

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PROTON HIZLANDIRICILARININ UYGULAMA ALANLARI VE TÜRK
HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM)'NDE RADYOİZOTOP ÜRETİM
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hakan PEKDOĞAN

HAZİRAN 2011

Fizik Anabilim Dalında Hakan PEKDOĞAN tarafından hazırlanan ‘‘Proton Hızlandırıcılarının Uygulama Alanları ve Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM)’nde Radyoizotop Üretim Potansiyelinin Araştırılması’’ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İhsan ULUER
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. Abdullah AYDIN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Şeref OKUDUCU

Üye : Doç. Dr. Abdullah AYDIN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin YILMAZ

15/06/ 2011

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. İhsan ULUER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

PROTON HIZLANDIRICILARININ UYGULAMA ALANLARI VE TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM)'NDE RADYOİZOTOP ÜRETİM POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

PEKDOĞAN, Hakan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Abdullah AYDIN

Haziran 2011, 62 sayfa

Bu tez çalışmasında, ülkemizde kurulma çalışmaları devam eden Türk Hızlandırıcı Merkezi genel hatlarıyla tanıtıldı. Bu merkezin bir parçası olan proton hızlandırıcı tesisinde üretilebilecek radyoizotop potansiyeli araştırıldı. 30 MeV' den büyük enerjili protonlar kullanılarak üretilebilecek radyoizotoplar belirlendi. Bu radyoizotopların üretimi için gerekli en uygun proton enerji aralıkları ise denge öncesi nükleer modelleri kullanan bilgisayar programları ile tespit edildi. Bu çalışmada hesaplanan tesir kesitleri, literatürden alınan deneysel tesir kesiti verileri ile karşılaştırıldı.

Anahtar kelimeler: Türk Hızlandırıcı Merkezi, Denge öncesi reaksiyonlar, Geometri Bağımlı Hibrid model ,ALICE /ASH

ABSTRACT

APPLICATION FIELDS OF PROTON ACCELERATORS AND INVESTIGATION OF PRODUCTION POTENTIAL OF RADIOISOTOPE IN TURKISH ACCELERATOR CENTER(TAC)

PEKDOĞAN, Hakan

Kırıkkale University

Institute of Sciences

Department of Physics, M.Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah AYDIN

June 2011, 62 pages

In this thesis, Turkish Accelerator Center whose establishment has been ongoing in our country was introduced. Potential of radioisotopes production in Proton Accelerator Facility, a part of this center, was investigated. Radioisotopes which can be produced by using high energy protons above 30 MeV were determined. The optimum proton energy ranges necessary for the production of these radioisotopes, were determined with the computer programs using nuclear pre-equilibrium models. The calculated cross sections in this study were compared with the experimental cross section data taken from the literature.

Key Words: Turkish Accelerator Center , pre-equilibrium reactions, Geometry Dependent Hybrid Model, ALICE /ASH

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tezimin hazırlanması esnasında bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen yapmış olduğum çalışmalar sırasında bana göstermiş olduğu rehberlik ve sağladığı imkanlardan dolayı tez yöneticisi hocam Sayın Doç. Dr. Abdullah AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışmasının bir kısmının destekleyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan DPT2006K 120470 numaralı YUUP projesinin yürütücüsü Sayın Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi.....	2
1.1.1. Projenin Hedefleri.....	2
1.1.1.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi Test Laboratuvarının Kurulması.....	2
1.1.1.2 Türk Hızlandırıcı Merkezinin Teknik Tasarım Raporunun Yazılması.....	3
1.1.1.3 Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsünün Kurulması.....	3
1.1.2. Projenin Önemi.....	4
1.1.3. Proje Kapsamında Kurulacak Tesisler.....	7
1.1.3.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarım Çalışmaları.....	7
1.1.3.2. Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı Teknik Tasarımı.....	9
2. HIZLANDIRICILAR	12
2.1. Hızlandırıcı Çeşitleri.....	14
2.1.1. Elektrostatik Hızlandırıcıları.....	14
2.1.2. Siklotron hızlandırıcıları.....	15
2.1.3. Siklotron Tipi Hızlandırıcının Çalışma Prensibi.....	16
2.1.4. Sinkrotron Hızlandırıcısı.....	17
2.1.5. Lineer Hızlandırıcılar.....	18
2.2. Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı İçin Radyoizotop Üretim ...	19
Potansiyelinin Araştırılması.....	19
2.2.1. Radyoizotoplar.....	21
2.2.2. Hızlandırıcılarla Üretilen Radyoizotoplar.....	21
2.2.3. Radyoizotop Üretimi ve Kullanım Alanları.....	22

3. NÜKLEER MODELLER.....	25
3.1. Denge Öncesi Nükleer Reaksiyonlar.....	25
3.2. Exciton model.....	29
3.3. Hibrit model	34
3.4. Geometri bağımlı hibrit model	35
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
4.1. Hesaplama Yöntemi	38
4.1.1. ALICE/ASH Bilgisayar Programı	39
4.1.2. ALICE 2008 Bilgisayar Programı	40
4.1.2.1. Kodun Çalıştırılması Ve Opsiyonları	41
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	43
5.1. $^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}$ Reaksiyonu	43
5.2. $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$ Reaksiyonu.....	44
5.3. $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu	45
5.4. $^{133}\text{Cs}(p,n)^{133}\text{Ba}$ Reaksiyonu.....	46
5.5. $^{133}\text{Cs}(p,3n)^{131\text{mg}}\text{Ba}$ Reaksiyonu.....	47
5.6. $^{133}\text{Cs}(p,5n)^{129\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonu	48
5.7. $^{133}\text{Cs}(p,6n)^{128}\text{Ba}$ Reaksiyonu	49
5.8. $^{93}\text{Nb}(p,3n)^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$ Reaksiyonu	50
5.9. $^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$ Reaksiyonu	51
5.10. $^{93}\text{Nb}(p,4n)^{90}\text{Mo}$ Reaksiyonu	52
5.11. $^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$ Reaksiyonu	53
5.12. $^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}$ Reaksiyonu.....	54
6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	55
KAYNAKLAR	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Normal iletken yapılarla 1 GeV'e ulaşılan hızlandırıcının blok diyagramı.....	9
1.2 55 MeV'lik DTL hızlandırıcısının blok diyagramı.....	10
2.1. Hızlandırıcıların temel araştırma ve uygulama alanları.....	13
2.2. Cockcroft-Walton hızlandırıcısı.....	14
2.3. Wande Graff Hızlandırıcısı.....	14
2.4. Siklotron tipi hızlandırıcı.....	16
2.5. Sinkrotronun temel yapısı (Blogger, 2007).....	17
2.6. Radyo frekans kavitesi.....	18
2.7. Wideröe lineer hızlandırıcısı (Blogger, 2007).	19
3.1. 29 ve 39 MeV proton gelme enerjilerinde, $^{54}\text{Fe}(p,p')$ reaksiyonuna ait proton yayınlanma spektrumu.....	26
3.2. Nükleon-çekirdek etkileşmesinin farklı aşamaları: 1- etlileşmeden önceki çekirdek; 2- $2p1h$ door-way durumu; 3- $3p2h$ durumu; a- gelen parçacık.....	27
3.3 Exciton modeline göre, nükleon girişli bir reaksiyonun ilk birkaç aşamasının şematik gösterimi.....	30
5.1 $^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	43
5.2. $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	44
5.3. $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	45
5.4. $^{133}\text{Cs}(p,n)^{133}\text{Ba}$ Reaksiyonu $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	46
5.5. $^{133}\text{Cs}(p,3n)^{131\text{mg}}\text{Ba}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	47
5.6. $^{133}\text{Cs}(p,5n)^{129\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	48
5.7. $^{133}\text{Cs}(p,6n)^{128}\text{Ba}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	49

5.8. $^{93}\text{Nb}(p,3n)^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.	50
5.9. $^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.	51
5.10. $^{93}\text{Nb}(p,4n)^{90}\text{Mo}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel	52
5.11. $^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.	53
5.12. $^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Hızlandırıcıların kullanım alanları ve sayıları (Yavaş, UPHUK III)	13
2.2. 30 MeV üzerinde üretilebilecek radyoizotoplar (DPT-YUUP projesi VIII. Altı aylık gelişim raporu(Temmuz-Aralık 2009 Dönemi)).	20
3.3. Bazı radyoizotoplar ve kullanım alanları (McLaughlin A.F vd.,(1994)) Bekiş R vd.,(2001)).	23
4.1. ALICE/ASH'e ait çeşitli parametreler	40
4.2. ALICE-2008'e ait giriş parametreler	401
4.3. ALICE-2008'e ait çıkış dosyaları	401
6.1. Potansiyel radyoizotopların tesir kesitleri ve üretim enerji aralığı	55

SİMGELER DİZİNİ

a	Durum yoğunluğu parametresi
A	Kütle numarası
B	Manyetik alan
α	Alfa
b	Barn (1 b=100 fm ²)
β	Deformasyon parametresi, Reaksiyon kanalı
nX_ν	n exciton yapılanmasındaki ν türündeki parçacıkların sayısı
d	Döteron; tek parçacık seviye yoğunluğu
D	Çekirdeğin seviyeler aralığı; Azaltma faktörü
d Ω	Nükleer reaksiyon geometrisinde katı açı
d σ /d ϵ	Diferansiyel tesir kesiti (Enerji)
d σ /d Ω	Diferansiyel tesir kesiti (Açısal)
E	Gelen parçacık enerjisi
E _B	Nükleon bağlanma enerjisi
E _U	Bileşik sistem uyarılma enerjisi
E _f , ϵ_F	Fermi enerjisi
eV	Elektron Volt
g	Tek parçacık durum yoğunluğu
G _c (β)	Bileşik çekirdeğin β kanalına bozunma olasılığı
Γ	Uyarılmış durumun genişliği
h	Boşluk sayısı
\hbar	Planck sabiti ($\hbar = h/2\pi$)
i_ν	ν türü nükleonun spini
J	Toplam açısal momentum
k	Dalga vektörü
K _{p,h}	Yük korunum düzeltme katsayısı
ℓ	Yörünge açısal momentum; Ortalama serbest yol
$\lambda; \lambda_n, \lambda^+, \lambda^-$	Gelen parçacığın de Broglie dalga boyu; Nükleer durumlar arası geçiş hızları
$\bar{\lambda}$	Ortalama serbest yol

$\overline{ M ^2}$	Ortalama kare matris elemanı
n_0	Başlangıç exciton sayısı
N	Hedefte gözlenen nükleer reaksiyon sayısı; Nötron sayısı
N_0	Hedefe gelen parçacık sayısı
N_n	n exciton yapılanmasındaki durumların sayısı
μ	İndirgenmiş kütle
p	Parçacık sayısı
P	Lineer momentum; Parçacık yayınlanma olasılığı
$P_\nu(\epsilon)$	ϵ enerjili ν yayınlanan parçacık sayısı
Q	Reaksiyon enerjisi; Kuadrupol moment
R	Çekirdek yarıçapı
ρ	Çekirdek durum yoğunluğu; çekirdeğin madde yoğunluğu
S	Geometrik yüzey alanı
s	Spin; Asimetri parametresi
S_n	Nötron ayrılma enerjisi
S_p	Proton ayrılma enerjisi
Σ	Makroskopik tesir kesiti
σ	Tesir kesiti
t	Triton; Zaman; Hedef kalınlığı
$T; T_\ell$	Kinetik enerji; ℓ -inci kısmi dalganın geçiş katsayısı
$T_{eş}$	Reaksiyon eşik enerjisi
τ	Ortalama ömür
v	Parçacık hızı
V	Hacim
$V(R)$	Potansiyel kuyu derinliği
ν	Parçacık türü (proton, nötron, gibi)
w	Çekirdek seviye yoğunluğu
Z	Atom numarası

1. GİRİŞ

Parçacık hızlandırıcıları 20.Yüzyılda gelişen ileri teknoloji alanlarından biri olmakla birlikte, 21.Yüzyılın jenerik teknolojileri arasında önemli bir yer almaktadır. Bugün parçacık hızlandırıcıları temel parçacık fiziği, nükleer fizik, katıhal fiziği, tıp, kimya, biyoloji, jeoloji, malzeme bilimi, metalürji, mikro-elektronik, ziraat, gıda sterilizasyonu, radyoizotop üretimi, termonükleer sentez, nükleer atıkların imhası ve benzeri alanlarda geniş şekilde kullanılmaktadır. Ülkemizde medikal amaçlı kullanılan linaklar ve son dönemde alınmış baby siklotronlar dışında Ar-Ge veya temel araştırma amaçlı kullanılan parçacık hızlandırıcısı henüz mevcut değildir.

