşımda ise parçacıkların, aralarındaki uzaklık belirli bir değerin altına düşmedikçe, parçacıkların birbirinden bağımsız olduğu kabul edilir. i -nci ve j -nci nükleonlar arasında bir etkileşimin söz konusu olabilmesi için bu iki nükleon arasında olması gereken en kısa mesafe Eş. 3.6 ile tanımlanır.

$$d_{i,j}^{\min} = \sqrt{\frac{\sigma_{ij}(s_{ij})}{\pi}} \quad (3.6)$$

Burada, σ_{ij} uygun enerji aralığındaki toplam reaksiyon tesir kesiti ve (s_{ij}) sistemin kütle merkezidir [23].

INC+EQ (İntra nükleer kaskade model + Denge(Equilibrium) modeli)

Hedef Çekirdek: daima hareketsiz olması gerekir[22].

Mermi Çekirdek: proton, nötron, dötöron, triton, ^3He , ^4He , π^+ , π^- , π^0 [22]

Enerji aralığı: 0,2-2 GeV arası

INCL4 modelin çekirdek yoğunluğu

INCL4 model çekirdek yoğunluğu Eş. 3.7'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\rho(r) = \begin{cases} \frac{\rho_0}{1 + \exp\left[\frac{r - R_0}{a}\right]} & r < R_{maks} \text{ için} \\ 0 & r > R_{maks} \text{ için} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$R_0 = (2,745 \cdot 10^{-4} A_T + 1,063) A_T^{1/3} \text{ fm} \quad (3.8)$$

$$a = 0,510 + 1,63 \cdot 10^{-4} A_T \text{ fm} \quad (3.9)$$

$$R_{maks} = R_0 + 8a \quad (3.10)$$

Burada; R_0 ve a : değerleri Alüminyum ve Uranyum için elektron parçalanma deneyleri sonuçlarına göre belirlenmiş parametrelerdir. A_T hedef çekirdeğin kütle numarasını, ρ_0 nükleon yoğunluğu dağılımının A_{hedef} için normalize edilmiş halidir [22].

INCL4 modelin durma zamanı

INCL4'ün kullandığı durma zamanı “zaman temelli” yaklaşım olup, bu yaklaşımda; hedef çekirdeğin büyüklüğüne bağlı olarak belirlenen bir t_{durma} zamanı sonunda INC

aşamasının sona erdiği kabul edilir. INCL4 modelde durma zamanı Eş. 3.11’de verilmiştir.

$$t_{durma} = f_{durma} t_0 \left[\frac{A_T}{208} \right]^{-0.16} \quad (3.11)$$

Burada, f_{durma} ayarlanabilen ve varsayılan değeri 1 olan bir parametre, A_T hedef çekirdeğin kütle numarasıdır [18,22]

$$t_0 = 70 \text{ fm} / c \quad (3.12)$$

INCL4 modelin pauli dışarlama ilkesi

INCL4 modelinin bakış açısı ile gerçekleştirilen Monte Carlo hesaplamalarında; Pauli dışarlama ilkesi, reaksiyonlar sonucunda oluşan ve Fermi enerjisi’nin altında bir enerjiye sahip olan nükleonların, diğer nükleonlarla etkileşimi göz ardı edilerek uygulanır. Dolayısı ile çekirdek içerisinde Pauli dışarlama ilkesi, sadece Fermi enerjisi’nden daha yüksek enerjili ikincil nükleonlar için uygulanır. Dinamik Pauli dışarlama olarak da isimlendirilen bu yaklaşımda; r_{ij} uzaklığında etkileşime girmek üzere olan i ve j nükleonları için yapılacak hesaplamalarda, bu nükleonlara nispeten daha yakın olan yani aynı etkileşim alanı veya faz uzayında bulunan diğer parçacıkların etkisi hesaba dâhil edilirken, daha uzakta bulunan parçacıklar hesabın dışarısında bırakılır [18,22,24].

3.1.3. ISABEL model yaklaşımları

ISABEL modeli 1978-1981 yılları arasında Yariv ve Fraenkel tarafından geliştirildi [27,28] ve Lahet kod ile MCNPX simülasyon kodlarına uyarlandı. ISABEL modelde, Chen et alın VEGAS modeli temel alınır [25,26].

ISABEL modelin limiti

ISABEL model de Bertini model gibi etkileşme kriteri olarak ortalama serbest yolu kullanır. Ortalama serbest yolu hesaplamak için Eş. 3.13 kullanılır.

$$\lambda = n\beta\tau \quad (3.13)$$

τ iki çarpışma arasındaki zaman aralığı, λ ortalama serbest yol, β mermi parçacıkların hızıdır ve n değeri 20-30 arası alınır. [25].

INC+EQ (İntra nükleer kaskade model +Denge (Equilibrium) modeli) veya INC +PE+ EQ (İntra nükleer kaskade model + Denge öncesi (PreEquilibrium) modeli + Denge (Equilibrium) modeli)

Hedef Çekirdek: Bütün çekirdekler

Mermi Çekirdek: $A \leq 4$ olan çekirdekler

En yüksek enerji: 1 GeV

En düşük enerji: 20 MeV-150MeV

ISABEL modelin çekirdek yoğunluğu

Model çekirdek yoğunluğunu Eş. 3.12'deki gibi hesaplamaktadır.

$$P(r) = \rho_0 \left[1 + \exp\left[\frac{r-c}{a}\right] \right]^{-1} \quad (3.14)$$

$$c = 1,07A^{1/3} \text{ fm}, \quad a = 0,545 \text{ fm}$$

$$P(r) = a_i \rho_0 \quad i = 1 \dots 16 \quad (3.15)$$

ISABEL model, çekirdeğin yoğunluğunu Fermi dağılımına göre Hofstated tarafından ölçülen VEGAS modelin kullandığı yoğunluk formülünü kullanarak hesaplar [25,27,28]. ISABEL, çekirdeği ortak merkezli, sabit yoğunluklu 16 bölgeye ayırmaktadır.

ISABEL modelin durma zamanı

ISABEL'in diğer INC modellerinden farkı, meydana gelen kaskade parçalarının oluşumunu, konumunu ve izlediği yolu modellemesidir. Bertini modelde gelen parçacık kaskade tanecikleriyle etkileşir, tanecik ve çekirdek onun girişini izler. Kesin bir kesme enerjisine sahiptir ve bu değer altında çekirdekte meydana gelen etkileşimler son bulur. ISABEL modelde ise INC modelin gelişimi için

modellenmiştir ve zamana bağlı çalışır. İki etkileşim arasındaki zaman aralığı aşağıdaki gibi verilmektedir [25].

$$\tau = \lambda / n\beta \quad (3.16)$$

τ iki çarpışma arasındaki zaman aralığı, β mermi parçacıkların hızı, λ ortalama serbest yoldur ve n 20-30 arası değerler alınır [25].

Ortalama yol Eş. 3.16'ya göre hesaplanır. Eğer parçacık hiçbir etkileşme yaşamamışsa, tekrar τ zaman aralığı hesaplanır ve etkileşme için yeni bir aday belirlenir. İşlem parçacık etkileşme yapana kadar veya çekirdekten ayrılana kadar tekrar edilir. Belirlenen zaman aralığında bir etkileşim olmuşsa etkileşim noktası belirlenir ve parçacık bu noktayla yer değiştirir. Giden parçacığın enerjisi hesaplanır ve giden parçacığı Pauli ilkesini ihlal edip etmediği kontrol edilir. Hesaplanan her bir zaman aralığı sonunda etkileşme için yeni bir aday belirlenir ve belirlenen her aday için zaman aralığı hesaplanır.

Bütün parçacıklar hedef çekirdeği terk ettiği zaman veya parçacıkların enerjileri belli bir enerji değerinin altına düştüğünde kaskade işlemlerinin hepsi durur. Bu enerji değeri nötronlar için en az ayrılma enerjisi kadar olmak zorundadır. ($E_F + E_B$) protonlar için sınır değeri hesaplanırken bağlanma enerjisine ek olarak coulomb bariyeri de eklenmelidir. ($E_F + E_B + E_C$) Sırasıyla E_F fermi enerjisi, E_B bağlanma enerjisi, E_C coulomb bariyeridir.

ISABEL modelin pauli dışarlama ilkesi

Pauli dışarlama ilkesi geçerlidir. Her bir etkileşim sonunda etkileşimin olduğu yerde r_{min} yarıçapa sahip delikler meydana gelir ve buralarda etkileşimler yasaklanır. ISABEL modelde Pauli dışarlama ilkesi diğer INC modellerdeki gibidir.

3.1.4. CEM2K model yaklaşımları

CEM (Cascade- exction model) model 1980 yıllarında Dubna'da JINR'de Mashnik, Gudima ve Toneev tarafından geliştirildi [29]. Cem model parçalanma reaksiyonlarını 3 aşamada gerçekleştirdiğini düşünüyor. Bu aşamalar kaskade, denge

öncesi ve denge aşamaları. Son aşama olarak bileşik çekirdek buharlaşma ve fisyon aşamalarını düşünüyor [22,29]. Cem2k model Cem modelin geliştirilmiş versiyonudur. Cem model Bertini,ISABEL ve INCL4 modelle karşılaştırıldığında sade bir model olmadığı görülür. Çünkü Cem model birçok farklı simülasyon kodunun birleşimidir.

CEM2K modelin limiti

INC +PE+ EQ (İntra nükleer kaskade model + (Denge öncesi) PreEquilibrium model+ Denge (Equilibrium) model)

Hedef Çekirdek: bütün çekirdekler

Mermi Çekirdek: proton,nötron , pionlar

En yüksek enerji: 5 GeV

En düşük enerji:100 MeV

CEM2K modelin çekirdek yoğunluğu

Model çekirdek yoğunluğunu Eş. 3.17'deki gibi hesaplamaktadır.

$$P(r) = \rho_0 \left[1 + \exp\left[\frac{r-c}{a}\right] \right]^{-1} \quad (3.17)$$

$$c = 1,07A^{1/3} \text{ fm}, \quad a=0,545 \text{ fm}$$

$$P(r) = a_i \rho_0 \quad i=1 \dots 7 \quad (3.18)$$

CEM2K çekirdeği Bertini modele benzer olarak çekirdeği 7 ortak merkezli küreye böler.

3.1.5. ABLA ve DRESNER model yaklaşımları

GSİ'da ABRABLA [30,31] geliştirildi. Bu model parçalanma reaksiyonlarını tanımlamak için geliştirildi. ABRABLA kodun bir parçası olan ABLA kod sistemi, uyarılmış bir çekirdeğin bozunmasında fisyon/buharlaşma (evaporation) yarışını tanımlar.

GSI'da K.H Schmidt ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen [32,33] ABLA, uyarılmış çekirdeğin hafif çekirdeklerin buharlaşma ve fisyon yoluyla taban duruma dönmesini tanımlayan dinamik bir koddur.

ABLA kod parçalanma reaksiyonları sonucu oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımların gösterilmesinde INC modellerle birleştirilir. INCL4-ABLA birleşimi sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında iyi sonuçlar verdiği gözlemlendi. Böylelikle model LAHET3, MCNPX, GEANT4 gibi HGS tasarımında ve nötron kaynaklı parçalanma reaksiyonlarına uygulandı [23].

Çizelge 3. 1. ABLA ve Dresner

Dresner	ABLA
n,p,d,t $^3\text{He}, ^4\text{He}$ Buharlaşıyor	n,p ve ^4He Buharlaşıyor
Coulomb bariyeri E ile azalıyor	Coulomb bariyeri gerçekçi
Seviye yoğunluk parametresi $a=A/8$	Seviye yoğunluk parametresi $a=A/12$

Çizelge 3. 2. Modellerin karşılaştırılması [14,23]

INC	Bertini	ISABEL	CEM	INCL4
INC	Bertini INC	ISABEL INC	Geliştirilmiş Dubno INC	Geliştirilmiş Cugnon INC
Ortam	Sürekli	Sürekli	Sürekli	Parçacık
Metod	INC+ EQ veya INC+PE+EQ	INC+ EQ veya INC+PE+EQ	INC+PE+EQ	INC+ EQ
Hedef çekirdek	Bütün çekirdekler	Bütün çekirdekler	Karbon ve ağır çekirdekler	
Gelen parçacık	p,n,pionlar	$A \leq 4$ +antiprotonlar	p,n,pionlar	proton, nötron, dötöron, triton, $^3\text{He}, ^4\text{He}, \pi^+, \pi^-, \pi^0$
En yüksek enerji	3,5GeV Çekirdek- Çekirdek için 2,5GeV Pion - Çekirdek için	1 GeV	5 GeV	2 GeV
En düşük enerji	20 MeV- 150 MeV	20 MeV- 150 MeV	100 MeV	0.2 GeV
Nükleer yoğunluk dağılımı	$P(r)=P_0[1+\exp\frac{[r-c]}{a}]^{-1}$	$P(r)=P_0[1+\exp\frac{[r-c]}{a}]^{-1}$	$P(r)=P_0[1+\exp\frac{[r-c]}{a}]^{-1}$	$P(r) = \begin{cases} \frac{P_0}{1 - \exp(\frac{r-R_0}{a})} & R < R_{mak} \\ 0 & R > R_{mak} \end{cases}$
Nükleon potansiyeli	$V_N=T_F+B_N$	T_N potansiyeline bağlı $V_N=V_I(1-T_N/T_{mak})$	$V_N=T_F+B_N$	
Pion potansiyeli	$V_N=V_\pi$	$V_\pi=0$	$V_\pi=25\text{MeV}$	
Nükleon bağlanma enerjisi	$BN=7\text{MeV}$	E_t+E_B nötronlar için $E_t+E_B+E_C$ protonlar için	$BN=7\text{MeV}$	
Nükleer yoğunluk dağılımı	3 bölge	16 bölge	7 bölge	Wood saxon yoğunluğu

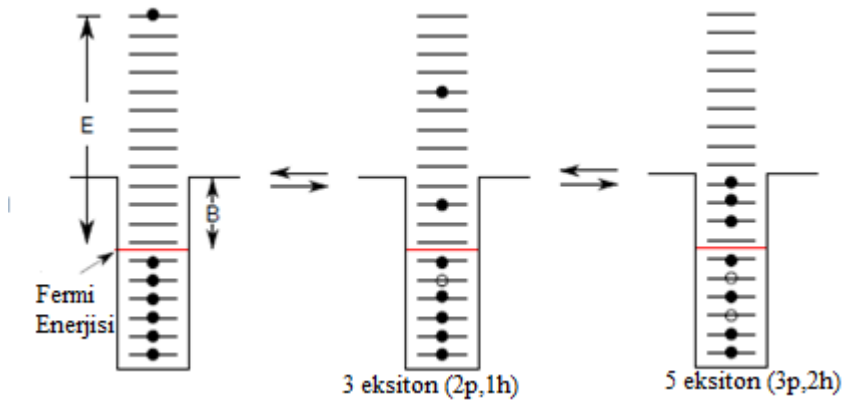
Çizelge 3.2. (Devam) Modellerin karşılaştırılması

Çarpışma kriteri	Ortalama serbest yol	Ortalama serbest yol		Minimum yaklaşma aralığı
Durma zamanı	Enerji	Enerji		Zaman
Pauli Dışarlama ilkesi	Katı	Katı		İstatistik

3.2. Denge Öncesi (Pre-Equilibrium) Model

Kaskade ve buharlaşma arasındaki ara durum denge öncesi olarak adlandırılır. Denge öncesi model yüksek enerji ile yayınlanan n, p, d, t, ^3He , ^4He gibi parçacıkların yayınlanması ile karakterize edilir. Denge öncesi modelde yayınlanan bu parçacıkların kinetik enerjisi buharlaşma aşamasında yayınlanan parçacıkların kinetik enerjisinden daha fazladır [23].