Ülkemizde parçacık hızlandırıcılarına dayalı temel ve uygulamalı araştırmaların yapılabileceği bir ulusal hızlandırıcı merkezinin olmayışı, bir başka deyişle 300'ün üzerinde uygulaması olan bu aygıtlardan gereği gibi yararlanılamaması, bilim ve teknoloji açısından gelişmiş ülkeler arasında yer alma idealinden uzaklaşmak anlamını taşımaktadır. Ülkemizin hızlandırıcı teknolojileri ile tanışmasını sağlayacak, temel ve uygulamalı araştırmaların parçacık demetleri ve ışınımalar kullanılarak yapılabileceği, ülkemizdeki araştırmacı ve bilim adamlarının hepsine açık olan ulusal bir hızlandırıcı merkezinin oluşturulması, büyük bir eksikliği gidereceği gibi ülkemiz bilim ve teknolojisi açısından bir dönüm noktası olacaktır. Günümüzde özellikle malzeme bilimi, tıp, biyoteknoloji ve nanoteknoloji araştırmalarında parçacık hızlandırıcıları ve bunlara dayalı ışınımaların kullanılması olmazsa olmaz konumundadır (YUUP projesi I. Altı Aylık Gelişim Raporu, Ocak-Haziran 2006).

Bu amaçla, 2006 yılında Ankara Üniversitesinin koordinatörlüğünde 10 üniversitenin katılımıyla Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi başlatılmıştır. Projede, Ankara, Gazi, Boğaziçi, İstanbul, Uludağ, Dumlupınar, Erciyes, S. Demirel, Niğde Üniversitelerinden araştırmacılar yer almaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı; kurulması planlanan Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) kompleksinin bir parçası olan Proton Hızlandırıcısı tesisinde üretilebilecek radyoizotop potansiyelinin belirlenmesidir. Tezin ilk bölümünde, Türk Hızlandırıcı

Merkezi Projesi'nin önemi, hedefleri ve kurulacak tesislerin tanıtımı yapılacaktır; ikinci bölümde, hızlandırıcılar, hızlandırıcı tipleri, proton hızlandırıcıların kullanım alanları, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Proton Hızlandırıcısı tesisinin radyoizotop üretim potansiyeline yer verilecektir; üçüncü bölümde, hesaplamalarda kullanılan nükleer modeller, dördüncü bölümde hesaplama yöntemleri ve bilgisayar programları tanıtılacaktır. Beşinci bölümde araştırma bulguları; altıncı bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilecektir.

1.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi

1.1.1. Projenin Hedefleri

Projenin genel amacı, Türk Hızlandırıcı Merkezi'nin Teknik Tasarım Raporunun yazılması ve (Technical Design Report, TDR) ve Test laboratuvarlarının kurulması olarak tanımlanmıştır.

Proje Ankara Üniversitesinin koordinatörlüğünde Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP) formatında yürütülmektedir. Projede Ankara, Gazi, Boğaziçi, İstanbul, Uludağ, Dumlupınar, Erciyes, S. Demirel, Niğde Üniversitelerinden 110 araştırmacı görev almaktadır. Bu projenin hedefleri 3 başlık altında toplanabilir.

1.1.1.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi Test Laboratuvarının Kurulması

Malzeme, biyoteknoloji, yarı iletken, medikal ve fotokimya araştırmalarında kullanmak ve hızlandırıcı teknolojileri ile tanışmak amacıyla 20-50 MeV'lik elektron lineer hızlandırıcısına dayalı kızıl ötesi serbest elektron lazeri (IR-FEL) üretecek bir TAC Test Laboratuvarı inşa edilecektir. Bu tesis kurulurken aynı enerji, mod ve dalga boyu aralığında çalışan iFEL (Osaka, Japonya), Duke Mark III (Duke University, USA), SUT-FEL (Tokyo, Japonya), SDALINAC (Darmstadt, Almanya), CLIO (Fransa), DAIMOND (İngiltere) laboratuvarları örnek alınarak ve bu merkezlerin deneyimlerinden yararlanılacaktır. Ayrıca FEL

teknolojileri ve uygulamaları açısından çok önde gelen DESY (Almanya) araştırma merkezi ile mevcut işbirliği olanakları kullanılacaktır. Laboratuarda oluşturulacak 2 demet hattı ve 4 deney istasyonu ile yeni malzemeler, yarı iletkenler, biyoteknoloji, medikal ve fotokimya alanlarında kaliteli lazerler ile araştırma ve uygulamalar gerçekleştirilecektir.

1.1.1.2 Türk Hızlandırıcı Merkezinin Teknik Tasarım Raporunun Yazılması

Bu raporda 1. ve 2. aşamalarda ön araştırmaları yapılan;

- Lineer elektron hızlandırıcısı ile pozitron sinkrotronundan gelen elektron ve pozitron demetlerinin çarpıştırılması ile oluşturulacak çeşitli parçacık fabrikası seçenekleri (ϕ , ψ , τ) ve fizik araştırma potansiyellerinin,
- Pozitron halkasından elde edilecek 3. nesil Sinkrotron Işınımının (SI), demet hatlarının, deney istasyonlarının ve kullanım alanlarının,
- Lineer elektron hızlandırıcısından elde edilecek 4. nesil Serbest Elektron Lazerlerinin (SEL), demet hatlarının, deney istasyonlarının ve kullanım alanlarının,
- 1÷5 GeV'lik proton hızlandırıcısının (linak veya sinkrotron) oluşturulacak müon ve nötron demetleri hatlarının, deney istasyonlarının ve kullanım alanlarının teknik tasarımı yapılacaktır.

Bu teknik tasarım raporu (TAC TDR) ileride oluşturulacak Türk Hızlandırıcı Merkezinde kullanılacak parçacık kaynaklarından hızlandırıcı modüllerine, kullanılacak magnetik örgüden magnetlere, vakum siteminden soğutma sitemine, kontrol odasından demet hatlarına, dedektörden optik demet hatlarına, deney istasyonlarında kullanılacak donanımdan yapılacak deneylere kadar her türlü alt sistemin teknik tasarımını içerecektir.

1.1.1.3 Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsünün Kurulması

Projenin amaçları doğrultusunda kurulması planlanan Enstitü'nün kuruluş kararı 26.02.2010 tarihli ve 27505 sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. Enstitü bünyesinde Hızlandırıcı Fiziği ve Teknolojileri, Hızlandırıcıya Dayalı Işınım

Kaynakları ve Dedektör ve Veri İşleme Teknolojileri Ana Bilim Dalları oluşmasına yönelik gerekçeler ve lisansüstü eğitim programları oluşturulmuş onay için YÖK'e sunulmuştur. Enstitü web sayfası 13.04.2010 tarihinde yayına başlamış ve Enstitü'nün hizmet binalarının açılışı da 9 Mayıs 2011 tarihinde gerçekleştirilmiştir (<http://hte.ankara.edu.tr>).

Enstitünün diğer amaçları şöyle sıralanabilir:

- 21. yüzyılın stratejik teknolojilerinden birisi olan Hızlandırıcı Teknolojileri konusunda ülkemize öncülük etmek,
- Parçacık Hızlandırıcıları konusunda araştırma ve uygulamalar yapmak ve yaptırmak,
- Parçacık Hızlandırıcıları konusunda yetişmiş insan gücü açığını kapatmak ve bu amaçla bilimsel etkinlikler düzenlemek,
- Parçacık Hızlandırıcıları konusunda ülkemize bilgi ve teknoloji transferi gerçekleştirmek,
- Parçacık Hızlandırıcıları ile endüstriyel ve teknolojik uygulamalar gerçekleştirmek,
- Ülke içindeki araştırmacı ve kullanıcıların hızlandırıcılara dayalı ihtiyacını giderecek tedbirleri almak ve planlamaları yaparak hayata geçirilmesini sağlamak
- Parçacık Hızlandırıcıları konusunda ulusal, bölgesel ve uluslararası işbirliğini koordine etmek

1.1.2. Projenin Önemi

21. yüzyılda Bilim ve Teknolojiye yatırım yaparken 5 sorunun cevabı iyi aranmalıdır. Bu soruları hangi alanda, hangi hedefe yönelik olarak, hangi kaynakla, hangi altyapı ve hangi insan gücü ile araştırma olarak belirleyip ve sorularının cevabını şu şekilde verebiliriz.

Hangi alan sorusuna her ülke öncelikli Ar-Ge alanlarını belirleyerek cevap vermektedir. Ülkemizde son dönemde bu anlamda ciddi çalışmalar yapılmıştır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde Yüksek Enerji Fiziği ve Nükleer Fizik öncelikli Ar-Ge alanları içerisinde yer almaktadır. Hızlandırıcı teknolojileri ise 21. yüzyılın jenerik teknolojileri arasındadır. Bu alanlar ve teknolojiler ülkemizde de öncelikli alanlar arasına acilen alınmalı ve gerekli yatırımlar geciktirilmemelidir.

Gelişmiş ülkeler bu alanlara toplam Ar-Ge bütçelerinin yaklaşık %3'ünü ayırmaktadırlar. Ülkemizin Ar-Ge bütçesi temel alındığında bu üç alana ayrılması gereken miktar 60 Milyon USD civarındadır. Bunun yaklaşık 40 Milyon doları ise yıllık hızlandırıcı teknolojileri alanındaki yatırımlara ayrılmalıdır.

Hangi hedefe yönelik sorusunun doğal olarak cevabı net; Halkın refah düzeyini ve yaşam kalitesini artırma hedefine yönelik. Örneğin bir tedavi için gereken radyoizotopu hızlandırıcı kullanıp üretmek yerine her defasında binlerce dolar ödeyerek almak zorunda kalınıyorsa bu halkın yaşam kalitesinin doğrudan etkilenmesi demektir.

Hangi kaynakla sorusunun cevabı ise genel bütçeden (GSMH) Ar-Ge faaliyetlerine ayrılan payla şeklinde verilebilir. Bu pay gelişmiş ülkelerde %4-5 sınırlarını zorlarken ülkemizde reel olarak henüz %1 düzeyine ulaşmamıştır.

Hangi alt yapı sorusunun cevabı Ar-Ge için seçilen model ve yapılanma ise ilgilidir. Ülkemizde Ar-Ge çalışmaları ~ %70 oranında üniversitelerde yapılmaktadır. Son yıllarda ülkemizde Teknokent, Teknoloji Geliştirme Merkezi, Teknopark, KOSGEB Tek-Mer, Yüksek Teknoloji Enstitüleri v.b. kavramlar sıkça duyulmaya başlandıysa da öncelikli Ar-Ge alanlarında Ulusal Araştırma Laboratuvarlarının olmaması büyük bir alt yapı eksikliğidir. Bu proje ile kurulacak Ulusal Enstitü ve Laboratuvarlar hızlandırıcılar alanında bu eksikliği giderecektir.

Hangi insan gücü ile araştırma sorusu cevabı en zor sorudur. Ülkemizde, tam gün eşdeğerli araştırmacı sayısı TÜBİTAK verilerine göre 30.000, on bin faal çalışan başına düşen Ar-Ge personeli ise 17 civarında. Bu rakamlar 70 milyonluk ülkemiz için hiçbir istatistiğe (Örneğin AB ortalamaları) cevap verecek düzeyde değildir. Proje kapsamını oluşturan, deneysel yüksek enerji fiziği, hızlandırıcı fiziği ve deneysel nükleer fizik alanlarında doktoralı eleman sayısı maalesef olması gerekenin (AB ortalaması ülke başına: ~1000) 20'de biridir. Mevcut sayısının ise neredeyse yarısı projemizin üyesi haline gelmiştir.

Projenin içeriği ve hedefleri yukarıdaki 5 soruya ülkemiz açısından olumlu cevap verebilmeye önemli katkı sağlayacaktır. En önemli iki özgün değer ise ülkemizi jenerik teknolojilerin Ar-Ge'de kullanımı ile tanıştırmak ve bu alanda yetişmiş insan gücüne katkı sağlamak olacaktır. Proje üyesi olup bu süreçte doktorasını tamamlayacak genç araştırmacı sayısı 40 civarındadır. YUUP aşamasında yapılacak

hızlandırıcı ve detektör tasarımı çalışmaları ülkemizde ilk kez gerçekleştirilecektir. Özellikle detektörler özel malzeme, elektronik, veri iletimi, depolanması ve işlenmesi gibi birçok alanda özel ihtisas gerektirdiği için bu konuda gösterilecek başarı birçok alanın önünü açacaktır.

Ülkemizde bilimsel araştırma, uygulama ve geliştirme amacıyla kurulmuş olan herhangi parçacık hızlandırıcısı veya sinkrotron ışınımı ve serbest elektron lazeri kaynağı mevcut değildir. Dünyada ekonomik anlamda, bilimsel üretim anlamında, mühendislik, endüstri ve teknolojik anlamda en gelişmiş üç ülkede (Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avrupa Birliği) yoğunlaştığını anlamak pek zor olmayacaktır. Nanoteknoloji, Biyoteknoloji, Savunma, Uzay, Çevre, Gıda, Malzemeler, Enerji, Bilgisayar, İletişim v.b teknolojilerinin gelişmiş ülkelerin hayatındaki rolü veya bir başka deyişle bu laboratuarlara ve teknolojilere sahip olmayan (örneğin ülkemiz gibi) ülkelerin dışa bağımlılıklarının ölçüsü günlük hayatımızda çevremize veya ana harcama kalemlerimize bakınca kolayca anlaşılabilir. Hızlandırıcıların ve ışınım kaynaklarının sadece sağlık, beyaz eşya, otomotiv, gıda ve çevre konularındaki kullanım alanları gerçekleştiği takdirde bile ülkemizdeki yaşam kalitesi ve zenginlik düzeyi hissedilir düzeyde artacak ve gelişmiş ülke olma yolunda önemli bir mesafe alınmış olacaktır.

Parçacık hızlandırıcıları jenerik teknoloji olarak parçacık kaynakları, yüzey ve ara yüzey, yeni malzemeler, elektronik, yazılım, vakum, magnet, soğutma, RF görüntüleme, diagnostik ve radyoterapi, veri işleme, veri iletim ve işleme alanlarında teknolojinin gelişimine lokomotiflik yapmaktadır. Dalga boyu aralığı 0.1 ila 10.000 Angström aralığında değişen 3. nesil (Sinkrotron Işınımı) ve 4. Nesil (Serbest Elektron Lazeri) ışınım kaynaklarının kullanım alanları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Teknoloji: Spektroskopide yeni yöntemler, yüksek performanslı optik cihazlar, kalibrasyon ve radyasyon standartlarının geliştirilmesi, Magnet teknolojisi, RF mühendisliği, Süper iletken malzemeler, X-ışını litografisi, ileri nano ve akıllı malzemelerin geliştirilmesi, kaliteli yüzeylerin ve ara yüzeylerin elde edilmesi v.b.

Tıp ve Biyoloji: Biyokimyasal ve biyofiziksel süreçlerin kontrolü ve kinematığı, UV ve X-ışını spektroskopisi, radyografi, Akışkan yüzeylerde kompleks

biyomoleküllerin yapısının incelenmesi, X-ışını anjiyografisi ve tomografisi, tıbbi sterilizasyon, radikal ve hücre araştırmaları v.b.

Kimya: Katalizli reaksiyonlar, fotokimya, elektron spektroskopisi ile kimyasal analiz, ışımaya tahribatının incelenmesi, polimerik yapıların incelenmesi, iz elementlerini analizi, kimyasal kinetik süreçlerin takibi v.b.

Fizik: Katıların elektron yapısı, yüzeylerin ve arayüzeylerin özelliklerinin çalışılması, kristalografik analizler, atomik ve moleküler yapıların çözümlenmesi, foto-elektron spektroskopisi, X-ışını optiği, X-ışını spektroskopisi, Tomografi, İnelastik X-ışını saçılması, Compton saçılması, Yarı iletken yapıların ve arayüzeylerin analizi v.b

1.1.3. Proje Kapsamında Kurulacak Tesisler

1.1.3.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarım Çalışmaları

Dünyadaki benzerleri incelendiğinde, ulusal bazda oluşturulacak böyle bir laboratuvar merkezinin 4 aşamada ortaya çıkarıldığı bir gerçektir. Önerilen ulusal merkez için aşamalar aşağıdaki gibi gelişmiş ve gelişmesi planlanmıştır

Buna göre birinci aşamadaki fizibilite raporunda; DPT tarafından desteklenerek 1997-2001 yılları arasında araştırma grubumuzca hayata geçirilen DPT-97K-120420 No'lu "Parçacık Hızlandırıcıları: Türkiye'de Neler Yapılmalı" isimli araştırma projesi ile hızlandırıcıların dünyadaki durumu değerlendirildikten sonra ülkemiz şartlarında gerçekleştirilebilecek en uygun hızlandırıcı projesi olarak Ulusal Hızlandırıcı Merkezinin (THM) (Turkish Accelerator Center, TAC) fizibilite çalışması yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda 4 ana hedefi olan bir ulusal hızlandırıcı merkezi önerilmiştir. Bu 4 ana hedef şunlardır:

- a) Elektron ve Pozitron demetlerinin çarpıştırılması ile parçacık fabrikasında (ϕ fabrikası) parçacık fiziği araştırmaları yapmak,
- b) Pozitron sinkrotronuna dayalı sinkrotron ışınımı üretmek ve kullanmak,
- c) Elektron lineer hızlandırıcılarına dayalı serbest elektron lazeri üretmek ve kullanmak,
- d) Proton hızlandırıcısına dayalı araştırmalar yapmak.

Fizibilite çalışması sonucunda ortaya konulan sonuçlar 2001'de Ankara'da düzenlenen "I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi"nde sunulmuştur.

Projenin ikinci aşamasını teşkil eden ve İçerik Tasarımını oluşturma süreci ise yine araştırma grubumuz tarafından DPT desteği ile yürütülen iki proje ile 2002 yılından başlayarak sürdürülmüştür. Bu iki proje Gazi Üniversitesinden Prof. Dr. Saleh Sultansoy'un yürütücülüğünü yaptığı DPT2002K-120250 No'lu "Türk Hızlandırıcı Kompleksinin Genel Tasarımı" ve Ankara Üniversitesinden Prof. Dr. Ömer Yavaş'ın yürütücülüğünü yaptığı DPT2003K-1201906-5 No'lu "Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron Lazeri Üretimi ve Kullanımı için Genel Tasarım" isimli projelerdir. Bu iki proje 2006 yılı başlarında tamamlanmış ve hızlandırıcıların ana parametreleri, teknolojileri ve genel kullanım alanları belirlenmiştir. Dünyadaki gelişmelerin yakından izlendiği bu araştırmalarda örneğin parçacık fabrikası açısından phi mezonların, charm mezonlarının ve tau mezonlarının üretimi ve bozunumları detaylıca incelenmiş ve charm fabrikası seçeneği öne çıkarılmıştır. 3. nesil sinkrotron ışınımı için pozitron halkası üzerinde kaç demet hattı olacağı ve ne tür magnetlerin (insertion device) kullanılacağı tespit edilmiştir. 4. nesil ışınım olan serbest elektron lazerleri için SASE ve Osilatör modda optimizasyonlar yapılarak ana parametreler belirlenmiştir. Proton sinkrotronunun da ana parametreleri belirlenerek, nötron ve müon demetleri ile yapılabilecek araştırmalar araştırılmıştır. Bu aşama için geliştirilen sonuçların bazıları 2004 yılında Ankara'da organize edilen "II. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi" sunulmuştur

Önceki aşamalarda ortaya konulan öngörüler üçüncü aşama olarak ele alınmıştır. Buna göre; Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi temelde linak-halka tipli elektron-pozitron çarpıştırıcısı bazında charm fabrikasının kurulmasına dayandırılmıştır. Charm fabrikasında kütle merkezi enerjisi 3770 MeV olup rezonansa üretim için 3560 MeV'lik pozitron sinkrotronuna teğet olarak inşa edilecek 1000 MeV'lik lineer elektron demetlerinin çarpıştırılması planlanmaktadır. Türk Hızlandırıcı Merkezin'de kurulacak olan bu hızlandırıcılar aynı zamanda Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron Lazeri elde edilebilecek ışınım kaynakları olarak da kullanılacaklardır. Türk Hızlandırıcı Merkezi'de kurulacak olan Proton Hızlandırıcısı ise bir Lineer hızlandırıcı (linac) veya bir sinkrotrondan oluşacaktır.

Temelde üç ana başlık altında “Parçacık Fabrikası”, “Işınım Kaynakları” ve “Proton Hızlandırıcısı” şeklinde toparlayabileceğimiz Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Teknik Tasarım çalışmalarının sonuçları aşağıda belirtilen alt başlıklar olarak belirlenmiştir.

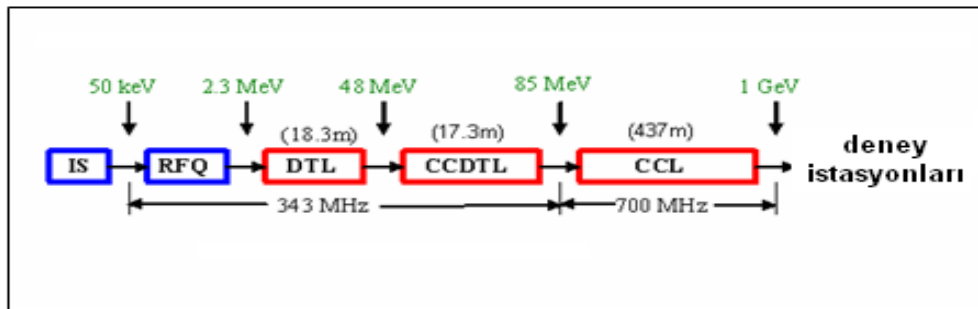
1.1 - Türk Hızlandırıcı Merkezi Parçacık Fabrikası Teknik Tasarımı

1.2 - Türk Hızlandırıcı Merkezi Işınım Kaynakları Teknik Tasarımı

1.3 - Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı Teknik Tasarımı

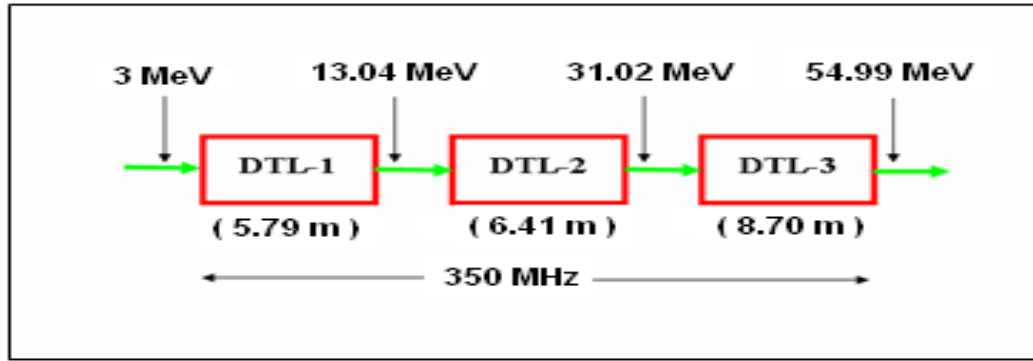
1.1.3.2. Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı Teknik Tasarımı

Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında kurulması planlanan proton hızlandırıcısından 1 MW güçlü ve 1 veya 3 GeV enerjili proton demeti üretimi planlanmaktadır. Dünyadaki lineer proton hızlandırıcılarına baktığımızda tipik bir lineer proton hızlandırıcısının düşük ve orta enerjili kısmı; iyon kaynağı (IS), düşük enerjili demet taşıma kanalı (LEBT), radyofrekans kuadrupol hızlandırıcısı (RFQ), orta enerjili demet taşıma kanalı (MEBT), drift-tüp linac hızlandırıcısı (DTL) ve son olarak ise birleştirilmiş kaviteli drift-tüp linac (CCDTL) kısımlarından oluşmaktadır. Bu yapılar ile 100 MeV’lik enerjiye yaklaşmış olunur. Yüksek enerjili kısım için ya süperiletken kaviterler ya da CCL tipli bir normal iletken hızlandırıcısı kullanılarak 1 GeV’lik enerjiye ulaşmak planlanmaktadır.



Şekil 1.1 Normal iletken yapılarla 1 GeV’e ulaşılan hızlandırıcının blok diyagramı

Şekil 1.1 ve şekil 1.2’ de gösterildiği gibi, Proton hızlandırıcısında mA mertebesinde akıma sahip H^- iyonları hızlandırılacaktır. Sonrasında ise iyon demeti ince bir yapraktan geçirilerek protonlara dönüştürülecektir. Yük değişimi denilen bu olayda, iyonlar fazla elektronlarından kurtulacaktır. Başlangıçta sürekli yapıda olan demet, RFQ hızlandırıcısında paketli veya pulslu bir yapıya dönüştürülecektir. MEBT kısmında ise chopper işlemi yapılarak demetin puls uzunluğu kısaltılacaktır. Dolayısıyla demetin puls yapısı, RFQ ve MEBT kısımlarında şekillenecektir. Bundan sonraki hızlandırıcı kısımlarında (DTL ve sonrası); demetin puls yapısı korunacaktır ve küçük emittans büyümesine sahip kararlı bir demet elde edilmeye çalışılacaktır (Çalışkan A.,Yılmaz M., (2007), Çalışkan A.,Yılmaz M., (2009)).



Şekil 1.2 55 MeV’lik DTL hızlandırıcısının blok diyagramı

Proton hızlandırıcı tesisi çok amaçlı bir tesis olacağı için bazı kısa ve uzun- dönemli teknik ve bilimsel hedeflerimiz mevcuttur. Bu proton hızlandırıcı tesisi uzun vadede nötron kaynağı, radyoaktif iyon demeti kaynağı ve hızlandırıcı güdümlü alt kritik reaktör teknolojisinin test edilebileceği bir birim olarak hizmet verebilecek MW sınıfı bir tesis olacaktır. Kısa vadede ise 3 MeV lik bir test stanttan başlayarak 100 MeV’ lik enerji bölgesine uyarlanabilecek alt tesisler düşünülmüştür. Bunu üç aşamada sınıflayabiliriz. İlk aşamada göz veya yüzey tümörlerinin tedavisi 3 MeV’ lik test standın kurulmasıyla yapılabilir. İkinci aşamada ise, 3 MeV’ lik test standından elde edilen protonların uygun hedeflerde bombardıman edilmesi sonucunda ortaya çıkan nötronlar yavaşlatılarak bazı malzemelerin iç yapısının görüntülenmesinde yani nötron radyografi de kullanılacaktır. Son aşamadaki kısa dönem hedefimiz ise 55 MeV’ lik (şekil1.2) veya 100 MeV’ lik hızlandırıcıdan elde

edilen protonlar ile daha yüksek demet enerjisi gerektiren ^{82}Sr ve $^{73,75}\text{Se}$ gibi izotoplar üretilebilecek ışınlama ve radyo izotop tesisi kurmaktır.(YUUP projesi VIII. altı aylık gelişim raporu (Temmuz –Aralık 2009 dönemi)).