Bu model nükleer durumlar, uyarılmış parçacıklar ve deşiklerin sayıları ile karakterize edilir. Eksiton (exciton) modelde kaskade boyunca parçacık-deşik konfigürasyonunun seçili kuralları $\Delta p = 0, \mp 1$ $\Delta h = 0, \mp 1$ $\Delta n = 0, \mp 2$ şeklinde ifade edilir ve eksiton sayısı Eş. 3.19 ile hesaplanır.



Şekil 3. 2. Eksiton (Exciton) modelin şematik gösterimi

$$n=p+h \quad (3.19)$$

p parçacık sayısı, h hole (deşik) sayısıdır.

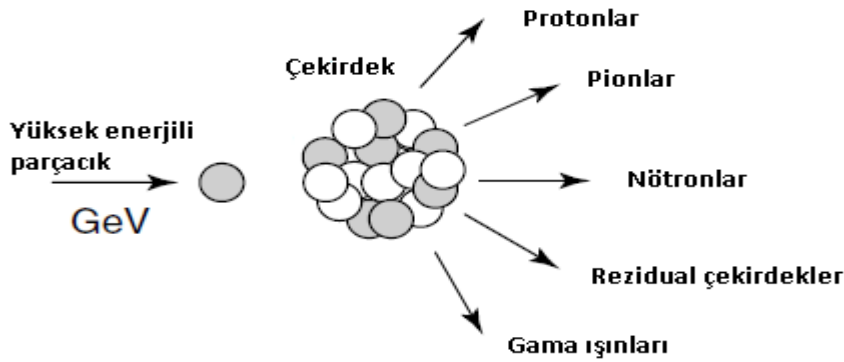
3.3. Buharlaşma (Evaporation) Model

Weisskopf tarafından geliştirilen bu model, INC'den sonra kalan uyarılmış çekirdekten parçacık yayımlanmasının istatistiksel modelidir. Yayınlanan parçacıkların açısal dağılımı izotropiktir. Buharlaşma modeli Dostrowski tarafından geliştirilmiştir. Uyarılmış çekirdekten yayınlanan parçacıklar çekirdeğin enerjisi belli bir sınır değerinin altına düşene kadar sayılır. Eğer hafif çekirdek uyarılmış ise Fermi break up model gerçekleşebilir. Buna ek olarak fisyon da oluşabilir. Buharlaşma modelinin ana zinciri $E_{\text{uyarıлма}}$ enerjisi $E_{\text{sınır}}=0.1 \text{ MeV}$ 'in altına düşene kadar takip edilir. Buharlaşma model gama yayılımı ile sona erer [19].

$$E_{\text{uyarıлма}} < E_{\text{sınır}} = 10^{-15} \text{ MeV} \quad (3.20)$$

4. REZİDUAL ÇEKİRDEKLER

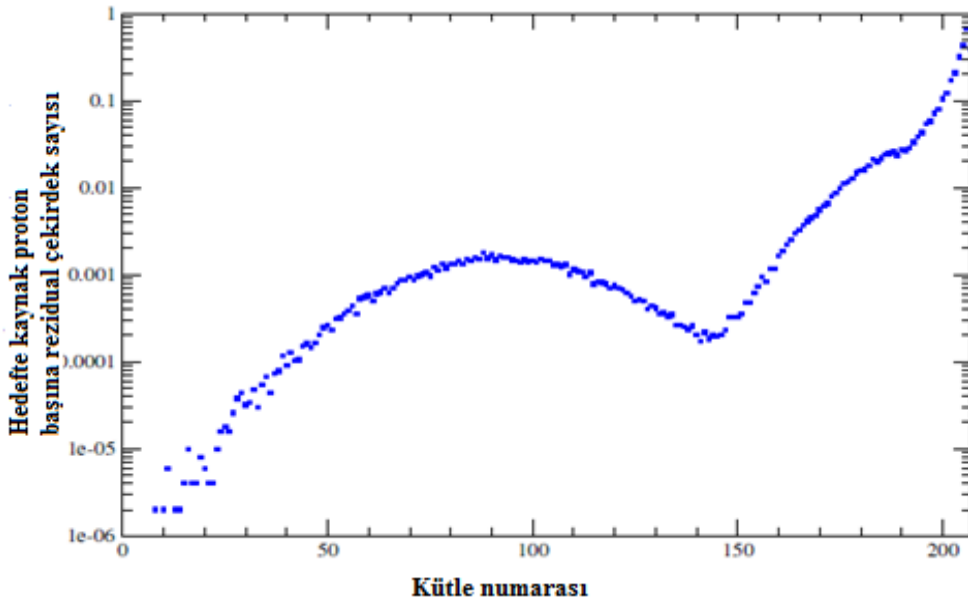
HGS’de zincirleme reaksiyonların oluşmasını sağlayan yüksek yoğunluğa sahip nötronlar parçalanma reaksiyonları sonucunda oluşur. Parçalanma reaksiyonları sonucunda sadece nötronlar üretilmez bunun yanında rezidual çekirdeklerde üretilir. Oluşan rezidual çekirdekler radyoaktif veya radyoaktif olmayan çekirdeklerdir [34]. Radyoaktif çekirdeklerin miktarının fazla olması nedeniyle hedef seçiminde aktivasyon problemleri düşünülmelidir. Çünkü rezidual çekirdeklerin radyoaktif olması hedefin korozyona uğraması, demet penceresi ve yapı materyallerinin zarar görmesine neden olabilir.



Şekil 4. 1. Yüksek enerjili parçacığın çekirdek üzerine gönderilmesi [22]

Yüksek enerjili parçacığın parçalanma hedefiyle etkileşimi sonucunda oluşan nükleer reaksiyonlarla parçacıklar üretilir. Bu parçacıklar etkileşme bölgesinden ayrılabilir, reaksiyonlara katılmaz veya kaskade aşamasında reaksiyonlara katılabilirler. Reaksiyonun başlamasına katkıda bulunan nükleonlara birincil nükleon, reaksiyon sonucu oluşan nükleonlara ise ikincil nükleonlar denir. Birincil ve ikincil nükleon-nükleon etkileşimleri ve INC aşamalarında çekirdekler uyarılır. Bu etkileşimler sonucu uyarılmış çekirdekler; uyarılmış durumdan taban duruma buharlaşma ve foton yayılımı yoluyla geçer, bu aşamaların sonucunda oluşan çekirdeklere ise “rezidual çekirdekler” denir [35]. Parçalanma reaksiyonlarında üretilen rezidual çekirdeklerin belirlenmesi iki şekilde yapılmaktadır. Bunlardan biri direkt kinematik, diğeri ise ters kinematik yöntemidir. Direkt kinematik yöntemde; hafif ve enerjisi

yüksek parçacık hızlandırılarak ağır hedefe gönderilirken, ters kinematik yöntemde ise ağır çekirdek hızlandırılarak hafif hedefe gönderilir. Direkt kinematikle yapılan deneyler araştırıldığında; sonuçlar, hedef çekirdeğin kütlesine yakın rezidual çekirdeklerin daha düşük enerjili reaksiyonlarda oluştuğunu gösterir. Avrupa'da iki önemli kuruluş olan Hanover üniversitesindeki R.Michel grubu ve Moskova'daki ITEP'de Y.E. Titarenko bu metodu kullanmaktadır [36].



Şekil 4. 2. 800 MeV p + Pb reaksiyonu sonucu oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı [3]

Şekil 4.2'de 800 MeV enerjili proton, kurşun hedef üzerine gönderildikten sonra nükleer reaksiyon sonucu oluşan rezidual çekirdeklerin kütle numarası ve proton başına oluşan rezidual çekirdek sayısı grafiği verilmiştir. Şekil 4.2'de;

1. Kütlesi hedef çekirdeğin kütlesine yakın rezidual çekirdekler, parçalanma reaksiyonundan doğrudan gelen çekirdekler;
2. Kütlesi 100'e yakın olan rezidual çekirdekler, fisyon reaksiyonu sonucu oluşan rezidual çekirdekler,
3. Kütle numarası daha küçük olan rezidual çekirdekler ise, kaskade aşaması sırasında çekirdekten ayrılan veya buharlaşma sonucu oluşan çekirdeklerdir [7].
4. Buharlaşma ürünleri; protonlar ve nötronlar gibi hadronların ve çekirdeğin

dengeye gelme sürecinde uyarılmış çekirdekten yayınlanan hafif çekirdeklerin bulunduğu sınıftır.

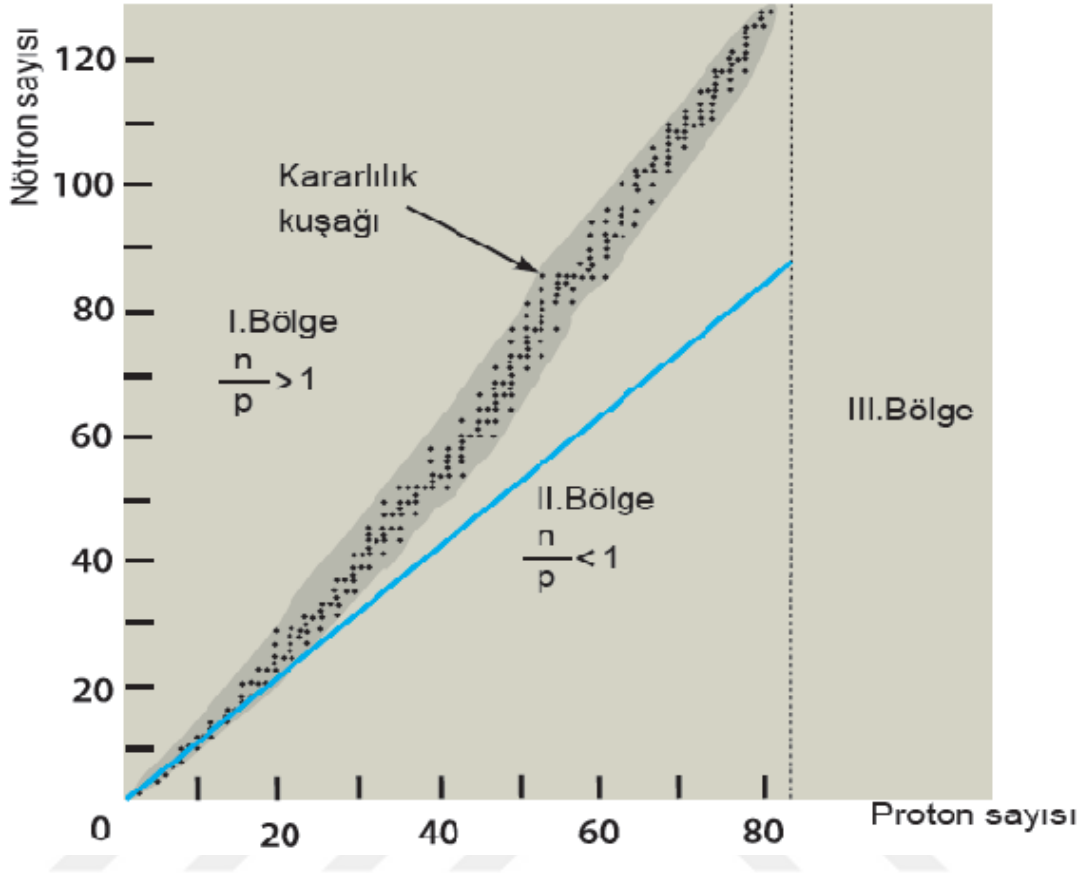
5. Parçalanma ürünleri, bütün parçacık yayılımı (de-excitation) sürecinde buharlaşma ile sürekli rekabet eden parçalanma işlemi, orta kütle sırasındaki ürünlerin oluşumuna yol açar. ($A < 1/3 A_{\text{hedef}}$)
6. Filyon ürünleri; filyon sonucu oluşan rezidual çekirdekler orta kütle aralığında yer alır ve simetrik bir dağılıma sahiptir.
7. Parçalanma ürünleri; yüzeysel çarpışmalara ya da hedef çekirdekteki merkezi çarpışmalara bağılı olarak oluşur. (kütle kaybı $A > 30$)
8. Yarı-elastik ürünler, doğrudan çarpışma tepkimeleri, protonun nötron yerine geçtiği, hedefin protonu ve nötronu arasındaki yarı-elastik çarpışma ile oluşur. Aynı zamanda hedef çekirdekten daha ağır çekirdeğe yol açabilecek yakalama reaksiyonları vardır [37].

4.1. Rezidual Çekirdeklerde Aktiflik Hesabı

Rezidual çekirdeklerin oluşumunun hesaplanmasına, reaksiyonlar sonucu oluşan radyoaktif elementlerin ne miktarda oluştuğu, kullanılan materyallere ne derece zarar verdiğini tahmin etmek için ihtiyaç duyarız. Bu yapı materyalleri; demet borusu, demet penceresi ve diğer yapı materyalleridir. Hesaplamalarda kullanılan hedef seçimi de bu yüzden önemlidir.

4.1.1. Radyoaktiflik

Radyoaktiflik 1896 yılında Fransız fizikçi Henri Becquerel tarafından keşfedildi. Daha sonra Maria Curie uranyum gibi ışınlar yayan toryum çekirdeğini keşfetti ve böylece radyoaktifliği ileri sürdü. 1903 yılında Maria Curie, kocası Pierre Curie ve Henri Becquerel radyoaktiflikle ilgili çalışmalarından dolayı Nobel ödülü almaya hak kazandılar.



Şekil 4. 3. Kararlılık kuşağı

Şekil 4.3’de radyoaktif ve radyoaktif olmayan çekirdeklerin çizelgesi verilmiştir. Radyoaktif çekirdekler, proton ve nötron sayıları uygun değere yani taban duruma gelene kadar farklı tanecikler ve elektromanyetik ışınlar yayınlamaktadır [38].

Bir t zamanında N radyoaktif çekirdek varsa ve bu çekirdeğe yeni çekirdekler eklenmiyorsa dt süresince bozulan dN çekirdek sayısı, N ile orantılı olarak değişir. Eş. 4.1’de λ bozunma sabitidir.

$$\lambda = - (dN/dt)/N \quad (4.1)$$

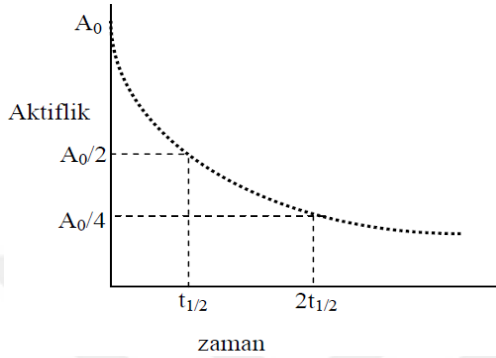
Eş. 4.1’in integrali alınarak Eş. 4.2 elde edilir ve bu üstel radyoaktif bozunma kanunudur. $t = 0$ alındığında henüz bozunmamış çekirdek sayısı bulunur ve N_0 integrasyon sabitidir. $t_{1/2}$ çekirdeklerin yarı ömrüdür.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.2)$$

$$t_{1/2} = 0,693/\lambda \quad (4.3)$$

Birim zamanda bozunan çekirdek sayısına aktiflik denir ve birimi Curie (Ci)'dir ve 1 Ci $3,7 \times 10^{10}$ bozunma/saniye'dir.

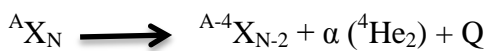
$$\lambda \cdot N = A \quad A: \text{aktiflik} \quad (4.4)$$



Şekil 4. 4. Aktifliğin üstel değişimi [20]

Δt kısa zaman aralığında, bir numunenin aktifliği bozunmaları ard arda sayarak zamanın fonksiyonu olarak ölçülebilir. Bu ölçme yöntemi çok kısa ve çok uzun yarı ömürlere sahip çekirdekler için yararlı değildir. Çünkü yarı ömrü uzun çekirdeklerde belirlenebilmesi için belirlenen zaman aralıkları uzun olmalıdır. Kısa yarı ömre sahip çekirdeklerde ise alınan zaman aralığında bozunma gözlenmeden aktiflik biter [39].

Radyoaktiflik, atom çekirdeğinin, tanecikler veya elektromanyetik ışınlar yayarak kendiliğinden parçalanmasıdır. Aktiflik hesabıyla yayınlanan radyasyonun türü veya enerjileri hakkında bilgi sahibi olamayız fakat çekirdeğin saniyedeki parçalanma sayısını bulabiliriz [39]. Radyoaktif çekirdeklerin yayınladığı parçacıklardan biri alfa parçacıklarıdır. Bu çekirdekler alfa yayınladıklarında aslında 2 nötron ve 2 proton yayınladıkları. Bu da helyum çekirdeğidir. Çünkü Helyum çekirdeği 2 nötron ve 2 protona sahiptir. Çekirdekler alfa yayınladıklarında 2 nötron ve 2 protonu azalır. Böylece çekirdeğin kütle numarası 4 azalmış olur ve farklı bir çekirdeğe dönüşür [38].



Aktiflik hesabında kullanılan birimler:

Gram – atom: Bir atomun gram türünden miktarına gram-atom (1 mol atom) denir.

Mol: Avagadro sayısı ($N_A=6,02.10^{23}$) kadar atom ya da molekül içeren maddeye 1 mol denir.

Coulomb: 1 saniyede 1 amper akım tarafından gönderilen yük miktarına eşit elektrik yük birimine denir [23].

4.1.2. Alfa aktifliğinin hesaplanması

λ : Bir çekirdeğin birim zamanda bozunma ihtimali (s^{-1})

N: Bir t anında henüz bozunmamış çekirdek sayısı

$-dN/dt$: Birim zamanda bozunan olmak üzere

N_0 : Bozunmadan kalan çekirdek sayısı

$t_{1/2}$: Çekirdeğin yarı ömrü

$$\lambda = \frac{(-dN/dt)}{N} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (4.5)$$

$$A_\alpha = \lambda \cdot K_\alpha \cdot PR_0 \quad (4.6)$$

A_α alfa aktifliği (Becquerel/Coulomb), K_α : alfa dallanma oranı (%), PR_0 : üretilme oranı (Atom/Coulomb)'dır.

1 Amper: 1Coulomb/saniye, 1 proton: 1.60219×10^{-19} Coulomb'dur.

5. MCNPX MONTE CARLO YÖNTEMİ

Monte Carlo yöntemi, istatistik teknikler kullanarak bir deneyi veya olayı sayısal olarak taklit etmektir. Bu yöntem, özellikle 1930'lardan sonra hızla gelişmeye başlamıştır. Los Alamos laboratuvarında nükleer silah geliştirilmesi projesinde çalışan bilim adamları tarafından ortaya atılmıştır. Bu bilim adamları arasında, Von Neumann, Fermi, Ulam ve Metropolis gibi isimleri sayabiliriz. Hatta "Monte Carlo kelimesinin" Von Neumann ve Ulam'ın kullandıkları matematiksel tekniğe koydukları şifreli ad olduğu söylenir. Bu metotlar olasılık teorisine tabidir. Metodun bir probleme uygulanması, problemin tesadüfi sayıları kullanılarak defalarca simüle (simulation) edilip, hesap edilmek istenen parametrelerin bu simülasyonların sonuçlarına bakılarak yaklaşık olarak hesaplanması fikrine dayanır. Günümüzde Monte Carlo metotları, nümerik integrasyon, stokastik optimizasyon, sistem analizi, kısmi differansiyel denklemler, integral denklemler, ekonomik modelleme ve matematiksel finans, kuantum mekaniği, istatistiksel fizik, nükleer ve katıhal fiziği ve sosyal bilimler dallarında kullanılmaktadır [2,3,4].

Monte Carlo N-Parçacık iletim kodu (MCNPX), LAHET VE MCNP programlarının birleştirilmesiyle oluşan genişletilmiş bir bilgisayar programıdır. MCNPX yüksek enerjili parçacığın bir çekirdeğe çarpmasıyla meydana gelen olayların tanımlandığı bir programdır fakat MCNP düşük enerjiler için bir nükleer iletim kodudur.

LAHET kodunda parçacığın iletimi, kod içindeki farklı teorik fizik modelleriyle yapılır. MCNPX'te ENDF/B, JEF, JENDL gibi nükleer bilgi içeren kütüphaneler kullanılmaktadır. Eğer bu kütüphanelerde istenilen veriler bulunuyorsa kullanılır fakat bulunmuyorsa o zaman fiziksel modeller kullanılır [40].

LAHET ve MCNP bilgisayar programlarının birleştirilmesiyle oluşan MCNPX Monte Carlo Transport kodunun çalışma prensibi; programda bulunan fizik simülasyon modellerinin kullanılarak etkileşme olasılıklarının hesaplanmasını temel almaktadır [41]. Bu çalışmada MCNPX kodu kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. INC model gelen parçacık ile hedef arasındaki çarpışmayı modellemek için kullanılır. Uygun tesir kesitleri kullanarak çarpışmadan sonra parçacıkların doğrultusu ve enerjisi tanımlanır [15]. Burada ortaya çıkan parçacıklar bir sonraki

etkileşmeye kadar takip edilir. Metod parçacıkların sistemi terk etmeden önceki durumda meydana getirdiği ve sistem geometrisinin herhangi bir yerinde meydana gelen yutulma, kaçma, parçalanma ve fisyon gibi çeşitli etkileşimler sonucunda birbirini izleyen her parçacığın izlenmesinden oluşur [42]. Modelde rezidual çekirdeklerin bağlanma ve uyarılma enerjileri de hesaplanabilir çünkü parçacıkların tümü hesaba katılmıştır [15].



6. HESAPLAMALAR

Hızlandırıcı güdümlü sistem parçacıkları hızlandırarak hedefe gönderen hızlandırıcı, hızlandırıcıdan gelen protonlarla nükleer reaksiyonu sonucunda nötron oluşmasını sağlayan hedef, reaksiyonlar sonucu oluşan ısıyı almak için soğutucu ve nötron kaçağını azaltan yansıtıcıdan oluşur. Hızlandırıcıdan gelen protonlarla hedefin etkileşimi sonucu oluşan nükleer reaksiyonlar sonucunda çok sayıda nötron ve radyoaktif veya radyoaktif olmayan rezidual çekirdekler oluşur.

Bu çalışmada hedefde, demet penceresinde ve demet borusunda oluşan rezidual çekirdekleri belirlemek için atık ve yakıt olmadan sadece Pb hedef ve Pb-Bi hedefin bulunduğu HGS tasarlanarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar MCNPX programıyla yapılmıştır. Sisteme ait şekiller, MCNPX programı ile uyumlu çalışan bir görüntü arayüzü programı olan MCNPX Visual Editör ile çizilmiştir.

MCNPX programında elde edilen rezidual çekirdeklerin sayısının birimi weight/proton'dur. Aktiflik hesaplamalarında kullanılan birim normalize edilerek gr.atom/saniye birimine çevrilerek kullanılmıştır.

$$\text{Weight/proton} = \text{gr.atom/proton}$$

$$1 \text{ Amper} = 1 \text{ Coulomb/saniye}$$

$$(1 \text{ C/1s}) \cdot (1 \text{ proton} / 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) = 1 \text{ Amper}$$

$$\text{gr.atom/proton} = 10^{-3} \text{ proton} / 1,602 \times 10^{-19} \text{ saniye} = (1 / 1,602 \times 10^{-16}) \text{ gr.atom/saniye}$$

6.1. Demet Yolu ve Demet Penceresi

Hızlandırıcıdan gelen yüksek enerjili parçacıkları hedefe gönderen demet yolu 5 cm yarıçaplı ve 0.3 cm kalınlıktaki paslanmaz çelikten (HT9) yapılan silindirik borudur. Demet penceresi ise 5 cm yarıçaplı 0.3 cm kalınlıkta paslanmaz çelikten yapılan yarı küresel bir yapıdır.

6.2. Hedef

Hızlandırıcıdan gelen parçacıklarla nükleer reaksiyonu sonucu nötron oluşumunu sağlayan hedef olarak yüksekliği 376 cm, yarıçapı 188 cm ve yapı materyali paslanmaz çelik olan silindir kapta bulunan Pb-Bi sıvı ile yüksekliği 70 cm, yarıçapı 20 cm olan Pb katı hedef kullanılmıştır.

6.3. Soğutucu

Bu çalışmada hedef olarak kullanılan Pb-Bi sıvı aynı zamanda soğutucu görevi görmektedir. Diğer hedef olan Pb katı hedefinde soğutucu kullanılmamıştır.

6.4. Yansıtıcı

Sistemde nötron kaçağını azaltmak için kullanılan yansıtıcı olarak yüksekliği 180 cm, kalınlığı 40 cm ve yapı materyali karbon olan silindir kullanılmıştır.

6.5. Dış Kap

Yapı materyali olarak paslanmaz çeliğin kullanılmasının sebebi sistemdeki radyasyonun dış bölgeye kaçmasını önlemektir. Radyasyona, ısıya dayanıklılığı iyi olduğundan paslanmaz çelik dış kap olarak kullanılır. Çizelge 6.1'de HT9'un bileşenleri verilmiştir.