2. HIZLANDIRICILAR

Yüksek teknolojinin üretimine dayanan gelişmiş bir ekonomi, günümüzde devletleri güçlü kılan en önemli faktörlerden birisidir. Yüksek teknolojilerin geliştirilmesi ve üretilmesi hiç kuşkusuz temel bilimsel araştırmalara dayanmaktadır. Hızlı ve sürekli gelişmenin temelinde, ülke özellikleri göz önünde tutularak hazırlanan, etkin bir bilim ve teknoloji stratejisinin uygulanması yatmaktadır (DPT'2002K120250 nolu DPT projesi Sonuç Raporu, 6-8 (2006)).

Yüklü parçacık hızlandırıcılarının amacı, istenen enerjide belirli türdeki parçacık demetini bir hedef üstüne göndermektir. Bu işi başarmak için, birbirinden farklı elektrik ve manyetik alan düzeneklerini kullanan çeşitli yöntemler vardır.

Hızlandırıcıların tasarımı hangi amaç için kullanacaklarına bağlı olarak önemli değişiklik gösterir. Bazı durumlarda yüksek enerji bazı durumlarda ise yüksek yoğunluk gereklidir.

Hızlandırıcıları kabaca düşük, orta ve yüksek enerjili hızlandırıcılar olarak sınıflandırabiliriz. Düşük enerjili hızlandırıcılar 10-100 MeV arasında enerjileri olan demetler üretmek için kullanılır. Orta enerjili hızlandırıcılar yaklaşık olarak 100-1000 MeV arasında çalışır. Bu enerjilerde nükleonların çekirdeklerle çarpışmalarında π mezonları yayınlanabilir. Yüksek enerjili hızlandırıcılar 1 GeV (1000 MeV) ve daha yüksek enerjili demetler üretir. Amaçları nükleer yapıyı araştırmaktan çok yeni parçacık çeşitleri üretmek ve onların özelliklerini incelemektir.

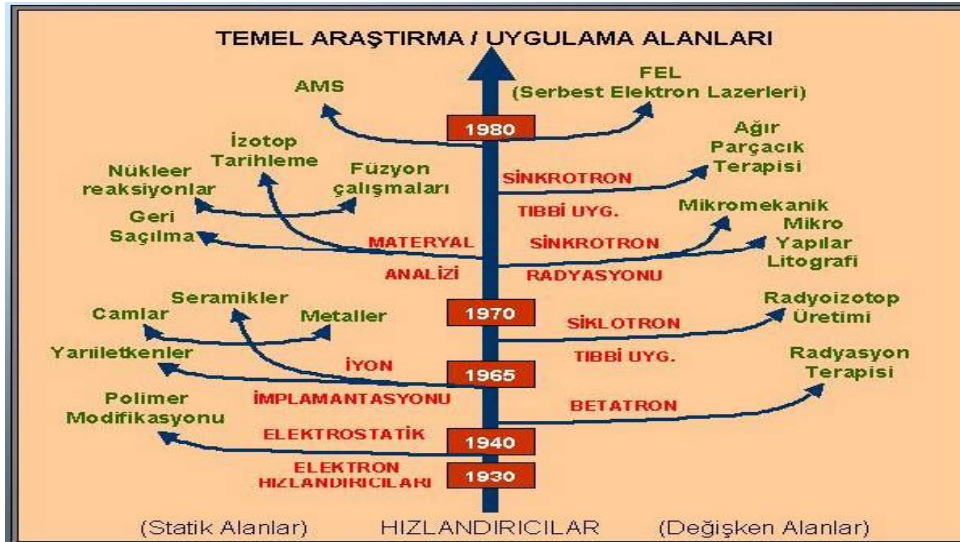
Genel bir hızlandırıcının parçalarını; iyon kaynağı, parçacık demetini odaklayan ve istenen yol üzerinde bükülmesini ve saptırılmasını sağlayan taşıma(demet optiği) sistemi, demetin yönünü değiştiren ve bileşenlerine ayıran bükücü mıknatıslar ve hedef bölgesi oluşturur. Son olarak her hızlandırıcının enerjisini, zamanını ve yönünü kaydetmek için kullanılan saptama ve analiz aygıtları da mevcuttur (Krane,Kenneth S.(2006))

Çizelge 2.1. Hızlandırıcıların kullanım alanları ve sayıları (Yavaş, UPHUK III)

Kullanım alanı	Sayı
İyon implantasyonu ve yüzey modifikasyonu	7000
Radyoterapi	5000
Endüstriyel uygulamalar	1500
İzotop üretimi	200
Parçacık fiziği ve nükleer fizik deneyleri	110
Sinkrotron ışınımı ve FEL uygulamaları	70
Hadronterapi	20
Diğer	1000
Toplam	≈15000

Hızlandırıcıların 300'den fazla kullanım alanları vardır. Mesela, İnsan Geni Haritalanması (GENOM) Projesi'nde DNA'ların yüzde 90'ını hızlandırıcılar kullanılarak çözülmüştür. Diğer taraftan, iyon hızlandırıcıları ise mikro elektronik alanında büyük gelişmeler sağlamıştır (Rubbia, C. vd., (1994)).

Dünyada 15 binden fazla orta ve büyük çaplı hızlandırıcılar vardır. Bunlardan sadece 110'u parçacık ve nükleer fizikte temel araştırmalar için kurulmuştur, kalanlar ise tıp ve sanayi başta olmakla birlikte diğer alanlarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Hızlandırıcıların temel araştırma ve uygulama alanları

2.1. Hızlandırıcı Çeşitleri

2.1.1. Elektrostatik Hızlandırıcıları

Yüklü bir parçacığı hızlandırmanın en kolay yolu, onu sabit bir V gerilim farkı içine düşürmektir. Parçacığın yükü q ise, qV kinetik enerjisini kazanır. Hızlandırıcılarda elde edilebilecek en yüksek gerilim farkı 10^7 V' dir. Bu gerilim farkı altında iyonlar birim yük başına 10 MeV mertebesinde bir enerji kazanır. Nükleer yapıyı incelemek için yapılan çoğu deneyde bize gerekli olan enerji tam olarak bu enerjidir. Bu yüzden bütün dünyadaki fizik laboratuvarlarında bu tip hızlandırıcılar bulunur.

Elektrostatik hızlandırıcıların teknolojisi bir yüksek gerilim terminali yaratıp iyon kaynağından gelen yüklü parçacıkların hızlanmasını sağlamaktadır. Nükleer fizik uygulamaları için bu tip hızlandırıcılarda ilk gelişme 1932'de oldu. Cockcroft ve Walton 800 kV gerilime ulaşan bir aygıt yapmayı başardılar. Bu Cockcroft-Walton hızlandırıcısı günümüzde nötron kaynağı üretmek ve daha yüksek enerjili hızlandırıcılar için parçacık, özellikle proton enjektörü olarak kullanılmaktadır. Bu hızlandırıcıya ek olarak Vande Graaf hızlandırıcısı elektrostatik hızlandırıcılara örnek olarak verilebilir (Krane,Kenneth S.(2006)).



Şekil 2.2. Cockcroft-Walton hızlandırıcısı

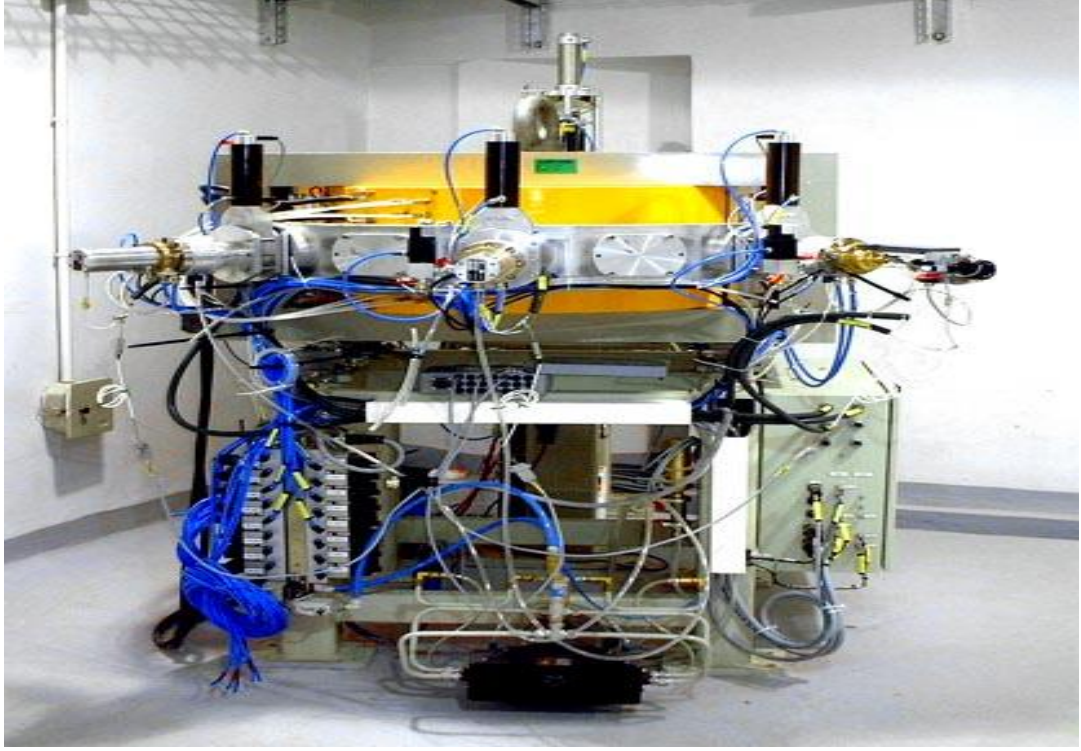


Şekil 2.3. Wande Graff Hızlandırıcısı

2.1.2. Siklotron hızlandırıcıları

Rezonans hızlandırıcısı olarak da adlandırılan siklotronlar tek adımlı elektrostatik hızlandırıcılara alternatif olarak tasarlanmış dairesel hızlandırıcılardır. Yüklü parçacık demetleri belirli bir hızlandırma düzeneğinden, kapalı yörüngelerde defalarca geçirilerek devirsel yolda ardışık hızlandırma işlemine tabi tutulur. Siklotron tipi hızlandırıcıların ilk örneği Ernest O. Lawrence tarafından Berkeley Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarı'nda geliştirilmiştir. Lawrence, geliştirdiği buluşu ile 1939 yılında Nobel Fizik Ödülünü almıştır. 1944 yılında Lawrence ve ekibi "Manhattan Projesi" kapsamında 100 MeV enerjili 180 inçlik siklotronu tasarlamıştır. 1960'lara kadar siklotronlar nükleer fizik araştırmaları için en çok tercih edilen hızlandırıcı tipi olmuştur. 1980'lere gelindiğinde özellikle mini siklotronların medikal ve ticari kullanımı artmış, bu amaçla PET radyoizotoplarının üretimi için kompakt siklotron (baby cyclotron) sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır (Yalçın, 2008).

Siklotronda, yüklü parçacıklar, güçlü manyetik alan tarafından dairesel yörüngede harekete zorlanmakta, diğer taraftan bir veya daha fazla geçit içinde RF salınımlı gerilim tarafından hızlandırılmaktadırlar. Geçitten geçen parçacıklar, elektrot içerisinde hareketlerine devam ederlerken elektrik alan perdelenir. Parçacıklar, bir sonraki geçide geldiklerinde, zamanla değişen voltajın fazı 180 derece değiştirildiğinden tekrar hızlanırlar. Bu işlem tekrarlandıkça ve manyetik alan sabit tutulursa, parçacıklar dışa doğru açılan spiral yörünge üzerindeki hareketlerine hızlanarak devam ederler. Parçacıklar güçlü manyetik alanın sınırına geldiklerinde, buradaki biçimlendirilmiş manyetik alanın da yardımıyla bir demet halinde siklotronun dışarı çıkarlar. Parçacıkların yolları üzerinde atom veya moleküllere rastlayıp çarparak hız kaybetmemeleri için, hızlandırma işinin, vakumlanmış bir tüpün içinde yapılması gerekir. Eğer tüp bir doğru şekilde ise, 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 arttırır. Bunun alternatifi, ek bir manyetik alan uygulamak suretiyle, parçacıkları dairesel yörüngeler üzerinde döndürerek hızlandırmaktır. Bu seçeneğe göre inşa edilen dairesel hızlandırıcılara, hızlandırma işlemi için kullanılan alan türlerine ve şekillerine bağlı olarak, 'siklotron' veya 'senkrotron' denir (Yalçın, 2008).



Şekil 2.4. Siklotron tipi hızlandırıcı

2.1.3. Siklotron Tipi Hızlandırıcının Çalışma Prensibi

Bir iyon kaynağından elde edilen ^-H iyonları enjeksiyon hattı ve bu enjeksiyon hattının sonunda bulunan inflektör vasıtasıyla siklotronun merkez düzlemindeki spiral yörünge başlangıcına düşürülür.