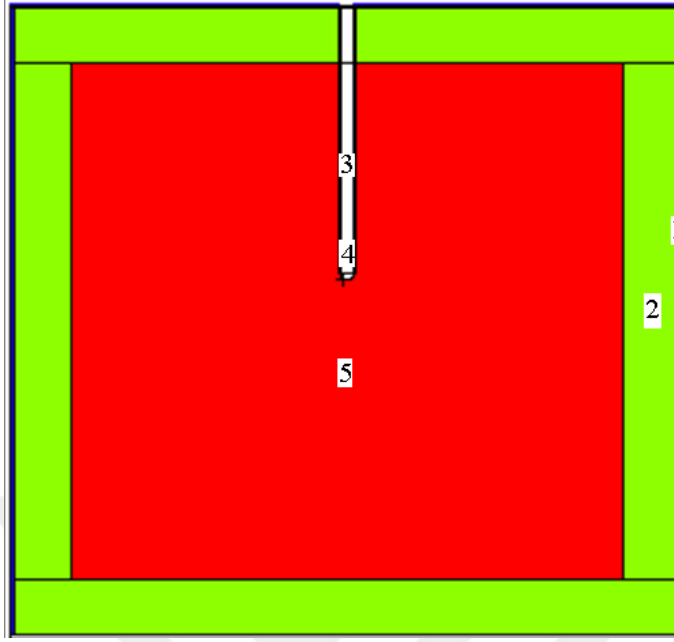
Çizelge 6. 1. HT9'u oluşturan izotoplar ve kütle oranları

HT9 izotopları	Kütle (%)	HT9 izotopları	Kütle (%)
C	0,0019	Fe-58	0,002389
Al	0,002	Ni-58	0,003404
Si	0,002	Ni-60	0,001311
P	0,0001	Ni-61	0,000057
S	0,000019	Ni-62	0,000181
V	0,003	Ni-64	0,000046
Cr-50	0,005002	Cu-63	0,000276
Cr-52	0,096358	Cu-65	0,000123
Cr-53	0,010925	Mo-29	0,01
Cr-54	0,002714	W-182	0,001324
Mn	0,004	W-183	0,000715
Fe-54	0,049922	W-184	0,001532
Fe-56	0,782976	W-186	0,001421
Fe-57		0,018091	

Çizelge 6. 2. Sistem Geometrisi [53]

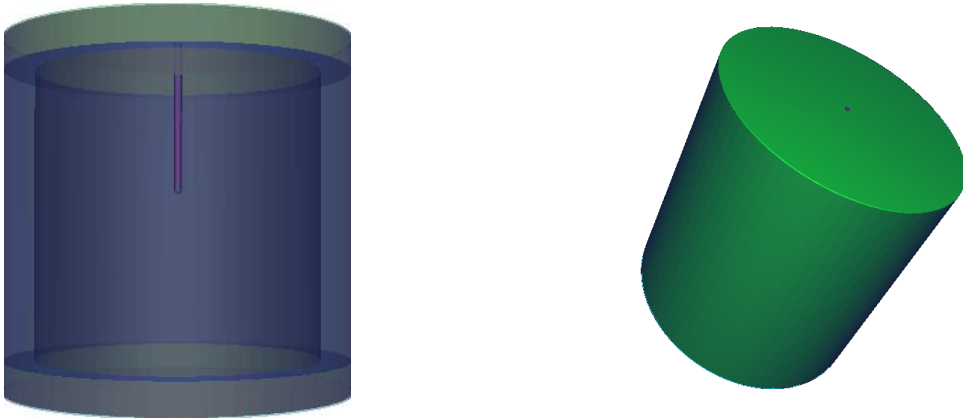
SİSTEM GEOMETRİSİ		
MODELLER	MODEL 1	MODEL 2
PARAMETRELER	DEĞERLER	DEĞERLER
Hedef	Pb-Bi	Pb
Soğutucu	Pb-Bi	
Hedef		
Hedef şekli	Silindir	Silindir
Hedef yarıçapı (cm)	188	20
Hedef boyu (cm)	376	70
Hedef yapısı	Pb-Bi ötektik sıvı	Doğal kurşun
Yoğunluk (g/cm ³)	10,4776	11,4
Demet Penceresi		
Pencere geometrisi	Yarı küresel	Yarı küresel
Pencere iç yarıçapı (cm)	5	5
Pencere dış yarıçapı (cm)	5.3	5.3
Yapı materyali	Paslanmaz çelik (HT9)	Paslanmaz çelik (HT9)
Proton Demeti		
Demet akımı (mA)	1	1
Demet enerjisi (GeV)	1	1
Demet yarıçapı (cm)	3	3
Yansıtıcı		
Reflektör geometrisi	Silindir	
Reflektör kalınlığı (cm)	40	
Reflektör yüksekliği (cm)	180	
Reflektör materyali	Karbon (Grafit)	
Dış Kap		
Zırh kalınlığı (cm)	2	
Yapı materyali	Paslanmaz çelik (HT9)	

Şekil 6.1’de Pb-Bi hedefin kullanıldığı HGS’de yapı materyali paslanmaz çelik (HT9), yansıtıcı olarak kullanılan karbon ve demet borusu ile demet penceresinin görünümünden bir kesit verilmiştir. Şekil 6.2’de ise Pb-Bi hedefin saydam ve opak görünümü verilmiştir.



Şekil 6. 1. Pb-Bi hedef kullanılan HGS'ye ait bir kesit

1. Dış kap (Zırh), 2. Yansıtıcı, 3. Demet borusu, 4. Demet penceresi, 5. Kor

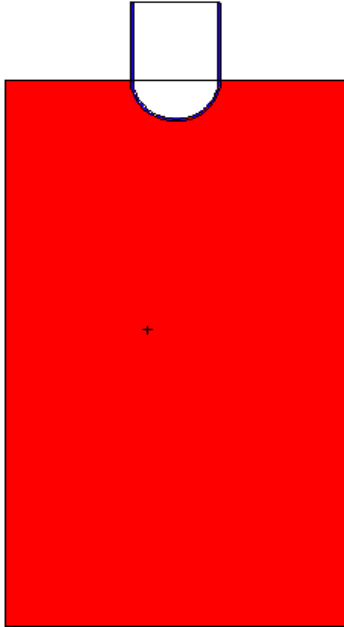


Şekil 6. 2. Pb-Bi hedef kullanılarak HGS'nin üç boyutlu saydam ve opak görünümü

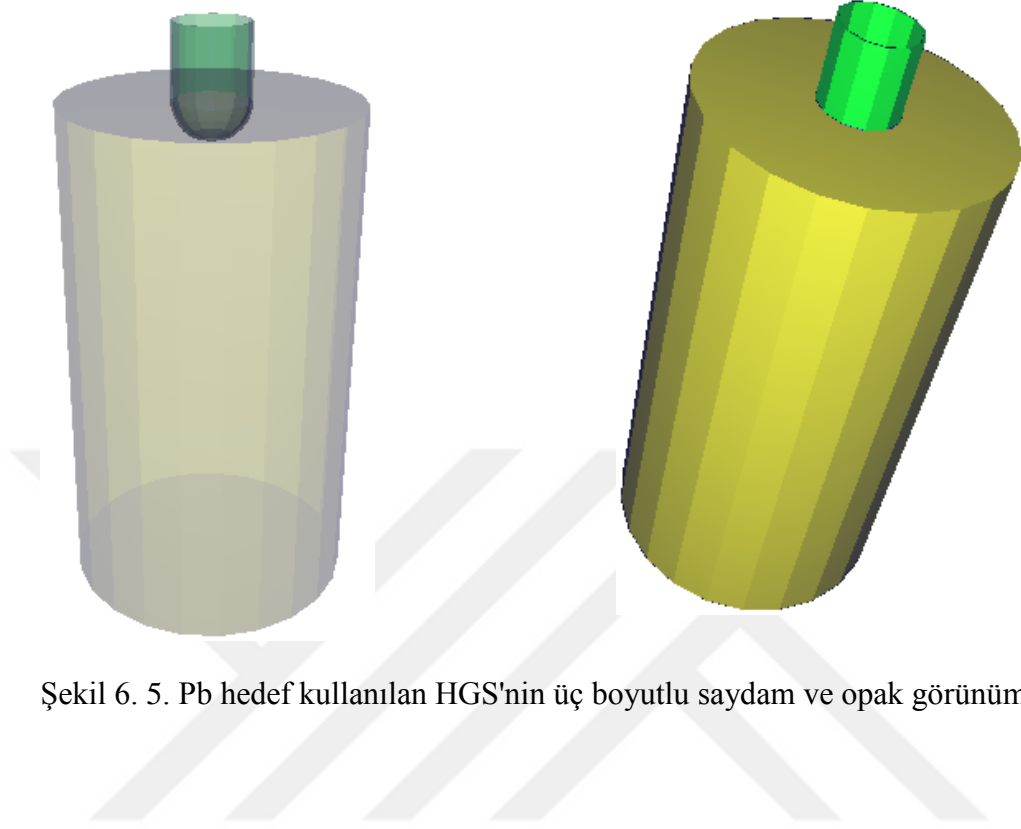
Şekil 6.3’de Pb-Bi hedef kullanılan HGS’de demet penceresinin görünümü verilmiştir. Şekil 6.4. ve Şekil 6.5’de Pb hedef kullanılan HGS’den bir kesit ile Pb hedefin saydam ve opak görünümü verilmiştir.



Şekil 6. 3. Pb-Bi hedef için üç boyutlu demet penceresi

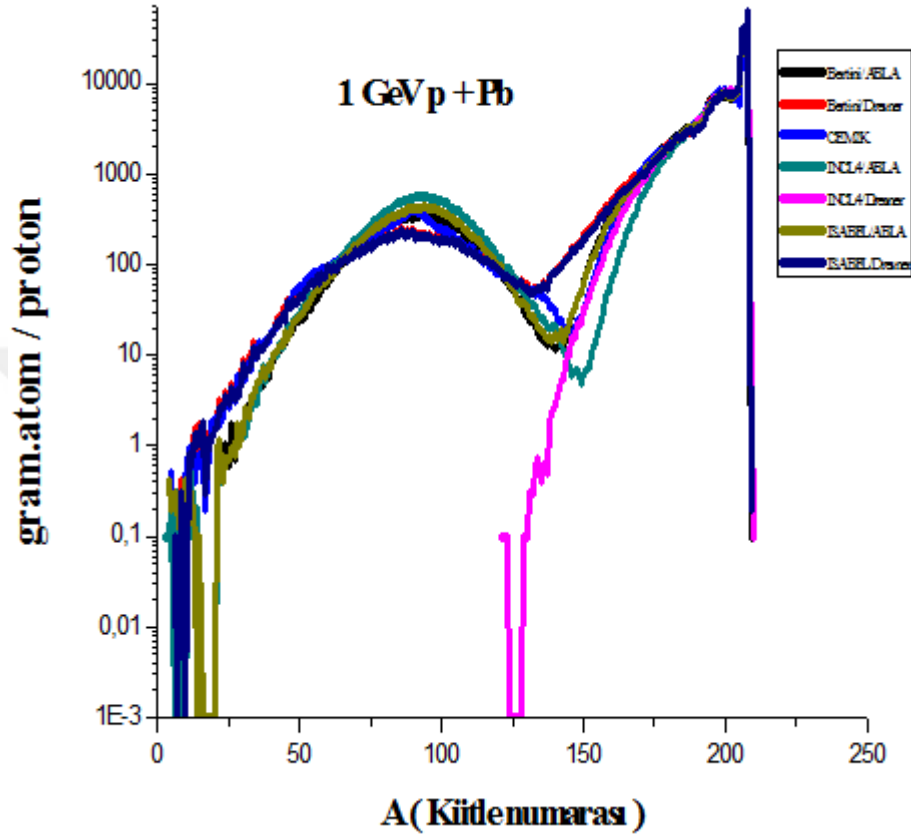


Şekil 6. 4. Pb hedef kullanılan HGS'ye ait bir kesit



Şekil 6. 5. Pb hedef kullanılan HGS'nin üç boyutlu saydam ve opak görünümü

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER



Şekil 6. 6. Pb hedefte nükleer reaksiyonlar sonucunda oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

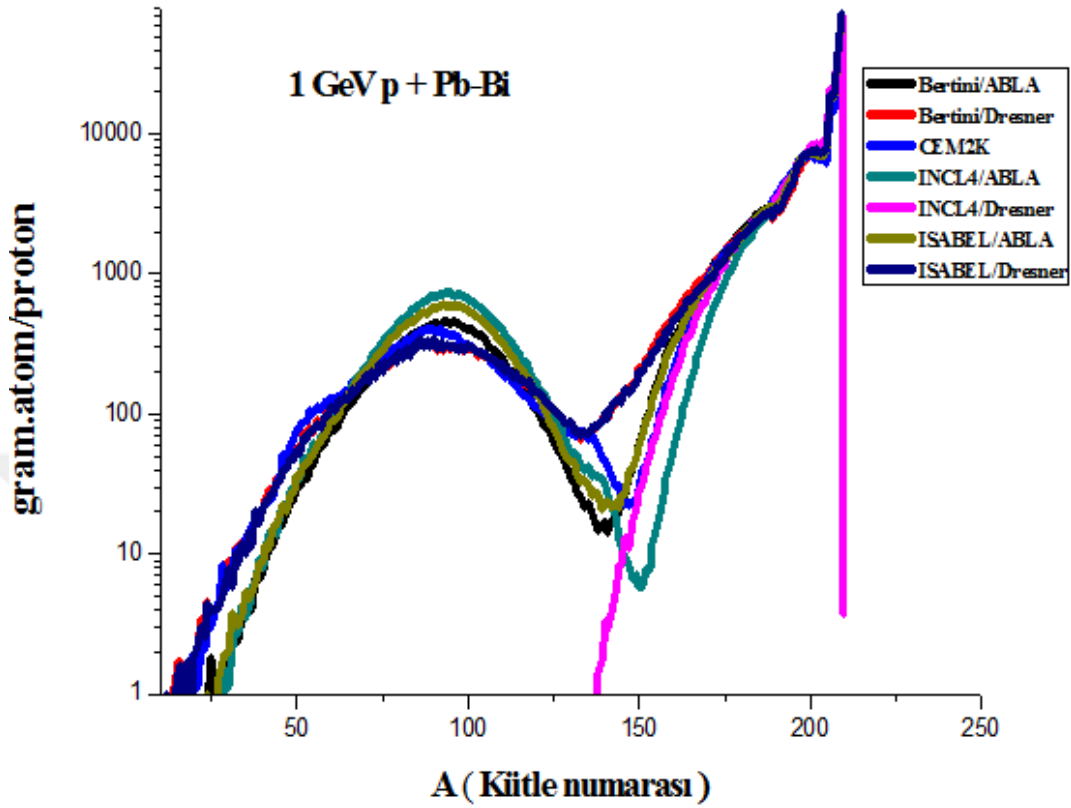
1 GeV enerjili protonun kurşun hedef üzerine gönderilmesiyle nükleer reaksiyonları sonucunda oluşan rezidual çekirdekler 7 farklı modele göre hesaplanmıştır ve ortaya çıkan rezidual çekirdeklerin kütle numaralarının gelen proton başına gram.atom miktarı grafiği Şekil 6.6'da verilmiştir. Kullanılan modeller sırasıyla Bertini/ABLA, Bertini/Dresner, CEM2K, INCL4/ABLA, INCL4/Dresner, ISABEL/ABLA, ISABEL/Dresner modelleridir. Bu modellere göre oluşan rezidual çekirdeklerin proton başına gram.atom miktarı en düşük (CEM2K) ve en yüksek (ISABEL/ABLA) değer arasında % 6,14 kadar değişmektedir.

Çizelge 6. 3. 1 GeV p + Pb reaksiyonunda oluşan rezidual çekirdeklerin modellere göre birim kütle ve kaynak proton başına toplam miktarları

Pb hedef (Birim kütle başına gram.atom/proton)	
Bertini/Abla	2,918E-06
Bertini/Dresner	2,911E-06
Cem2k	2,810E-06
İnc14/Abla	2,953E-06
incl4/Dresner	2,842E-06
İsabel/Abla	2,983E-06
İsabel/Dresner	2,957E-06

Çizelge 6.3. modeller göre oluşan rezidual çekirdeklerin toplam değerleri arasında karşılaştırma yapıldığında Bertini/ABLA modeli, Bertini/Dresner modelinden % 0,247 daha büyük; INCL4/ABLA modeli, INCL4/Dresner modelinden % 3,875 ve ISABEL/ABLA modeli, ISABEL/Dresner modelinden % 0,874 daha büyük olduğu görülmektedir. Bu üç karşılaştırma arasında ise en büyük farkın INCL4/ABLA ve INCL4/Dresner arasında olduğu görülmektedir.