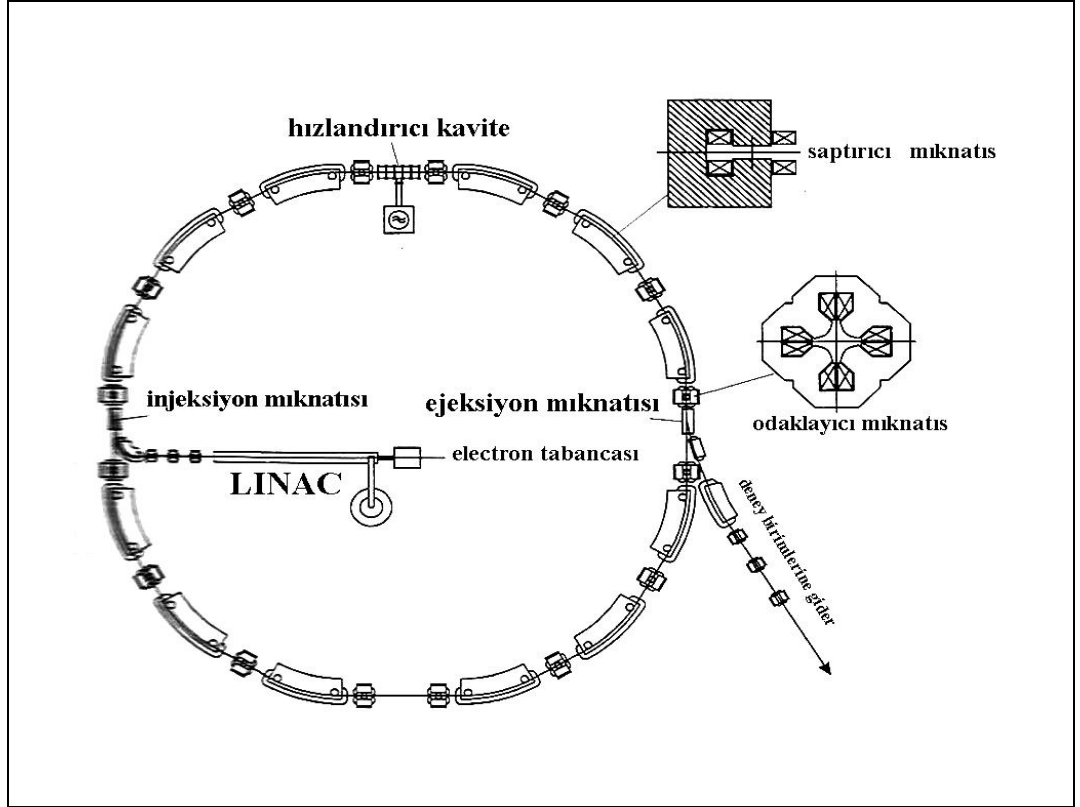
İyonlar bu merkez noktadan başlayarak mıknatıs kavimleri içerisine mevcut RF sistemi tarafından uygulanan alternatif gerilim vasıtasıyla hızlandırılır.

Düşük basınçlı vakumlu bir ortamda gittikçe hızlanan ^-H iyonları merkezden dışarıya doğru spiral bir yörünge izleyerek, arzu edilen enerji seviyesine karşılık gelen çıkış yarıçapına kadar hızlandırılır. Bu çıkış yarıçapına yerleştirilen karbon folyoya (ekstratör) çarpan ^-H iyonları iki elektronunu kaybederek ^+H (proton) haline dönüşür (<http://www.taek.gov.tr/>).

2.1.4. Sinkrotron Hızlandırıcısı

Sinkrotron parçacık demetinin bir veya daha fazla RF alanlarla hızlandırıldığı ve mıknatıslar yardımıyla sabit yarıçaplı bir yörüngede tutulduğu dairesel hızlandırıcılardır

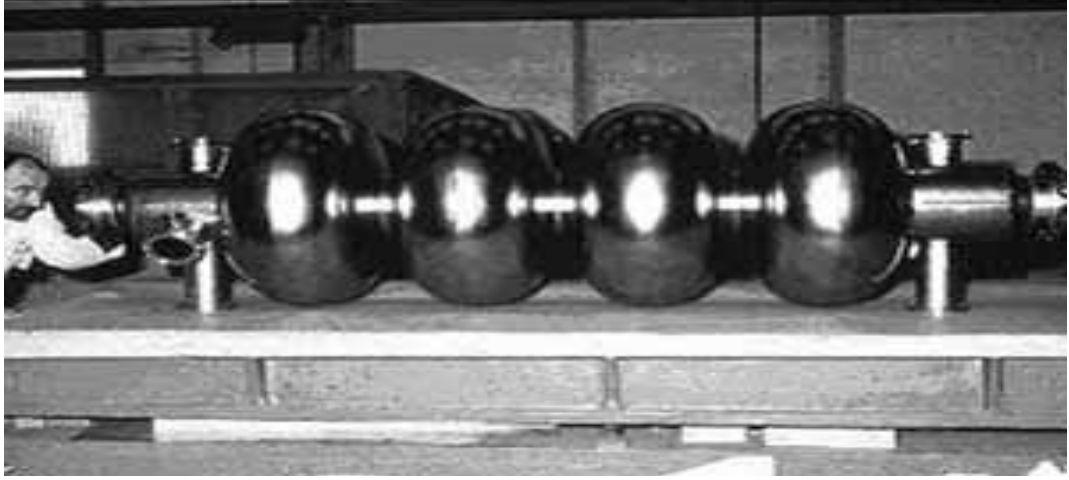
Elektronların hızlandırılması sonucu oluşan yüksek enerjili elektron demeti istenilen istikamete kullanılan mıknatıslar yardımıyla yöneltir. Oluşan Sinkrotron radyasyonu diğer klasik yöntemlerle oluşturulan X-ışınlarından farklı özelliklere sahiptir. Bu özellikler, doğa bilimlerini araştırma konusunda neredeyse sınırsız bir araştırma alanı açmış olmakla birlikte tıp alanında da teşhis ve tedavi amaçlı olarak kullanım imkanı vermiştir (Ertürk ve Boztosun, 2004).



Şekil 2.5. Sinkrotronun temel yapısı (Blogger, 2007).

Şekilde bir sinkrotronun önemli elemanları gösterilmektedir. Parçacıklar aynı yörüngelerde binlerce kez devir yaptıkları için ister istemez birbirlerinden

uzaklaşmaktadır. Bunu önlemek için yakınsak (odaklayıcı) mıknatıslar kullanılmaktadır.

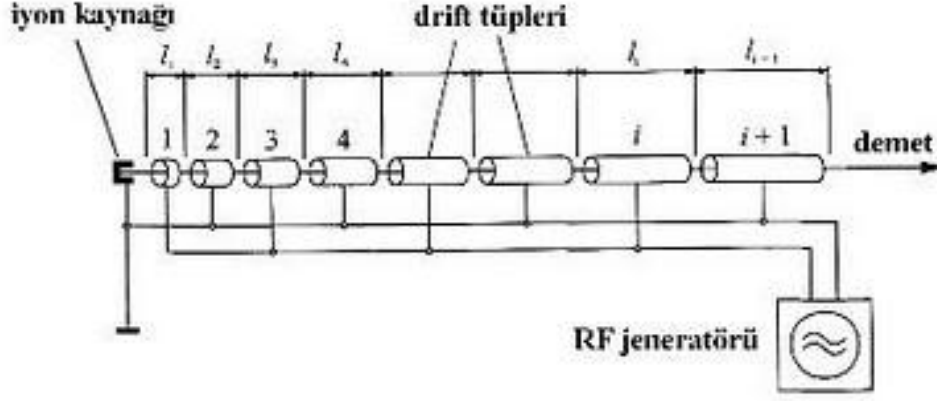


Şekil 2.6. Radyo frekans kavitesi

Sinkrotron, parçacığı hızlandırmak için bir yada birden fazla RF kaynağı bulundurabilir. Sinkrotronun L çevresi, dalgaboyunun tam katı olmalıdır. $L = q\lambda RF$ (senkronizim koşulu). Parçacıklar ancak bu sayede her defasında aynı fazda hızlandırıcı bölgeye gelmektedir. Sinkrotronlarda, eğer hızlandırılan parçacık elektron λ ise kendiliğinden elektromanyetik bir ışınım yayınlanmaktadır. Parçacığın enerjisi arttıkça yayınlanan radyasyonda artmaktadır.

2.1.5. Lineer Hızlandırıcılar

Radyo frekansı kullanılarak çalışan lineer hızlandırıcılarda iyonların küçük potansiyel farkları kullanılarak tekrar hızlandırılması gerekliliği problemi yoktur. Lineer hızlandırıcılarda, lineer bir tüp içerisine belli sayıda elektrot yerleştirilmiş bir düzeneğe iyonlar enjekte edilir. Elektrotların her iki tarafına uygulanan alternatif voltaj uygun şekilde belli aralıklarla sıralanmış elektrotların fazları değiştirilerek hareketlenen iyonların hızlanmaları sağlanır.



Şekil 2.7. Wideroe lineer hızlandırıcısı (Blogger, 2007).

Şekil 2.7’ de 1928 yılında R. Wideroe tarafından tasarlanan lineer hızlandırıcı ile 50 KeV’ lik pozitif iyonlar hızlandırılmış ve ikinci dünya savaşından sonra hem elektron hem de proton hızlandırmak için kullanılmıştır. Stanford Üniversitesi’nde bulunan 3 km uzunluğundaki lineer hızlandırıcı, en uzun lineer hızlandırıcı olup, 50 GeV enerji mertebesine kadar elektron veya pozitron hızlandırmaktadır.

2.2. Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı İçin Radyoizotop Üretim

Potansiyelinin Araştırılması

Türk hızlandırıcı merkezi projesi kapsamında 55 MeV’ lik veya 100 MeV’ lik hızlandırıcıdan elde edilen protonlar ile daha yüksek demet enerjisi gerektiren ^{82}Sr , $^{128,129}\text{Ba}$ ve ^{72}Se (bu radyoizotoplar yaygın olarak tıp, endüstri ve tarımda kullanılmaktadır) gibi izotoplar üretilebilecek ışınlama ve radyo izotop tesisi kurulması amaçlanmaktadır. TAEK’in 30 MeV’ lik protonları kullanarak radyoizotop üretimini planlamasından dolayı 30 MeV ve üzeri bir tesis kurarak ülkemizde üretilmeyen tıpta ve endüstride kullanım alanları olan izotoplar üretilecektir. Aşağıdaki tabloda 30 MeV’in üzerinde üretilebilecek radyoizotoplara örnek verilmektedir (INR Linear Proton Hızlandırıcısı Troitsk, Moskova).

Çizelge 2.2. 30 MeV üzerinde üretilebilecek radyoizotoplar (DPT-YUUP projesi VIII. Altı aylık gelişim raporu(Temmuz-Aralık 2009 Dönemi)).

Radvoizotop	Yarı ömrü	Hedef	Enerji aralığı(MeV)
⁸² Sr	25,3 gün	Rb	20-100
²² Na	2,6 yıl	Mg, Al	35-150
¹⁰⁹ Cd	453 gün	In	80-150
¹⁰³ Pd	17 gün	¹⁰³ Rh	5-40
⁶⁸ Ge	288 gün	Ga, GaNi	15-50
⁶⁷ Cu	62 saat	⁶⁸ Zn	20-100
⁶⁴ Cu	12,7 saat	Zn	40-150
^{117m} Sn	14 gün	Sb	40-150
²²⁵ Ac	10 gün	Th	30-150
²²⁵ Ra	11,4 gün	Th	30-150
⁷² Se	8,5 gün	GaAs	45-60
¹²³ Xe	2,08 saat	¹²⁷ I	40-140
¹²⁵ Xe	17 saat	¹²⁷ I	30-160
¹²⁸ Ba	2,43 gün	¹³³ Cs	50-100
¹²⁹ Ba	2,2 saat	¹³³ Cs	40-100
^{131mg} Ba	12 gün	¹³³ Cs	20-100
¹³³ Ba	10,7 yıl	¹³³ Cs	5-60
¹²⁴ I	4,18 gün	¹²⁴ Te	5-30
⁹¹ Nb	700 yıl	⁹³ Nb	20-100
⁹⁰ Mo	5,67 saat	⁹³ Nb	20-100

Kurulacak proton hızlandırıcı tesisi çok amaçlı bir tesis olacağı için bazı kısa ve uzun dönemli teknik ve bilimsel hedefleri mevcuttur. Bu proton hızlandırıcı tesisi uzun vadede nötron kaynağı, radyoaktif iyon demeti kaynağı ve hızlandırıcı güdümlü alt kritik reaktör teknolojisinin test edilebileceği bir birim olarak hizmet verebilecek MW sınıfı bir tesis olacaktır. Kısa vadede ise 3 MeV' lik bir test standından başlayarak 100 MeV' lik enerji bölgesine kadar genişletilebilecek alt tesisler düşünülmüştür. Proton hızlandırıcıları, daha çok geniş bir enerji aralığında nötron üretmek için kullanılır; bu nedenle üretilen nötronlar, beyaz nötronlar ya da spalasyon nötronları olarak bilinirler. Bir spalasyon nötron kaynağı, hızlandırıcıda üretilen yüksek enerjili protonların ağır metal hedefe çarptırılması sonucu nötronların üretildiği geniş ölçekli bilimsel bir tesistir. Kompleks nükleer reaksiyonlar (spalasyon) sonucunda her bir yüksek enerjili proton, 20-40 nötron üretir. Spalasyon kaynağı, yüksek akımlı pulslu nötronlar üretebilir ki, spalasyon nötron kaynağının pulslu doğası, geniş enerji spektrumundaki nötronların enerjilerini time-of-flight metodu ile ölçme imkânı verir. Proton demetiyle birçok uygulama yapılabilir. Bu uygulamaları; İyon implantasyonu ve yüzey modifikasyonu, Radyoterapi, Endüstriyel uygulamalar, Radyoizotop üretimi, Parçacık fiziği ve nükleer fizik

deneyleri, Sinkrotron ışınımı ve FEL uygulamaları, Hadronterapi ve bunların dışında proton demetlerinin daha sayamadığımız bir çok uygulama alanı bulunmaktadır (<http://lansce.lanl.gov/>, <http://www.sns.gov>, J. Wei vd.,(2009)).