Bertini/ABLA, Bertini/Dresner, CEM2K ve INCL4/ABLA, INCL4/Dresner, ISABEL/ABLA ve ISABEL/Dresner modelleriyle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımlarını daha ayrıntılı görülebilmesi için her bir model için grafikler Şekil 6.13.-6.19'a kadar sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6. 7. Pb-Bi hedef reaksiyonu sonucunda oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

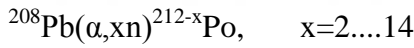
Şekil 6.7.'de yedi modele göre hesaplanan proton başına rezidual çekirdeklerin gram.atom miktarı en düşük (CEM2K) ve en yüksek (ISABEL/ABLA) değeri arasında % 8,76 kadar değişmektedir. Modellere göre oluşan rezidual çekirdeklerin birim kütle ve kaynak proton başına toplam değerleri Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6. 4. 1 GeV p + Pb-Bi nükleer reaksiyonunda oluşan rezidual çekirdeklerin modellere göre birim kütle ve kaynak proton başına toplam miktarları

Pb-Bi Hedef (Birim kütle başına gram.atom/proton)	
Bertini/Abla	6,782E-04
Bertini/Dresner	6,773E-04
Cem2k	6,460E-04
İnc14/Abla	7,053E-04
inc14/Dresner	6,730E-04
İsabel/Abla	7,027E-04
İsabel/Dresner	6,955E-04

Çizelge 6.4'teki modellere göre oluşan rezidual çekirdeklerin toplam değerleri arasında karşılaştırma yapıldığında; Bertini/ABLA modelin Bertini/Dresner modelden % 0,14 daha büyük, INCL4/ABLA modelin INCL4/Dresner modelden % 4,80 ve ISABEL/ABLA modelin ISABEL/Dresner modelden % 1,029 daha büyük olduğu görülmektedir. Bu üç karşılaştırma arasında en büyük fark INCL4/ABLA ile INCL4/Dresner modelleri arasındadır.

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 grafiklerini karşılaştırdığımızda hemen hemen aynı grafiği elde ettiğimizi görürüz. Pb ve Pb-Bi hedeflere 1 GeV enerjili protonun gönderilmesiyle oluşan rezidual çekirdekleri incelediğimizde iki hedefte de ^{208}Po , ^{209}Po , ^{210}Po gibi çekirdeklerin oluştuğu görülmektedir. Bu çekirdeklerin alfa aktiflikleri hesaplandığında (Çizelge 6.5. ve Çizelge 6.6.) Pb-Bi hedefte Po çekirdeklerinin değerlerin daha fazla olduğu görülmektedir.



Bu reaksiyonlarda üretilen ^{210}Po , ^{209}Po , ^{208}Po alfa yayıcısıdır ve yarı ömürleri sırasıyla 138.4 gün, 102 yıl, 2,9 yıldır.

Polonyum hakkında elde edilen sonuçlar, hızlandırıcı güdümlü sistemlerde kurşun–bizmut hedefte Polonyum tarafından üretilen aktifliğin hesaplanması için önemlidir [42]. ^{210}Po oldukça kısa ömürlü α yayınlayıcısı ve oldukça uçucudur. Bu iki özellik Polonyumu oldukça tehlikeli yapmaktadır [7,23,43].

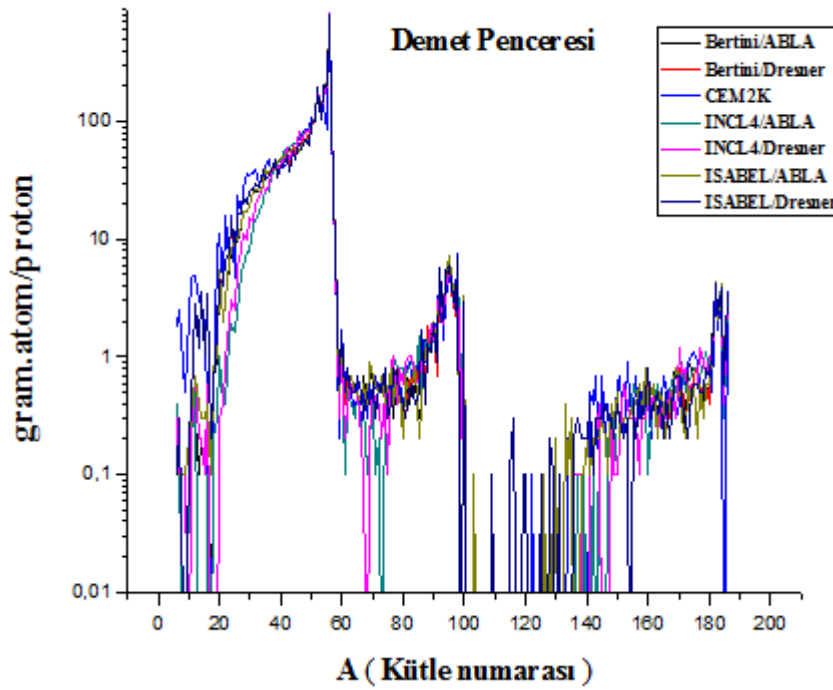
Çizelge 6. 5. Pb hedefte oluşan bazı rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri

Pb	Z	N	A	Çekirdek	Yarı ömür	Aktiflik (Becquerel/Coulomb)					
						Bertini/ABLA	Bertini/Dresner	CEM2k	INCL4/ABLA	INCL4/Dresner	ISABEL/ABLA
61	84	145	Pm	17,7 y(ε)	2,389E-11	2,389E-46	5,865E-11	3,693E-11	1,303E-11	1,520E-11	2,259E-10
62	84	146	Sm	103 My(alfa)	2,400E-10	2,826E-45	2,533E-10	2,000E-10	2,666E-10	2,133E-10	2,653E-09
64	84	148	Gd	74,6y(alfa)	1,472E-02	1,445E-37	6,626E-03	3,313E-03	2,043E-02	1,528E-02	1,336E-01
64	86	150	Gd	1,8 My(alfa)	4,043E-08	3,890E-43	2,441E-08	8,391E-09	6,103E-08	3,585E-08	3,547E-07
66	88	154	Dy	3 My(alfa)	8,422E-08	4,852E-43	4,714E-08	1,053E-08	1,250E-07	7,827E-08	4,458E-07
84	124	208	Po	2,898y(alfa)	0,000E+00	0,000E+00	2,369E-02	9,002E-02	5,212E-02	4,738E-03	4,738E-03
84	125	209	Po	102y(alfa)	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,019E-04	0,000E+00	0,000E+00
84	126	210	Po	138,4 gün(alfa)	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	9,921E-05	0,000E+00	0,000E+00

Çizelge 6. 6. Pb-Bi hedefte oluşan bazı rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri

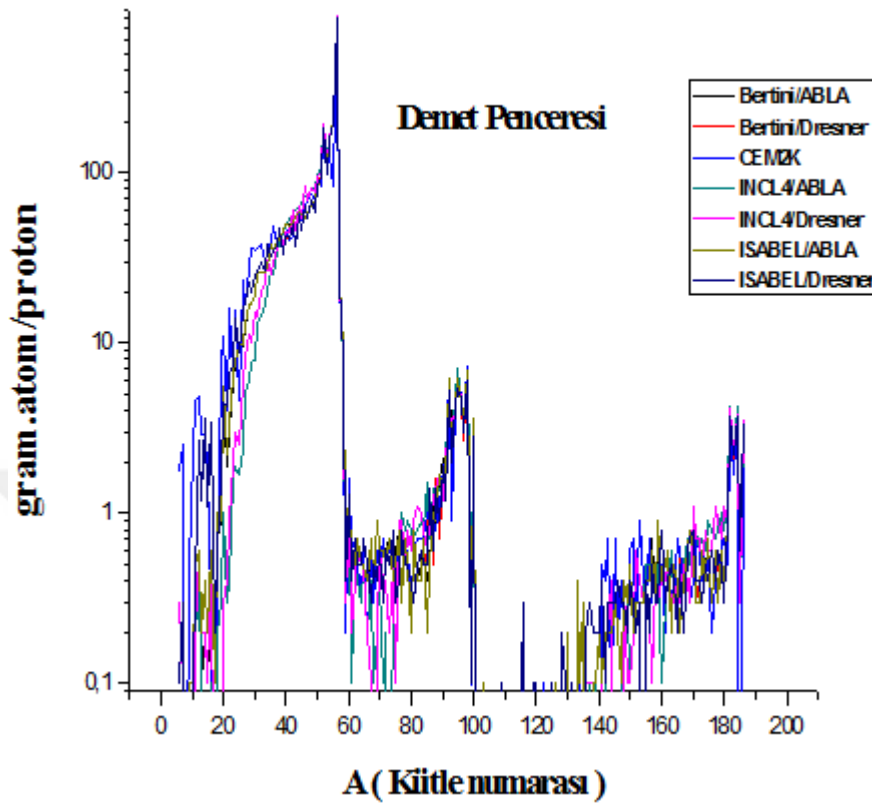
Pb-Bi			Aktiflik (Becquerel/Coulomb)								
Z	N	A	Çekirdek	Yarı ömür	Bertini/ABLA	Bertini/Dresner	CEM2k	INCL4/ABLA	INCL4/Dresner	ISABEL/ABLA	ISABEL/Dresner
66	88	154	Dy	3 My(alfa)	4,963E-14	5,857E-13	2,035E-13	1,390E-13	4,963E-14	8,438E-14	5,559E-13
71	102	173	Lu	1,37 y(ε)	4,874E-13	6,549E-12	1,218E-12	8,225E-13	4,569E-13	9,138E-13	6,214E-12
80	114	194	Hg	520 y(ε)	3,785E-05	3,091E-04	1,472E-05	5,888E-06	3,869E-05	3,491E-05	2,826E-04
81	123	204	Tl	3,77 y (β-)	6,972E-11	8,837E-10	2,963E-11	2,440E-11	1,063E-10	6,275E-11	8,227E-10
82	120	202	Pb	0,05 My (ε)	1,956E-10	1,150E-09	7,844E-11	1,464E-11	2,405E-10	1,820E-10	1,051E-09
84	124	208	Po	2,898y(alfa)	2,589E-02	3,132E-02	3,142E-02	2,946E-02	3,525E-02	3,752E-02	4,354E-02
84	125	209	Po	102y(alfa)	1,329E-04	1,411E-04	6,031E-04	5,017E-04	5,379E-04	2,697E-04	2,878E-04
84	126	210	Po	138,4gün(alfa)	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,317E-03	2,731E-03	0,000E+00	0,000E+00

Çizelgelerdeki değerler karşılaştırıldığında; iki hedefte ^{208}Po ve ^{209}Po oluştuğu görülmektedir. Modellerin birbirleriyle uyumlu olmadığı görülmektedir ve Pb-Bi hedefteki değerler Pb hedeftekiyle kıyaslandığında daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 8. 1 GeV p + Pb hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet penceresinde oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

Demet penceresinde oluşan rezidual çekirdekler Şekil 6.8'de görülmektedir.



Şekil 6. 9. 1 GeV p + Pb-Bi hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet penceresinde oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

1 GeV enerjili proton Pb-Bi hedef üzerine gönderilmesiyle demet penceresinde oluşan rezidual çekirdeklerin grafiği 7 modelle çizilmiştir. Şekil 6.8 ile Şekil 6.9 karşılaştırıldığında aynı grafiğin elde edildiği görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur çünkü yaptığımız çalışmada sadece hedefler değişmiştir demet penceresi aynıdır.

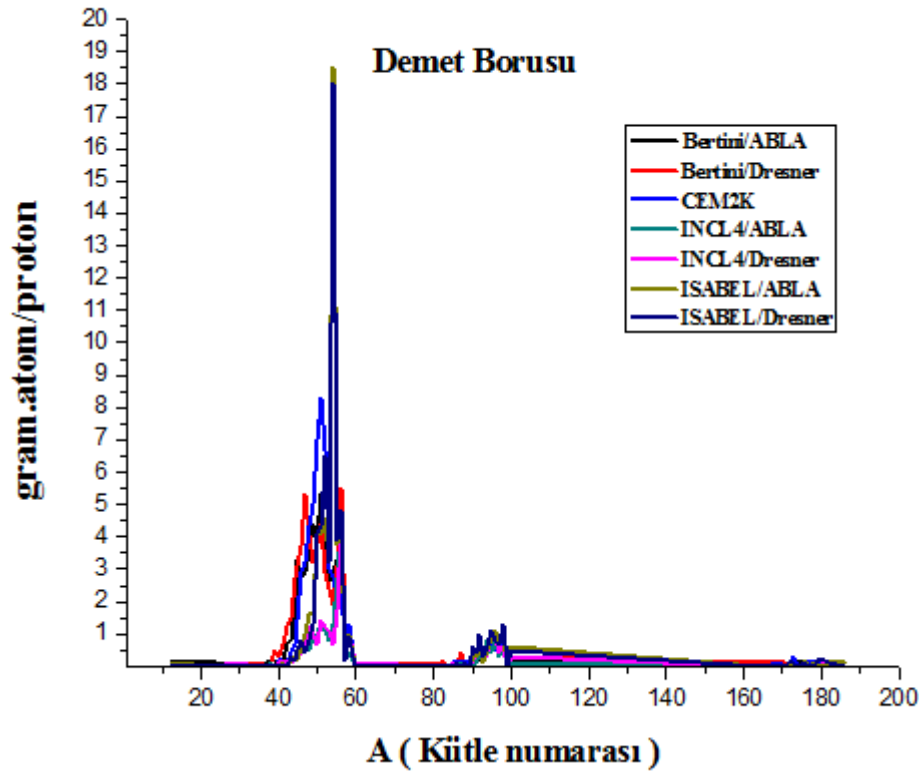
Çizelge 6. 7. 1 GeV p + Pb hedef nükleer reaksiyonunda demet penceresinde oluşan rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri

Demet penceresi				Aktiflik (Becquerel/Coulomb)							
Z	N	A	Çekirdek	Yarı ömür	Bertini/ABLA	Bertini/Dresner	CEM2k	INCL4/ABLA	INCL4/Dresner	ISABEL/ABLA	ISABEL/Dresner
64	84	148	Gd	74,6y(alfa)	1,841E-04	3,681E-40	3,681E-04	0,000E+00	3,681E-04	1,841E-04	3,681E-04
64	86	150	Gd	1,8 My(alfa)	7,628E-10	7,628E-46	1,526E-09	0,000E+00	0,000E+00	7,628E-10	7,628E-10
66	88	154	Dy	3 My(alfa)	9,154E-10	0,000E+00	4,577E-10	0,000E+00	0,000E+00	9,154E-10	0,000E+00

Çizelge 6. 8. 1 GeV p + Pb-Bi hedef nükleer reaksiyonunda demet penceresinde oluşan rezidual çekirdeklerin alfa aktiflikleri

Demet Penceresi	Aktiflik (Becquerel/Coulomb)											
	Z	N	A	Çekirdek	Yarı ömür	Bertini/ABLA	Bertini/Dresner	CEM2k	INCL4/ABLA	INCL4/Dresner	ISABEL/ABLA	ISABEL/Dresner
	64	84	148	Gd	74,6y(alfa)	4,206E-07	8,412E-07	8,412E-07	0,000E+00	8,412E-07	4,206E-07	8,412E-07
	64	86	150	Gd	1,8 My(alfa)	1,743E-12	1,743E-12	3,486E-12	0,000E+00	0,000E+00	1,743E-12	1,743E-12
	66	88	154	Dy	3 My(alfa)	2,092E-12	0,000E+00	1,046E-12	0,000E+00	0,000E+00	2,092E-12	0,000E+00

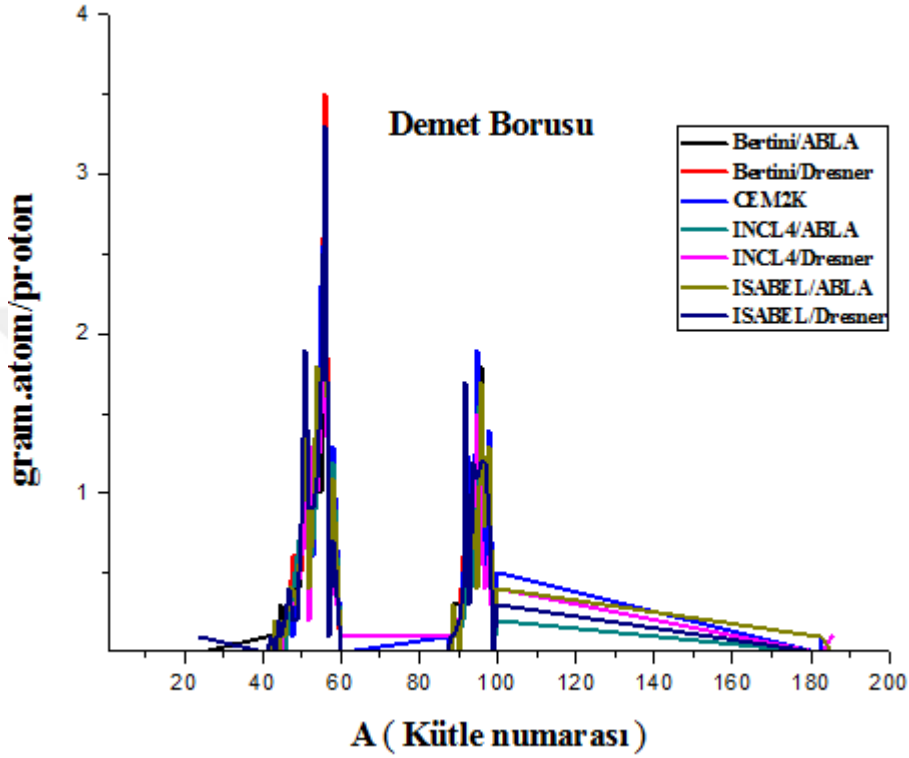
Çizelgelerde demet her iki hedefte demet penceresinde oluşan radyoaktif çekirdeklerin alfa aktiflikleri verilmiştir. Her iki çizelgede aynıdır çünkü iki hedefte kullanılan demet penceresinin yapı materyalleri aynı olduğundan aynı rezidual çekirdeklerin oluşması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 6. 10. 1 GeV p + Pb hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet borusunda oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

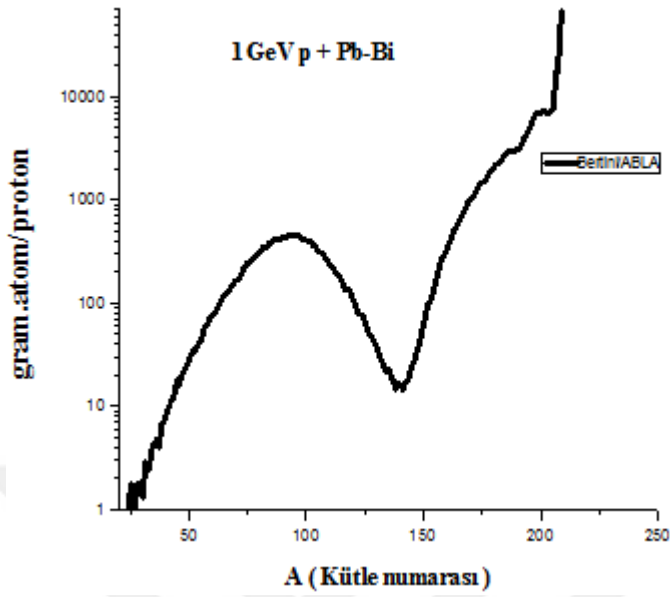
Şekil 6.10'daki grafiğe göre demet borusunda oluşan rezidual çekirdeklerin kütle numarası 50 civarında pik yaptığı görülmektedir. Burada oluşan çekirdekler ^{53}Mn ve

^{55}Fe sırasıyla yarı ömürleri 3.7 Myıl ve 2.7 yıldır. Bu çekirdekler alfa yayınlayıcısı değildir.

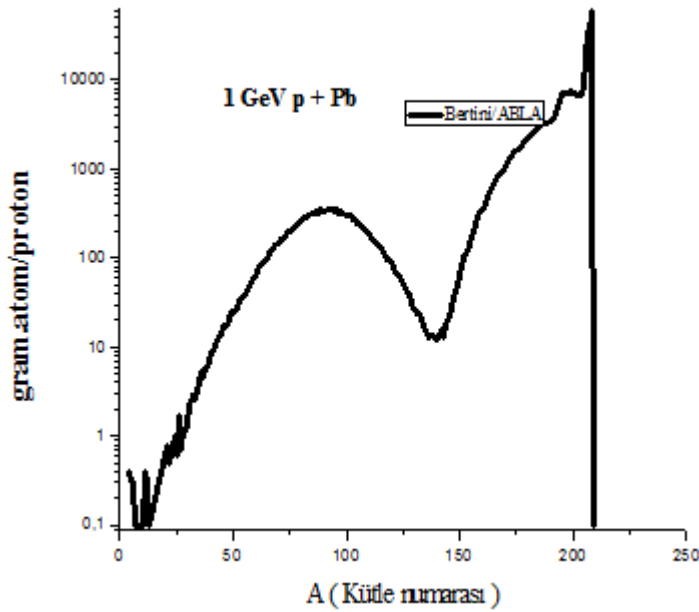


Şekil 6. 11. 1 GeV p + Pb-Bi hedef nükleer reaksiyonu sonucunda demet borusunda oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

Şekil 6.11 grafiği Şekil 6.10'a benzer olarak kütle numarası 50 civarında ve yaklaşık 95 civarında pik yaptığı görülmektedir. Yine Şekil 6.10'a benzer olarak ^{55}Fe oluşmuştur.

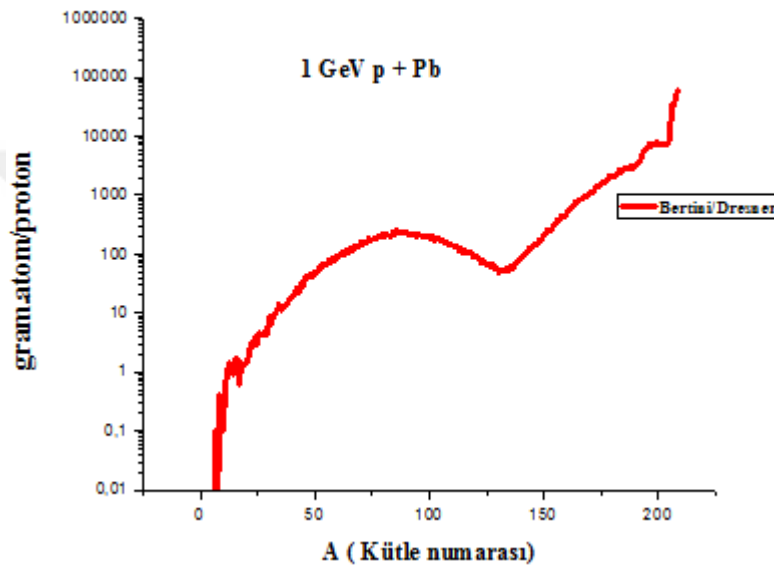


Şekil 6. 12. Pb-Bi hedefte Bertini/ABLA modeliyle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

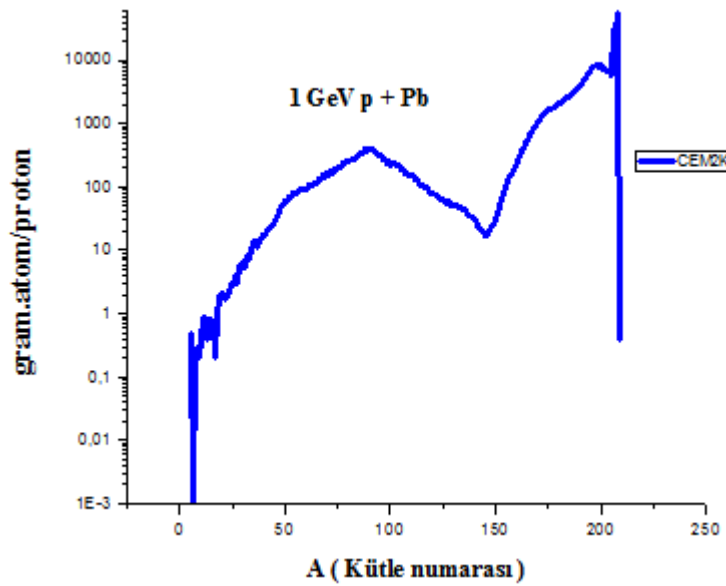


Şekil 6. 13. Pb hedefte Bertini/ABLA modeliyle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

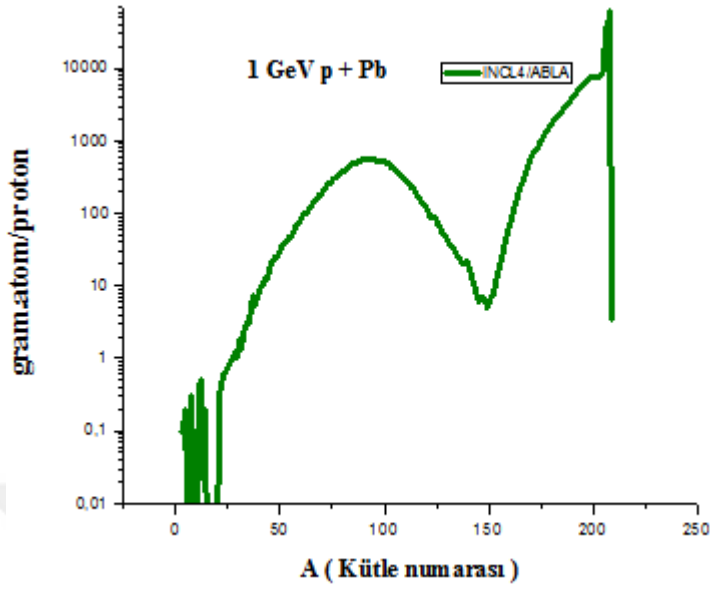
Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 kurşun (katı hedef) ile kurşun-bizmut (sıvı hedef) üzerine gönderilen 1 GeV enerjili protonla reaksiyonu sonucu oluşan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı Bertini/Abla model ile hesaplanan değerler kullanılarak çizildi. Grafikler karşılaştırıldığında eğrilerin aynı olduğu görülmektedir.