2.2.1. Radyoizotoplar

Proton sayıları aynı, nötron sayıları farklı olan çekirdeklere izotop denmektedir. Bazı izotopların çekirdek yapıları kararlı, bazılarının ise kararsızdır. Kararsız olanlar kendiliğinden radyoaktif bozunum yaparak, özgün bir gama ışını ya da atom altı parçacık yayınladıktan sonra kararlı hale gelirler. Bu kararsız izotoplara radyoaktif izotop veya radyoizotop denir. Bozunma sonucunda oluşan ürün yine kararsız olabilir.

Bu durumda ikinci bir bozunum görülebilir. Söz konusu olay atom tümüyle kararlı duruma gelinceye kadar devam eder. Bu olay bozunma zinciri olarak adlandırılmaktadır.

Radyoizotoplar doğal ve yapay radyoizotoplar olmak üzere sınıflandırılırlar. Doğal radyoaktivite ilk olarak Becquerel tarafından 1896 yılında potasyum uranil sülfat üzerine yapılan bir araştırma esnasında keşfedilmiştir. Pierre ve Marie Curie, E.Rutherford ve F.Soddy doğadaki pek çok radyoaktif atomun bulunmasına katkıda bulunmuştur. Söz konusu bilim adamlarının çalışmaları bizlere doğada bulunan, atom numaraları 83'den büyük tüm elementlerin radyoaktif özellik gösterdiği sonucunu vermektedir. Yapay radyoaktivite kavramı ise ilk olarak I.Curie ve F.Joliot tarafından 1934 yılında ortaya atılmıştır. Siklotronların keşfi çok değişik yapay radyoizotopların üretilmesini kolaylaştırmıştır.

2.2.2. Hızlandırıcılarla Üretilen Radyoizotoplar

Radyoizotoplar daha çok siklotron ve reaktörlerde üretilmektedir. Radyoizotopların hangi yöntem ile üretileceğini, üretimde kullanılan ışınlayıcı parçacıkların enerjisi ve hedef çekirdek belirler. Nükleer tıpta kullanılan radyoizotopların hemen hemen hepsi yapaydır. Radyoizotopların üretimi üç farklı yoldan gerçekleştirilmektedir. Bunlar

nükleer reaktörler, siklotronlar (hızlandırıcılar) ve radyoizotop jeneratörleridir. Radyoizotop üretimindeki en önemli kriter zamandır. Kısa yarı ömürlü izotoplar kullanılacakları yerlere zamanında ulaştırılamayabilirler, bu nedenle üretim noktasından uzakta bulunan ve özellikle kısa yarı ömürlü radyoizotop ihtiyacı olan tesislerin taleplerini karşılamak için radyoizotop jeneratörleri kullanılmaktadır.

Nükleer tıpta kullanılan radyonüklidler; üretim şekline göre şöyle sınıflandırılabilir;

a) Siklotron Ürünleri:

i. Pozitron yayınlayan izotoplar: ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F

ii. Gamma yayınlayan izotoplar: ^{57}Co , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{123}I , ^{201}Tl

b) Jeneratör Ürünleri: ^{68}Ga , $^{81\text{m}}\text{Kr}$, ^{82}Ru , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ve $^{113\text{m}}\text{In}$

c) Nükleer reaktör ürünleri: ^{133}Xe , ^{99}Mo , ^{131}I

2.2.3. Radyoizotop Üretimi ve Kullanım Alanları

Tıp ve endüstride kullanılan radyoizotoplar reaktör veya hızlandırıcılar kullanılarak üretilmektedir (Qaim SM (2001)), Tarkanyi vd.,(2001)). Ticari anlamda SPECT ve PET radyoizotoplarının üretimi için hızlandırıcı olarak siklotronlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hem PET hem de SPECT radyoizotopları katı, sıvı veya gaz formundaki hedeflerin siklotrondan hızlandırılan parçacık veya iyonlarla (p, d, ^3H , ^3He , ^4He) bombardıman edilmesi sonucunda elde edilmektedir.

Hızlandırıcılarda proton (p), döteron (d), trityum (^3H), alfa (^4He) gibi yüklü parçacıklar bir demet haline getirildikten sonra, taşıyıcı demet hattı vasıtasıyla bir hedef malzeme üzerine gönderilirler. Hedef malzemenin atom çekirdekleri ile etkileşen hızlandırılmış iyonlar, enerjilerinin hedef atomuna aktarılırlar. Böylece kararlı durumdaki hedef atomun çekirdekleri uyarılarak radyoizotoplar (kararsız izotop) elde edilir.

Son yıllarda ülkemizde teşhis amacıyla nükleer tıpta kullanılmakta olan PET görüntüleme tekniği yaygınlaşmaktadır. Bu görüntüleme tekniği özellikle tekrarlanan kanser vakalarının erken teşhisi başta olmak üzere beyin ve kalp ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır. Günümüzde özellikle PET uygulamaları için ^{18}F , ^{11}C ,

^{13}N , ^{15}O pozitron yayan radyoizotopları üretilmektedir. Ancak son zamanlarda ise ^{55}Co , ^{60}Cu , ^{61}Cu , ^{64}Cu ve ^{67}Cu gibi diğer kısa yarı ömürlü radyoizotopların kullanılmasına ilişkin çalışmalar da artarak devam etmektedir.

Bu radyoizotoplardan ^{55}Co etiketleme ve ayrıca PET tekniği ile kalp ve beyin görüntülenmesinde; ^{60}Cu ve ^{61}Cu radyoizotopları tümörün yapısında bulunan hipoksik dokular ile beyin ve kalbin görüntülenmesinin yanı sıra protein ve peptitlerin etiketlenmesinde; ^{64}Cu beyin ve kalp perfüzyon çalışmalarında PET tekniği ile görüntüleme ve ^{67}Cu 'nin ise endoterapi amaçlı kullanılmasına ilişkin çalışmalar devam etmektedir. ^{57}Co ise gama spektrometreleri ve SPECT (tek foton emisyon tomografisi) sistemleri için kalibrasyon kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılan bir radyoizotoptur. Çizelge 2.3' de bazı radyoizotopların yarı-ömürleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 3.3. Bazı radyoizotoplar ve kullanım alanları (McLaughlin A.F vd.,(1994))
Bekiş R vd.,(2001)).

İzotop	Oluşma Reaksiyonu/Yarı Ömrü	Kullanım Alanları
^{91}Nb	$^{93}\text{Nb}(p,3n)^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}/ 700$ yıl	^{91}Nb süper alaşımların gücünü arttırmak için kullanılan alaşım materyali, tribiolojik uygulamalarda ince bir katman, yüksek dereceli mühendislik sistemlerinde süper iletken maddesi gibi önemli teknolojik uygulamalarda kullanılan bir metaldir.
^{75}Se	$^{75}\text{As}(p,n)^{75}\text{Se} / 119,8$ gün	Tümörlerin lokalizasyonunda kullanılır.
^{124}I	$^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I} / 4,18$ gün	Bilimsel çalışmalarda, gen terapisi ve kemoterapide kullanılır
^{103}Pd	$^{103}\text{Rh} (p,n)^{103}\text{Pd} / 16,99$ gün	Prostat kanseri tedavisinde ve terapide kullanılır.
^{133}Ba	$^{133}\text{Cs}(p,n)^{133}\text{Ba} / 10,51$ yıl	Nükleer fizik çalışmalarında gama-ışın detektörleri için standart bir kaynaktır

Çizelge 3.3 (devamı)

İzotop	Oluşma Reaksiyonu/Yarı Ömrü	Kullanım Alanları
^{131m}Ba	$^{133}\text{Cs}(p,3n)^{131m}\text{Ba}/12$ gün	Kemik dokularının lokalizasyonunda kullanılır
^{129}Ba	$^{133}\text{Cs}(p,5n)^{129}\text{Ba}/2,2$ saat	Petrol ve gaz endüstrisinde kullanılır
^{128}Ba	$^{133}\text{Cs}(p,6n)^{128}\text{Ba}/2,43$ gün	Pozitron yayınlıyıcı ^{128}Cs için jeneratör sistemde kaynak olarak kullanılır.
^{67}Cu	$^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}/2,6$ gün	Endoterapide kullanılır.
^{82}Sr	$^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}/25$ gün	Pozitron yayınlıyıcı olarak ^{82}Rn izotopu için jeneratör sistemde kaynak olarak kullanılır.
^{125}Xe	$^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}/17$ saat	Lazer dermatolojide kullanım alanına sahip, ayrıca anestetik olarak kullanılır.
^{123}Xe	$^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}/2,08$ saat	Ticari ve medikal olarak kullanılır.
^{90}Mo	$^{93}\text{Nb}(p,4n)^{90}\text{Mo}/5,67$ saat	Çeliğin yüksek sıcaklıklarda dayanımını arttırmada, hava taşıtları ve uzay araçlarının yapımında, nükleer enerji uygulamalarında, elektrik uygulamalarındaki tellerin yapımında, katalizör olarak kullanılır.

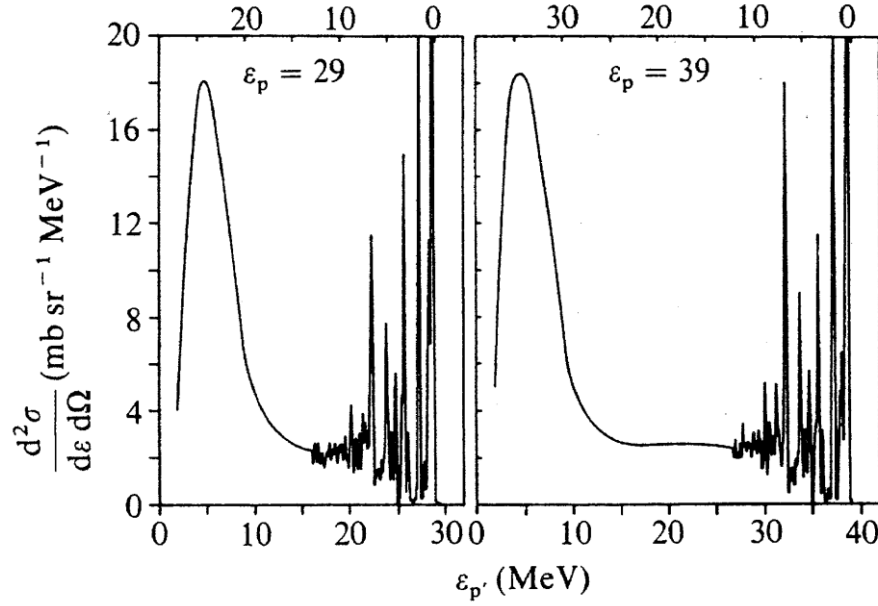
3. NÜKLEER MODELLER

Teorik tesir kesiti ve spektrum değerleri de bazı nükleer paket modeller kullanılarak hesaplanabilir. Fakat, bu hesaplanan değerlerin doğruluğu, daha önceden yapılmış deneyler ve bu deneylerin sonucunda elde edilen verileri ile karşılaştırılıp yorumlandıktan ve sahip oldukları hata payı hesabından sonra tartışılır. Hatta, bu modeller ile daha deneyi yapılamamış yüksek mertebeli enerjilere sahip olan parçacıkların bombardıman sonrası oluşacak yeni izotopları ile parçacığın tesir kesiti ve spektrumlarının hesabının mümkün olması, modellerin kullanımı cazip hale getirmiştir. Bu çalışmada kullanılan paket programlar, yoğun bir matematik işlemine sahip olan, dinamiksel Liouville ve istatistiksel metot kullanılarak nümerik çözümlerin bulunduğu, matematiğin maksimum seviide kullanıldığı denge-öncesi modelleri içerir.