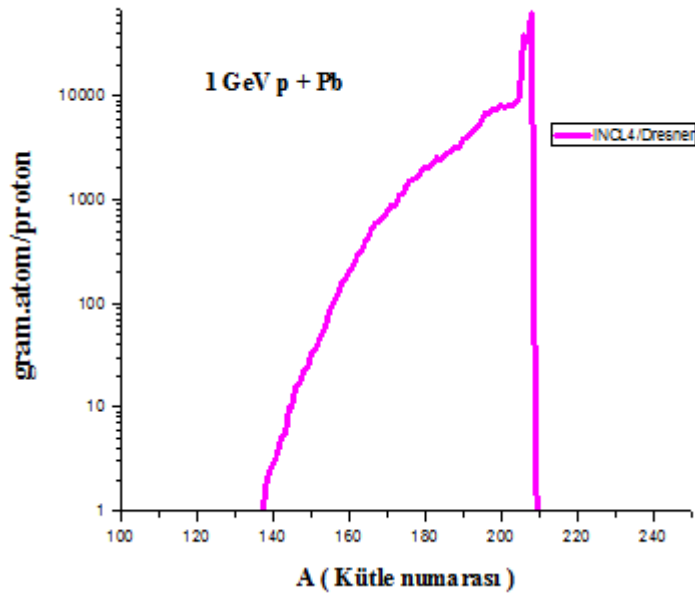
Şekil 6. 14. Pb hedefte Bertini/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



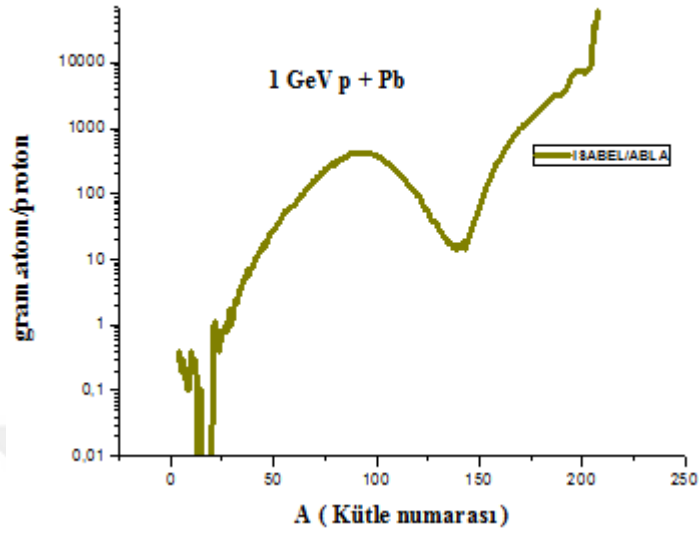
Şekil 6. 15. Pb hedefte CEM2k modeliyle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



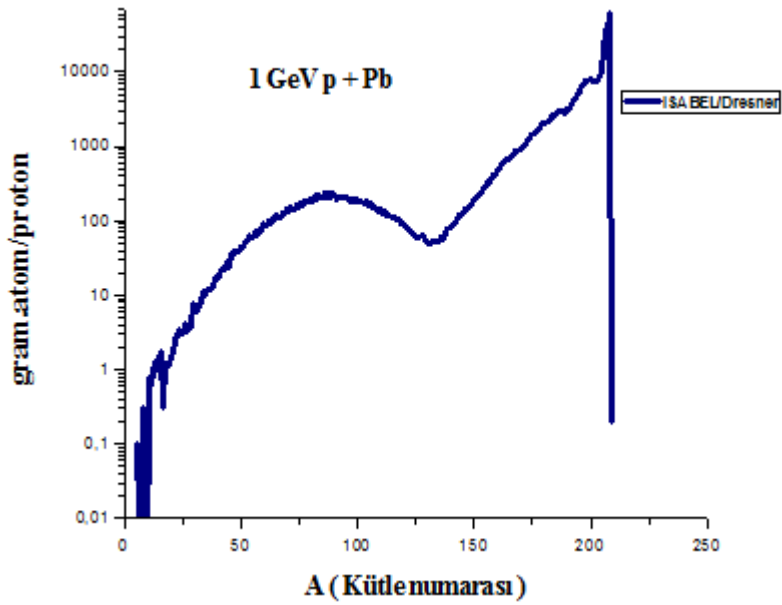
Şekil 6. 16. Pb hedefte INCL4/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



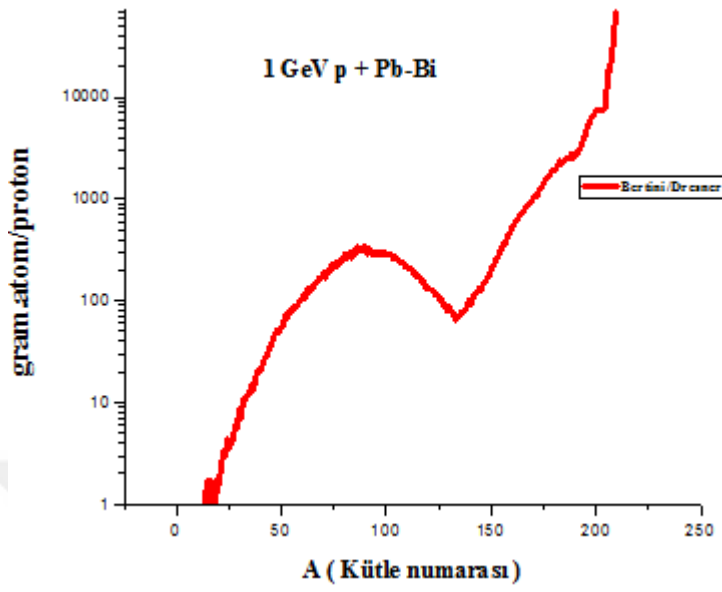
Şekil 6. 17. Pb hedefte INCL4/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



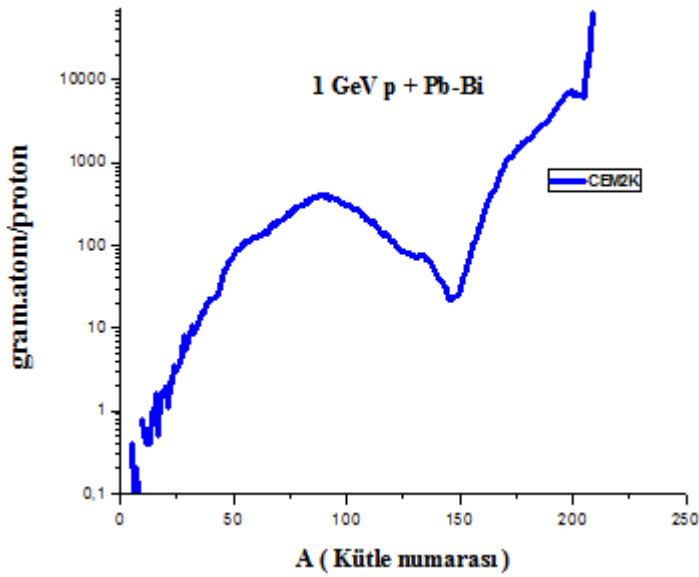
Şekil 6. 18. Pb hedefte ISABEL/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



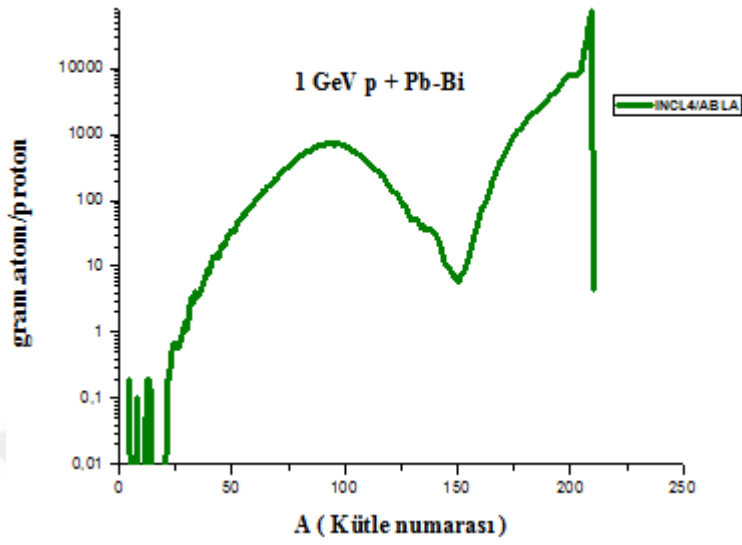
Şekil 6. 19. Pb hedefte ISABEL/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



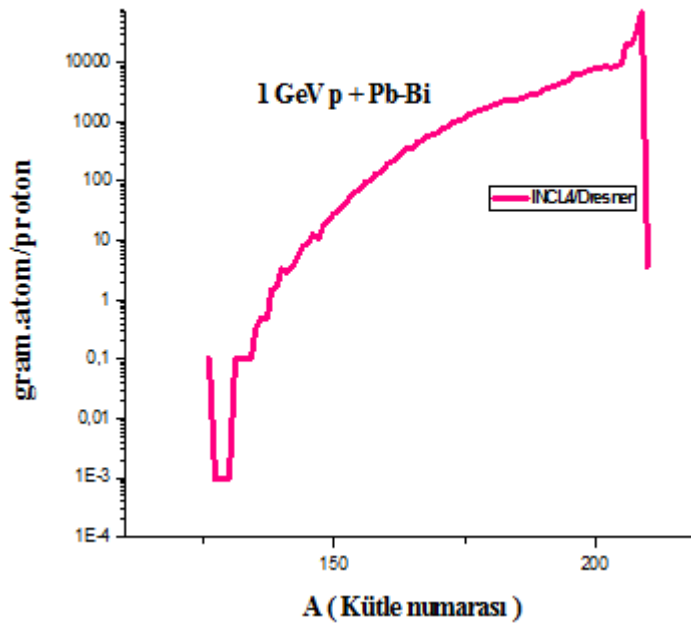
Şekil 6. 20. Pb-Bi hedefte Bertini/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



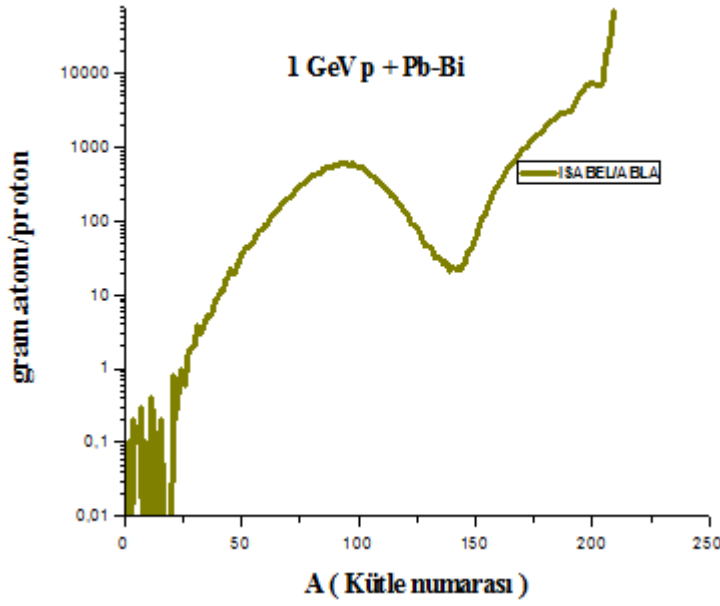
Şekil 6. 21. Pb-Bi hedefte CEM2k modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



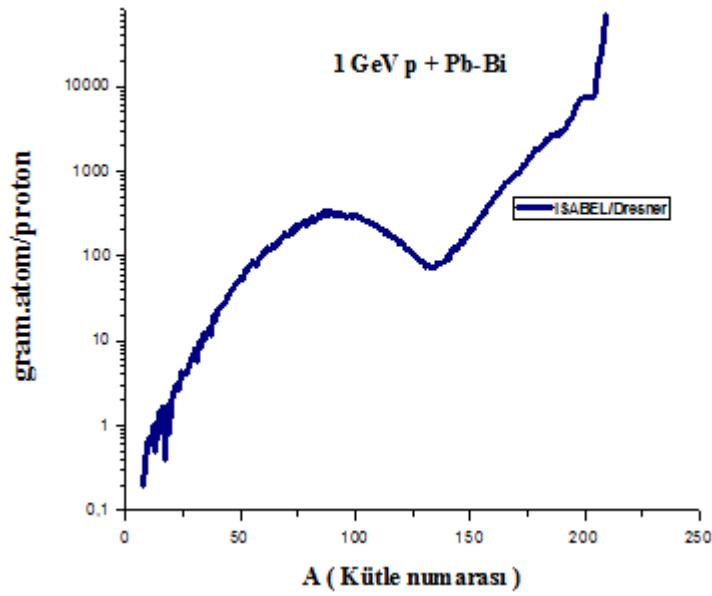
Şekil 6. 22. Pb-Bi hedefte INCL4/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



Şekil 6. 23. Pb-Bi hedefte INCL4/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



Şekil 6. 24. Pb-Bi hedefte ISABEL/ABLA modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı



Şekil 6. 25. Pb-Bi hedefte ISABEL/Dresner modelle hesaplanan rezidual çekirdeklerin kütle dağılımı

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Parçalanma hedefi ile proton demetinin nükleer reaksiyonları sonucunda [8] radyoaktif veya radyoaktif olmayan rezidual çekirdekler üretilir. Bu çekirdeklerin çoğu radyoaktiftir. Reaksiyon sonucunda üretilen rezidual çekirdekler ve nötron ürünleri; nötron üretim kaynağı olan hedefin şekli ve dizaynında büyük rol oynamaktadır [36]. Hedef geometrisine bağlı yapılan bir çalışmada silindirik hedefin yarıçapı büyüdükçe üretilen nötron sayısının arttığı görülmüştür. Yine silindirik hedef seçilerek yapılan bir çalışmada gönderilen parçacık demetinin enerjisi değiştirilerek nötron üretme miktarı enerjiye bağlı olarak artmıştır [44].

Hızlandırıcı güdümlü sistemlerde rezidual çekirdeklerin oluşumunun araştırılmasının sebebi; bu çekirdeklerin bazılarının radyoaktif olmasıdır. Oluşan bu radyoaktif çekirdeklerin miktarı kullanılan hedefe göre değişmektedir. Nükleer reaksiyonlar sonucu oluşan radyoaktif rezidual çekirdekler sistemin tasarımında önemlidir çünkü sistemi oluşturan yapı materyalleri bu çekirdeklerden dolayı radyasyon zararına uğrayabilir ve böylece sistemin zarar görmesine sebep olabilir.

Bu çalışmada Pb (katı) ve Pb-Bi (sıvı) hedefleri seçilerek iki farklı hedefte rezidual çekirdekler hesaplanarak kütle dağılımları incelendi. Tablolar ve grafikler incelendiğinde sıvı hedef içindeki Bi çekirdeğinden dolayı zehirli çekirdek olan Polonyumun üretiminin daha fazla olduğu görüldü. Burada oluşan rezidual çekirdeklerin miktarı birim kütle ve kaynak proton başına gram.atom miktarları hesaplanarak birbirleriyle kıyaslandı. Hedefde oluşan rezidual çekirdeklerin grafiklerine bakıldığında ise kütle numarası parçalanma hedefine yakın olan rezidual çekirdeklerin oluşum miktarlarının da fazla olduğu görüldü (Şekil 6.6 ve Şekil 6.7). İki hedefde de oluşan Po^{208} , Po^{209} , Po^{210} çekirdeklerinin alfa aktifliklerine bakıldığında ise Pb-Bi hedefte daha fazla olduğu görüldü.

Bu sonuçlar Hızlandırıcı Güdümlü Sistemin tasarımında hedef seçiminin, hedef, demet penceresi ve demet borusunda üretilen radyoaktif rezidual çekirdeklerin sisteme verebileceği radyasyon zararının minimum seviyede tutmamızda bize önemli

fikir vermektedir. Bu çalışmaya benzer olarak farklı hedefler kullanılarak üretilen rezidual çekirdekler belirlenebilir.