3.1. Denge Öncesi Nükleer Reaksiyonlar

10 MeV'in üstündeki gelme enerjilerde; direk reaksiyon sürecinden hemen sonra, çekirdeğin istatistiksel denge durumu oluşmadan önce, parçacık yayınlanması mümkün olmaktadır. Bu süreç; denge öncesi ya da zaman zaman bileşik öncesi nükleer reaksiyonlar olarak adlandırılmaktadır. Bu reaksiyonların zaman ölçeği direk reaksiyonlar ile bileşik çekirdek reaksiyonlarının arasındadır.

İlk olarak; 1950 ve 1960'lı yıllarda yapılan deneylerden elde edilen gözlemler, direk reaksiyonu ile bileşik çekirdek reaksiyonunun dışındaki denge öncesi reaksiyon mekanizmasının varlığının göstermiştir. Elde edilen gözlemler, hem direk reaksiyon sürecinden hem de bileşik çekirdek reaksiyon sürecinden farklı sonuçlar vermektedir.



Şekil 3.1. 29 ve 39 MeV proton gelme enerjilerinde, $^{54}\text{Fe}(p,p')$ reaksiyonuna ait proton yayınlanma spektrumu

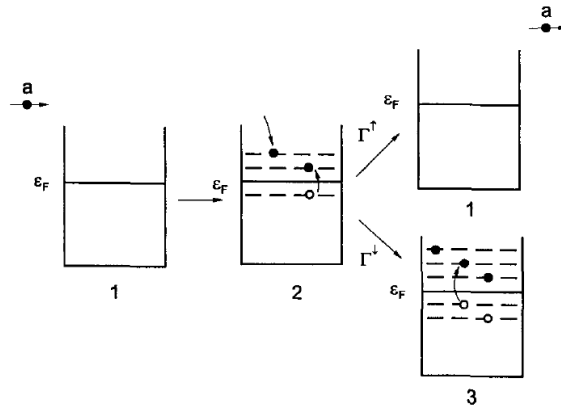
Şekil 3.1.'de verilen 40° deki $^{54}\text{Fe}(p,p')$ reaksiyonuna ait proton yayınlanma spektrumu direk reaksiyonlar, bileşik reaksiyonlar ve denge öncesi reaksiyonların analizinde kullanılabilen bir örnektir. 0–10 MeV arası bileşik çekirdek bölgesi olup, beklenildiği gibi Maxwelliyen şekline sahiptir. 50 MeV üzeri ise, keskin piklerin var olduğu direk reaksiyon sürecine ait bölgedir. 10–50 MeV arasında kalan kısım her iki sürece de uymayan, biçimsiz ve sürekli bir şekle sahip olan denge öncesi sürecine aittir. Açısal dağılımı düşük enerjilerde bileşik çekirdek gibi 90° simetrik olmasına karşın, tesir kesitleri bileşik çekirdeğinkinden büyük değere sahiptir. Yüksek enerjilerdeki yayınlanan parçacık açısal dağılımı ise; direk reaksiyon sürecindeki gibi ileri yönlü pike sahip olmasına karşın, kırınım yapısı bulunmamaktadır (Gadioli ve Hodgson, 1992; Hodgson vd., 2003; Shirokov ve Yudin, 1982).

Çekirdekle etkileşen parçacığın enerjisi ilk olarak bir veya iki hedef çekirdek nükleonuna aktarılır. Enerjinin bir kısmı aktarılan nükleonlarda diğer nükleonlarla etkileşerek aktarımı sürdürür. Bu durumda; hedef çekirdekle parçacık etkileşme süreci, seri aşaması olarak ele alınır ve nükleon-nükleon etkileşmesi ile ifade edilir. Bu aşama, exciton sayısı ($n=p+h$) olarak adlandırılan parçacık (p) - boşluk (h) çifti sayısı ile karakterize edilir. Boşluk durumu; Fermi enerjisi altında uyarılan tek parçacığın, uyarıldıktan sonra maksimum Fermi enerjisi (E_f) seviyesi üzerine geçişi

sebebiyle oluşan ayrılmış nükleon durumudur. Nükleer durum, bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi ve Fermi yüzeyinin üstündeki parçacıkların ve altındaki hollerin toplam miktarı olan exciton numarası ile tanımlanmıştır. Seri aşamaların her birinde parçacık (denge öncesi parçacıkları olarak adlandırılır) yayınlanması mümkündür. Uyarılma enerjisi her yeni aşamada aynı biçimde nükleonlar arasında dağıldığından, kimi parçacık yayınlanma olasılığı aşamadan aşamaya düşmektedir. Nihayetinde, bileşik çekirdek istatistiksel denge durumuna gelir. Eğer mümkünse, temel duruma geçinceye kadar parçacık yayınlayabilir. Parçacık gelme enerjisi ne kadar küçük ise, denge öncesi parçacıkların yayınlanma olasılığı da o kadar küçük olur.

Çekirdeğin uyarılmış durumu, E_f enerjisinden büyük iki parçacık (yakalanan parçacık ve uyarılan nükleon) ve E_f enerjisinden küçük bir boşluk durumunun olduğu ilk aşamadan sonra oluşur. Bu durum, door-way durumu olarak adlandırılır ve $2p1h$ (iki parçacık, bir boşluk) olarak gösterilir.

Çekirdeğin temel duruma döneceği sonraki aşamada, ilk parçacığın aynı enerji ve momentumla yayınlanması mümkün olabilir. Bu durum, denge öncesi sürecin elastik saçılmasını oluşturur. Bu tür elastik saçılma süreci Γ^\uparrow son genişliği ile karakterize edilir (Şekil 3.1.). Diğer taraftan, E_f enerjisinden büyük enerjiye sahip olan parçacık çekirdeğin diğer nükleonları ile etkileşir. Bu durumda, E_f enerjisinden büyük üç parçacık ve E_f enerjisinden küçük iki boşluktan oluşan bileşik sistemin $3p2h$ durumu oluşur. Bu durum Γ^\downarrow genişliği ile gösterilir. Bileşik sistem oluşumunun seri aşamaları bu iki duruma benzer şekilde düşünülebilir.



Şekil 3.2. Nükleon-çekirdek etkileşmesinin farklı aşamaları: 1- etlileşmeden önceki çekirdek; 2- $2p1h$ door-way durumu; 3- $3p2h$ durumu; a- gelen parçacık

Böylece, uzun süreli bileşik çekirdek, giderek karmaşıklaşan durum sayısı ile bir dizi orta durumdan geçerek, çok sayıdaki iki parçacık nükleon-nükleon etkileşiminden sonra oluşur. Başka bir deyişle; bileşik sistem oluşum sırasında, yapılandırma hiyerarşisi olarak adlandırılan bir dizi ortaya çıkar (Berezhnoy, 2005).

Denge öncesi yayınlanma için toplam tesir kesiti, kaskattaki her bir aşamanın yayınlanma tesir kesitlerinin toplamıdır. Bu durumda, eğer; σ_c bileşik çekirdeğin başlangıç aşamasındaki oluşum tesir kesiti, reaksiyon tesir kesitine eşit olduğu varsayılabilir ve P_1 bu aşamadaki yayınlanma olasılığı ise, denge öncesi yayınlanma sürecine ilk katkı $\sigma_c P_1$ olur. Bu süreç, direk reaksiyonlarla birlikte elastik saçılma gibi diğer süreçlerle de birlikte ele alınabilir. İlk aşamadan ikinci aşamaya geçiş olasılığı $\lambda_{1,2}$, ikinci aşamadan yayınlanma olasılığı P_2 ise, ikinci aşama için denge öncesi yayınlanma tesir kesiti $\sigma_c \lambda_{1,2} P_2$ olur ve benzer şekilde devam eder. Böylece; toplam direk ve denge öncesi tesir kesiti,

$$\begin{aligned} \sigma_{Di} + \sigma_{D\bar{o}} &= \sigma_c P_1 + \sigma_c \lambda_{1,2} P_2 + \sigma_c \lambda_{1,2} \lambda_{2,3} P_3 + \dots \\ &= \sum_N P_N \prod_{k=1}^N \lambda_{k-1,k} \end{aligned} \quad (3.1)$$

olur. Burada; $\lambda_{0,1} = 1$ 'dir (Hodgson vd., 2003).

Denge öncesi reaksiyonları açıklamak üzere birçok çalışma yapılmış, çeşitli modeller hazırlanmıştır. Yayınlanan parçacık spektrumunu başarılı bir şekilde veren ilk model, Griffin'in çalışmaları (Griffin, 1966; 1967a, b; 1968) ile sonuçlanan exciton model'dir. Bu model; geniş aralıktaki deneysel verilerin analizi kullanılarak, çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirildi. Diğer bir önemli model; Harp-Miller-Berne tarafından ortaya konulan çalışmalardır (Harp vd., 1968; Harp ve Miller, 1971). Blann (1971) tarafından hazırlanan hibrit model, Griffin ve Harp-Miller-Berne modellerinin bakış açılarını birleştiren bir modeldir ve çok geniş kullanılabilen bir formülasyona sahiptir. Blann (1972) daha sonra bu modeli düzenleyerek geometri bağımlı hibrit modeli hazırlamıştır. 1971'de ve daha sonraki çalışmalarda (Bertrand ve Peelle, 1973; Serber, 1947b; Metropolis vd., 1958; Bertini vd., 1974) intranükleer

cascade modeli de denge ve denge öncesi bölgesine dahil edilmiştir. Sonra; yapılan kuantum mekaniksel çalışmalarla (Feshbach vd., 1980; Tamura vd., 1982; Nishioka vd., 1986, 1988, 1989) yayınlanan parçacık açısal dağılımı hesaplanmıştır (Běták ve Hodgson, 1998; Blann, 1975).

3.2. Exciton model

Denge öncesi sürecin ilk başarılı teorisi, verilen parçacık ve enerji ile oluşan tüm reaksiyonların açı integralli tesir kesitleri ve yayınlanan parçacık enerji dağılımını oldukça iyi hesaplayabilen exciton modeldir (Griffin, 1966). Bu yarı klasik model, yayınlanan parçacığın açısal dağılımının ana hatlarını da tahmin edebilmektedir ancak; açısal dağılımın daha kesin tahminleri için kuantum mekanik teorisi kullanılması gerekmektedir (Hodgson vd., 2003).

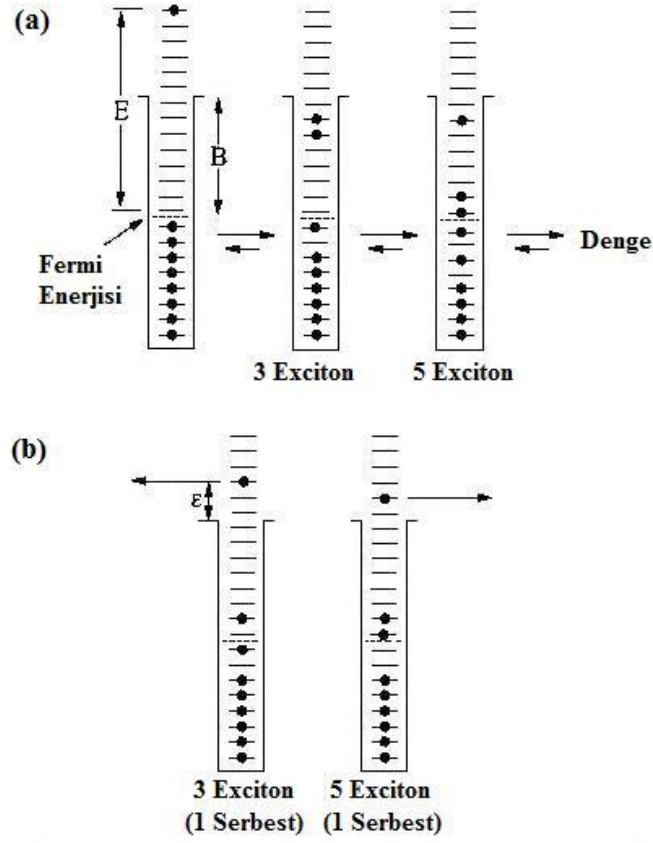
Bileşik çekirdek durumları herhangi bir nükleon-nükleon kaskat aşamasındaki uyarılmış parçacık (p) ve boşluk (h) sayıları ile karakterize edilmiştir. Başlangıç yapılanması (konfigürasyon), gelen parçacık doğası ile belirlenmiştir. Örneğin; gelen bir nükleonsa, ilk aşamada $2p1h$ yapılanması oluşur ve artan exciton sayısı ($n=p+h$) ile karakterize olan ve tam bir denge ile sonuçlanan bir dizi durumların ortaya çıkmasına neden olur (Hodgson vd., 2003). Exciton modelde; parçacık yayınlanma olasılığı hesabı, n_0 başlangıç exciton sayısı durumundan \bar{n} denge değerine kadar tüm durumların katkısı toplanarak yapılır (Blann, 1975).

İki cisim etkileşmesindeki kısıtlamalar, kaskat etkileşmelerinin akışındaki parçacık sayısı (p), boşluk sayısı (h) ve exciton sayılarının olası farklı durumlarına ilişkin seçim kurallarına yol açar.

$$\Delta p = 0, \pm 1 \quad \Delta h = \pm 1 \quad \Delta n = \pm 2 \quad (3.2)$$

İki ayrı kaskat aşamasında exciton modeline göre parçacık yayınlanma olasılığı Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. İlk kısımda (a) gelen parçacık bir nükleonu uyarır, ($n=3$) ve devam ederek bir başka nükleon uyarılır ($n=5$). Nükleonların tümü bağlı olduğundan, bu aşamalarda parçacık yayınlanması mümkün olmamaktadır. Bileşik çekirdek dengeye geldikten sonra yayınlanma olabilir. (b) ikinci kısımda ise, gelen

parçacık çarptığı nükleonları serbest duruma getirir ve aşamalardan birinde yayınlanma söz konusu olabilir (Hodgson vd., 2003).