KAYNAKLAR

1. Kim, J. I., Gompper, K. D., “The Nuclear Fuel Cycle Information System”, *International atomic energy agency*, Vienna, 1-10 (1996).
2. Briesmeister, J., “RSIC Computer Code Collection MCNP4A, Monte Carlo N-Particle Transport Code System”, *Los Alamos National Laboratory*, New Mexico, (1993).
3. Davis T., “Collision”, Physics for Game Programmers, Alan Macload, *Grant Palmer*, New York, 403-421 (2005)
4. Rubinstein R. Y., “Monte Carlo Method”, *Jhon Wiley and Sons*, Simulation and The Monte Carlo Method, New York, 1-17 (1981).
5. Korkmaz, M. E., “Monte Carlo Yöntemi Kullanılarak Hızlandırıcı Güdümlü Sistemde Bazı Aktinitlerin Dönüşümü ve Enerji Elde Edilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 21-50 (2009).
6. Rubbia. C., “Fast Neutron Incineration in The Energy Amplifier as Alternative to Geologic Storage”, *The Case of Spain, European Organization For Nuclear Research*, 1-69 (1997).
7. Baylac. V. “Investigation Related to The Generation of Reaction Products in The target of Accelerator Driven System for Nuclear Waste Incineration”, *Forshungszentrum Karlsruhe GmbH*, Karlsruhe, (2003).
8. Prof. Dr. Rolf Michel, “Cross Section for Residual Nuclide Production by Proton-Induced Reaction with Heavy Target Elements at Medium Energies”, *Leibniz University Hanover*, Germany, (2009).
9. İnternet : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu “Hızlandırıcı Güdümlü Sistemler”
<http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/hizlandirici.pdf> (2004).
10. İnternet : Türkiye Bilgi Portalı “Hızlandırıcılar”
<http://www.birdunyabilgi.net/lineer-hizlandirici> (2008).
11. İnternet : NüveForum “Hızlandırıcılar”
<http://www.nuveforum.net/1110-tanecik-fiziği/32543-tanecik-parcacik-hizlandiricilar-isik-demetlerine-enerji-kazandiran-aygitlar> (2006).
12. İnternet : Uludağ Üniversitesi “Hızlandırıcılar”
<http://www20.uludag.edu.tr/epilicer/hizlandirici.html> (2005).
13. Baetsle, L.H., “Application of Partitioning/Transmutation of Radioactive Materials in Radioactive Waste Management”, *Nuclear Research Centre of Belgium*, Belgium, (2001).

14. Frank Goldenbaum, "The Physics of Spallation Processes", *Forshunszentrum Juelich GmbH*, (2004).
15. Bauer. G.S., "Meeting on Targets for Neutron Beam Spallation Sources, 34", *Berichte der Kernforschungsanlage Jülich*, Kernforschungsanlage, 12:39-45 (1979).
16. Per-Eric Ahlström, Anderson S., Ekberg C., Nilsson M., "Partitioning and Transmutation Current Developments", *A Report From The Swedish Reference group on P&T Resarch, TR-04-15*, (2004).
17. Internet : Türkiye Enerji Kurumu "Hızlandırıcılar"
<http://www.taek.gov.tr/bilgi/nukleer/hizlandiricilar/hizlandirici.html> (2006).
18. P. Sophie, "Extension of The Liege Intranuclear Cascade Model to The 2-15 GeV Energy Range", (Doctorol Thesis), *University of Liege Faculty of Sciences*, (2011-2012).
19. Aatos Heikkinen, "Bertini Intra Nuclear Cascade Implementation in Geant4", *Computing in High Energy and Nuclear Physics La Jolla*, California, (2003).
20. Bertini. W., "INC Calculation of The Secondary Nucleon Spectra From Nucleon Nucleus Interactions In The Energy Range 340 to 2900 MeV and Comparisons with Experiment", *Phys. Rev.*, 188 4(1969).
21. Cugnon, J. Mizutani, T. and Vandermeulen, J. "Equilibration in Relativistic Nuclear Collision a Monte Carlo Calculation", *Nucl. Phys. A*, 352(3): (1981).
22. Detlef F., Galdenbaum, F., "Handbook of Spallation Research", *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KgaH*, Weinheim, (2009).
23. Rousseau, P., "Validation of Calculation Tools Fort He Estimation of Reaction Products in The Target of Accelerator Driven Systems", *Forschunszentrum Karlsruhe GmbH*, Karlsruhe, (2004).
24. A. Boudard J. Cugnon, S. Leray and C. Volant, "Intra Nuclear Cascade Model for a Comprehensive Description of Spallation Reaction Data", *Phys. Rev.*, C,66(4):044615 (2002).
25. Chen, K. Fraenkel, Z., G. Friedlander, J. R. Grover, J.M. Miller, and Y. Shimamoto. VEGAS: "A Monte Carlo Simulation of Intranuclear Cascades", *Phys. Rev.*, 166(4):949-967 (1968).
26. Chen, K. Friedlander, Harp Harp, G. G. D. and Miller, J. M. "Effects of Nucleon-Pair Correlations on Monte Carlo Intranuclear-Cascade Simulations", *Phys. Rev.*, C4(6):2234-2240 (1971).

27. Hofstadter, R., “Electron Scattering and Nuclear Structure”, *Rev. Mod. Phys.*, 28(3):214-254 (1956).
28. Hofstadter, R., “Nuclear and Nucleon Scattering of High-Energy Electrons”, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, 7:231-316 (1957).
29. Gudima, K. K., Mashnik, S. G. and Toneev, V. D., “Cascade-Exciton Model of Nuclear Reactions”, *Nucl. Phys.*, A401(2):329-361 (1983).
30. Cugnon, J. and Lemaire, M.C “Medium Effects in Pion Production”, *Nucl. Phys.*, A(489):781-802 (1988).
31. Cugnon, J., Deneye. P., and Vandermeulen, J., “Multipion Dynamics Following Antiproton Annihilation on Nuclei”, *Nucl. Phys.*, A(500):701-730 (1989).
32. Schmidt K. H., et al., “Production of Neutron Rich Isotopes by Cold Fragmentation in The Reaction $^{197}\text{Au}-\text{Be}$ at 950 A MeV”, *Nucl. Phys.*, 660:87 (1999).
33. Gaimard, J. J, k.pH. Schmit, “A Re-Examination of The Abrasion-Ablation Model For The Description Of The Nuclear Fragmentation Reaction”, *Nucl. Phys.* A 528:255 (1991).
34. Leray. S., “Nuclear Data at High Energy :Experiment, Theory and Applications”, *CEA/Saclay, DAPNIA/SPhN*, France, (2000).
35. Ferrari. A., Sala, P.R., Ranft, J., etc., “The Production of Residual Nuclei in Peripheral high Energy Nucleus Nucleus Interactions”, *Santiago de Compostela US-FT/9-96*, (1996).
36. Benlliure, J., “New Data and Monte Carlo Simulations on Spallation Reactions Relevant for The Design o ADS” ,*Universidad de Santiago de Compestela 15706 Santiago de Compestela*, Spain.
37. Mashnik, S. G., Gudima, K. K., et al., “Analysis of the GSI A+p and A+A Spallation, Fission, and Fragmentation Measurements with the LANL CEM2k and LAQGSM codes”, *ArXiv.nucl-th/0404018v1*, (2004).
38. Benlliure et al., “An Introduction of Radioactivitiy”, *Nuclear Medicine Departman Manchester Royal Infirmary*, (1999).
39. Krane Kenneth S., “Nükleer Fizik, 1” , Çev. Ed: Prof. Dr. Başar Şarer, *Palme*, Ankara, (2006).
40. Chadwick, M. B., et al., “Intermediate State Transition Rates in The Griffin Model”, *Nucl. Sci. Eng.*, 10:28-43 (1998).

41. Laire, S. W., “MCNPX User’s Manuel Version 2.3.0”*Accelarator Production of Tritium*,(2002).
42. Wechsler, M.S., et al., “Radiation Effects in Materials for Accelerator Driven Neutron Technologies”, *Journal of Nuclear Materials*, 48: 90-99 (1996).
43. Trabuc. P., “The Problem of Polonium Contamination in the MEGAPIE Spallation Target”, *CEA*, (2001).
44. Song, T. Y., Kim. Y. K., Park, W.S., et al., “The Characteristics of Lead and Tungsten Targets Used in The Accelerator-Driven Subcritical Reactor”, *Korea Atomic Energy Research Institute* , Korea.
45. Bertini. W., “Low- Energy Intranuclear Cascade Calculation”, *Phys. Rev.*, 131 (4) (1963).
46. Krane Kenneth S., “Nükleer Fizik, 2”, Çev. Ed: Prof. Dr. Başar Şarer, *Palme*, Ankara, (2002).
47. Yariv. Y., “Intra-Nuclear Cascade ”,*ADS/ND-03, IEAE*, Vienna, Austria, (2009).
48. Cugnon, J., and Mancusi. D., “New Features of The INCL4 Model for Spallation Reactions”, *Journal of the Korean Physical Society*, 59(2) 955-958 (2011).
49. Yariv. Y., Boudard. A., Cugnon. J., Leray. S., et al., “Intranuclear Cascade Models et Low Energy”,*International Conference on Nuclear Data for Science Technology*, (2007).
50. Yariv. Y., and Fraenkel. Z., “Intranuclear Cascade Calculations of High-Energy Heavy Ion Interactions”,*Phys. Rev.*, C20(6):2227-2243 (1979).
51. Yariv. Y., Fraenkel. Z., “Intranuclear Cascade Calculations of High Energy Heavy Ion Collision: Effect of Interactions Between Cascade Particles”,*Phys. Rev.*, C24(2):448-494 (1994).
52. Pamuk. İ.İ., “Monte Carlo Tekniği Kullanılarak 1,3,5 GeV Enerjili Protonlar için Hızlandırıcı Güdümlü Sistemde Nötronik Hesaplamalar”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* , Ankara, (2011).
53. Şarer. B., Korkmaz. M.E., Günay. M., Aydın. A., “Monte Carlo Studies in Accelarator Driven Systems for Transmutation of High Level Nuclear Waste”, *Energy Conversion and Management*, 49 1966-1971 (2008).



EKLER

EK 1. Rezidual çekirdekler

Çizelge 1.1. 1 GeV proton+kurşun reaksiyonu sonucu oluşan kütle numarası 200 civarı olan rezidual çekirdekler

gram.atom/proton(1 GeV p+Pb)							
A	Bertini/ABLA	Bertini/Dresner	CEM2k	INCL4/ABLA	INCL4/Dresner	ISABEL/ABLA	ISABEL/Dresner
197	7,016E+03	6,741E+03	7,617E+03	6,833E+03	6,760E+03	6,886E+03	6,603E+03
198	7,155E+03	7,321E+03	8,328E+03	7,208E+03	7,498E+03	7,330E+03	7,484E+03
199	7,282E+03	7,152E+03	8,010E+03	7,461E+03	7,457E+03	7,508E+03	7,343E+03
200	7,173E+03	7,545E+03	8,188E+03	7,586E+03	7,995E+03	7,475E+03	7,871E+03
201	7,068E+03	7,177E+03	7,346E+03	7,675E+03	7,810E+03	7,274E+03	7,492E+03
202	6,850E+03	7,341E+03	7,286E+03	7,683E+03	8,222E+03	7,152E+03	7,704E+03
203	6,789E+03	6,988E+03	6,740E+03	7,743E+03	7,949E+03	7,313E+03	7,542E+03
204	6,666E+03	7,327E+03	6,740E+03	8,153E+03	8,694E+03	7,929E+03	8,549E+03
205	8,256E+03	8,538E+03	5,910E+03	9,736E+03	1,003E+04	9,938E+03	1,025E+04
206	3,488E+04	3,564E+04	3,202E+04	3,748E+04	3,824E+04	3,760E+04	3,831E+04
207	3,128E+04	3,158E+04	2,622E+04	3,296E+04	3,352E+04	3,297E+04	3,326E+04
208	5,917E+04	5,945E+04	5,660E+04	6,169E+04	6,171E+04	6,073E+04	6,092E+04
209	1,000E-01	0,000E+00	4,000E-01	3,500E+00	3,500E+00	0,000E+00	2,000E-01
210	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,000E-01	0,000E+00	0,000E+00

Çizelge 1.2. 1 GeV proton+kurşun-bizmut reaksiyonu sonucu oluşan kütle numarası 200 civarı olan residual çekirdekler

gram.atom/proton(1 GeV p+Pb-Bi)							
A	Bertini/ABLA	Bertini/Dresner	CEM2k	INCL4/ABLA	INCL4/Dresner	ISABEL/ABLA	ISABEL/Dresner
197	6,044E+03	5,526E+03	6,419E+03	6,194E+03	6,213E+03	6,409E+03	5,976E+03
198	6,563E+03	6,492E+03	7,011E+03	6,764E+03	7,191E+03	6,919E+03	6,987E+03
199	6,889E+03	6,568E+03	6,918E+03	7,270E+03	7,272E+03	7,201E+03	6,974E+03
200	7,045E+03	7,278E+03	7,273E+03	7,626E+03	8,153E+03	7,295E+03	7,564E+03
201	7,194E+03	7,272E+03	6,726E+03	7,905E+03	8,164E+03	7,283E+03	7,447E+03
202	7,083E+03	7,542E+03	6,854E+03	8,087E+03	8,572E+03	7,166E+03	7,634E+03
203	7,052E+03	7,290E+03	6,578E+03	8,079E+03	8,411E+03	7,028E+03	7,353E+03
204	6,931E+03	7,507E+03	6,611E+03	8,238E+03	8,765E+03	6,989E+03	7,490E+03
205	7,489E+03	7,870E+03	6,147E+03	8,932E+03	9,301E+03	7,738E+03	8,065E+03
206	1,808E+04	1,855E+04	1,640E+04	1,993E+04	2,053E+04	1,876E+04	1,927E+04
207	1,723E+04	1,777E+04	1,455E+04	1,935E+04	1,995E+04	1,852E+04	1,901E+04
208	3,587E+04	3,629E+04	3,046E+04	3,779E+04	3,842E+04	3,780E+04	3,824E+04
209	6,870E+04	6,881E+04	6,525E+04	7,133E+04	7,134E+04	7,079E+04	7,090E+04
210	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,500E+00	3,700E+00	0,000E+00	0,000E+00

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERKAN, Seda
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 06.08.1988 Bolu
Medeni hali : Evli
Telefon : 0507 386 87 76
e-mail : kapdan.seda@gmail.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Lisans	Gazi Üniversitesi	2010
Lise	Bolu Fen Lisesi	2006

Yabancı dil

İngilizce