Şekil 3.3 Exciton modeline göre, nükleon girişli bir reaksiyonun ilk birkaç aşamasının şematik gösterimi

Exciton model gelen parçacık ve hedef çekirdek arasındaki ilk etkileşmeden sonra uyarılmış sistemin karmaşık bir dizi aşamadan geçtikten sonra dengeye ulaşabildiğini varsayar ve bu aşamaların her birinden yayınlanma mümkün olabilir (Griffin, 1966). Karmaşıklığın farklı aşamaları uyarılmış parçacık ve boşluk sayısına göre sınıflandırılır ve exciton model hesaplamaları, ana denklemin bir dizi çözümünü içerir.

Exciton model, Cline (1972) ve Ribansky vd., (1973) tarafından verilen master denklemlerinin çözümüne dayanır.

$$\begin{aligned}
-q(n, t=0) &= \lambda^+(E, n+2)\tau(n+2) + \lambda^-(E, n-2)\tau(n-2) \\
&\quad - [\lambda^+(E, n) + \lambda^-(E, n) + W_l(E, n)]\tau(n)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

burada $q(n, t=0)$; başlangıç şartıdır, $\tau(n)$; sistemin $n=p+h$ excitonlu bir durumda kalma zamanı, W_l ; n excitonlu durumun birim zamandaki toplam bozunum ihtimali, E ; bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi, λ^+ ve λ^- sırasıyla; $n \rightarrow n+2$ ve $n \rightarrow n-2$ durumları için geçiş ihtimalleridir. Nükleonlarla oluşturulan reaksiyonlar için başlangıç parçacık sayısı $p_0 = 2$, başlangıç deşik sayısı $h_0 = 1$ dir. (Aydın vd., 2004).

Exciton model iki temel varsayımı kullanmıştır. (1) kaskatın her bir aşamasındaki aynı yapılanmalı, aynı enerjili ve pariteli durumlar eşitlenebilme olasılığıdır. (2) kaskatın her bir aşamasında ortaya çıkabilecek tüm süreçler eşitlenebilme olasılığıdır. Bu varsayımlar; kaskatın büyük exciton sayılarında yaklaşık olarak doğru iken, birkaç excitonun uyarıldığı kaskatın başlangıcında, varsayımların geçerliliğinde başarısızlık olasılığı vardır.

İlk varsayım, excitonların enerji dağılımını verir. $dN_p(p, h, E, \varepsilon)$, ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasındaki E toplam enerjili p ve h yapılanmış excitonların sayısı (enerji dağılımı), ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında enerjisi bulunan bir parçacık ve geriye kalan $E - \varepsilon$ enerjiye sahip $p-1$ ve h durum sayısı ile E enerjili p, h yapılanmalı durum sayılarının arasındaki oranı ile verilir. Eğer; E enerjili p ve h yapılanmalarının durum yoğunluğu $\rho_{p,h}(E)$, $E - \varepsilon$ enerjili $p-1$ ve h yapılanmalarının durum yoğunluğu $\rho_{p-1,h}(E - \varepsilon)$ ve $g = 1/d$ tek parçacık durum yoğunluğu (Fermi gaz model yaklaşımı $g = 3A/2\varepsilon_F$) ise,

$$dN_p(p, h, E, \varepsilon) = P_p(p, h, E, \varepsilon) = \frac{\rho_{p-1,h}(E - \varepsilon) g d\varepsilon}{\rho_{p,h}(E)} \tag{3.4}$$

olur. Burada; çekirdeğin E enerjili p ve h yapılanmalarının durum yoğunluğu $\rho_{p,h}(E)$ ile verilir.

Exciton modelin ikinci varsayımı, çeşitli reaksiyonların tesir kesitinin ve verilen bir aşamadaki excitonların olası enerjideki geçiş hızlarının değerlerinin tahminini kolaylaştırmaktadır. Dağılım olasılığından (Denklem (3.4)) yola çıkarak; parçacık yayılımı için bozunma hızı hesaplanabilir. p ve h yapılanmalı bir durumdan, $\varepsilon_v = \varepsilon - E_B$ (E_B parçacığın bileşik çekirdekteki bağlanma enerjisi) enerjili sürekli bölgedeki bir parçacık durumuna yayılım için bozunma hızı $\lambda_{p,h,v}(E, \varepsilon_v)$,

$$\Gamma_{p,h,v}^{\uparrow}(E, \varepsilon_v)d\varepsilon_v = \lambda_{p,h,v}(E, \varepsilon_v)d\varepsilon_v = P_p(p, h, E, \varepsilon)d\varepsilon_v \left(\frac{\sigma_{inv}(\varepsilon_v)v\rho_v(\varepsilon_v)}{gV} \right) \quad (3.5)$$

ile verilir. Burada, $\sigma_{inv}(\varepsilon_v)$; parçacık ters tesir kesiti, v ; parçacığın çekirdek dışındaki hızı, g ; çekirdekteki tek parçacık durum yoğunluğu, V ; hacim, $\rho_v(\varepsilon_v)$ yayımlanan parçacığın sürekli durumlarının yoğunluğudur ve Fermi gaz modeli ile

$$\rho_v(\varepsilon_v) = \frac{1}{\pi^2 \hbar^3} \frac{(s_v + 1)m_v \varepsilon_v V}{v} \quad (3.6)$$

şeklinde verilmektedir.

Proton ve nötron yayılımı için bozunma hızları Denklem (3.5)'den

$$\lambda_{p,h,v}(E, \varepsilon_v)d\varepsilon_v = \frac{1}{\pi^2 \hbar^3} \frac{A}{A+1} \frac{1}{\rho_{p,h}(E)} \times (2s+1)mK_{p,h}\sigma_{inv}(\varepsilon_v)\varepsilon_v\rho_{p-1}(E - \varepsilon - E_B)d\varepsilon_v \quad (3.7)$$

olarak yazılabilmektedir. A ; kalan çekirdeğin kütlesi, m ; proton ya da nötronun kütlesi, s ; spin ve $K_{p,h}$; yük korunum düzeltme katsayıdır. Bu bozunma hızı; Weisskopf-Ewing modelinin bileşik çekirdekten buharlaşma hızı ile benzerdir ancak, tek fark; bileşik çekirdek seviye yoğunluğu yerine parçacık (p), boşluk (h) durum yoğunluğu kullanılmasıdır (Gadioli ve Hodgson, 1992).

Exciton-exciton etkileşimi bozunma hızlarının (ya da iç geçiş hızlarının) değişimi ancak Denklem (3.2)'den exciton sayısının 0 ya da ± 2 olması durumunda söz konusu olabilir. Exciton-exciton etkileşimi için bozunum hızı zamana bağımlı perturbasyon teorisi ile,

$$\Gamma_{n,n'}^{\downarrow}(E) = \lambda_{n,n'}(E) = \frac{2\pi}{\hbar} \overline{|M|^2} \rho_f \quad (3.8)$$

şeklinde verilir. Burada $n' = n$ yada $n' = \pm 2$, ρ_f nükleon-nükleon etkileşiminde uyarılan durumların yoğunluğu ve $\overline{|M|^2} = KA^{-3}E^{-1}$ ortalama kare matris elemanıdır. K değeri, 400 ile 700 MeV arasında değişir. Exciton-exciton etkileşimi için bozunum hızları; ρ_f 'nin exciton sayısıyla yükselmesinden dolayı, intranükleer kaskatın başlangıcında ve yüksek uyarılma enerjilerinde,

$$\lambda_{n,n+2} > \lambda_{n,n} > \lambda_{n,n-2} \quad (3.9)$$

olur. Burada baskın olan, $n \rightarrow n+2$ geçiştir. $n \rightarrow n-2$, $n \rightarrow n$ ve $n \rightarrow n+2$ geçiş durumlarına ait hızlar,

$$\lambda_{n,n-2} = \frac{2\pi}{\hbar} \overline{|M|^2} g \frac{ph(n-2)}{2} \quad (3.10)$$

$$\lambda_{n,n} = \frac{2\pi}{\hbar} \overline{|M|^2} \frac{1}{2} \frac{p(p-1) + h(h-1) + 4ph}{2n} g^2 E \quad (3.11)$$

$$\lambda_{n,n+2} = \frac{2\pi}{\hbar} \overline{|M|^2} \frac{g^3 E^2}{2(n+1)} \quad (3.12)$$

bağıntıları ile verilir (Gadioli ve Hodgson, 1992).

3.3. Hibrit model

Hibrit model (Blann, 1971); E enerjili $n = p + n$ exciton yapılanmalı bileşik çekirdekten ε_v kanal enerjili v tipi bir parçacığın (bir proton ya da bir nötron) yayınlanma olasılığını vermektedir. İfade; $\varepsilon = \varepsilon_v + E_B$ uyarılma enerjili bir parçacığın bileşik çekirdekte bulunma olasılığına bağlı olarak parçacığın sürekli bölgeye bozunma hızı $\lambda_v(\varepsilon)$ 'nin, birim zamandaki çarpışma olasılığı $\lambda_{1p}(\varepsilon)$ ve $\lambda_p(\varepsilon)$ toplamı olan toplam parçacık bozunma hızına oranı ile verilmiştir. Exciton modelde olduğu gibi; nükleon-nükleon etkileşim kaskatında, bileşik çekirdek giderek artan exciton sayısı ile birlikte karmaşık bir aşamadan diğer bir aşamaya geçtiğini varsayar. Denge öncesi bozunum için hibrit model,

$$\sigma(\varepsilon_v)d\varepsilon_v = \sigma_R P_v(\varepsilon_v)d\varepsilon_v \quad (3.13)$$

$$P_v(\varepsilon_v)d\varepsilon_v = \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=+2}}^{\bar{n}} \left[{}_n X_v N_n(\varepsilon, U) / N_n(E) \right] g d\varepsilon_v \left(\frac{\lambda_v(\varepsilon)}{\lambda_v(\varepsilon) + \lambda_{1p}(\varepsilon)} \right) D_n^h \quad (3.14)$$

ile verilir. Burada, σ_R ; reaksiyon tesir kesiti, ${}_n X_v$; n exciton durumundaki v tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısı, $P_v(\varepsilon_v)d\varepsilon_v$; enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında sürekli bölgeye yayınlanan v tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısını gösterir. Ayrıca, E bileşik sisteminin uyarılma enerjisi ve U kalan çekirdek uyarılma enerjisi olmak üzere, $N_n(\varepsilon, U)$; $\varepsilon = \varepsilon_v + E_B$ enerjili yayınlanan bir parçacık ve $U = E - \varepsilon_v - E_B$ enerjili kalan $n-1$ exciton durumları sayısı, $N_n(E)$; E toplam uyarılma enerjisindeki n exciton durumlarının toplam sayısıdır. D_n^h (azaltma faktörü); bir n - exciton zincirindeki başlangıç popülasyon kesiti, g ; tek-parçacık durum yoğunluğudur. Denklem (3.14)'deki köşeli parantez içindeki nicelik sürekli bölgede enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında olan parçacık sayısını verir. n excitonlu durum sayısı $N_n(E)$, $\rho_n(E)/g$ ile eşit olduğundan nötron proton ayırımı yapmadan bu kısım,

$${}_n X_\nu N_n(\varepsilon, U) / N_n(E) \approx \frac{\rho_{n-1}(E - \varepsilon)}{\rho_n(E)} \quad (3.15)$$

şeklinde verilir. İkinci parantez içindeki ifade ise, sürekli bölgeye geçiş hızının toplam geçiş hızına oranıdır. Sürekli bölgeye geçiş hızı,

$$\lambda_\nu(\varepsilon) = (2i_\nu + 1) \frac{\mu_\nu \varepsilon_\nu \sigma_{inv}(\varepsilon_\nu)}{\pi^2 \hbar^3 g} \quad (3.16)$$

ile verilir. Burada i_ν ; nükleon spinini μ_ν ; indirgenmiş kütle ve σ_{inv} ; ters tesir kesitidir. Uyarılmış parçacığın Fermi seviyesi altındaki parçacıklarla çarpışma hızı,

$$\lambda_{1p}(\varepsilon) = V \sigma_0 \bar{\rho} \quad (3.17)$$

ile verilir. Burada V ; parçacığın çekirdek içersindeki hızı, σ_0 ; nükleon-nükleon saçılma tesir kesiti, $\bar{\rho}$; ortalama nükleer madde yoğunluğudur (Blann, 1971, 1975; Gadioli ve Hodgson, 1992).

3.4. Geometri bağımlı hibrit model

Nükleon girişli reaksiyonların analizinde, nükleer yüzeyden kaynaklanan bir spektral katkının olduğu görüldü. Denge öncesi nükleer reaksiyonlarda yüksek etki parametresi yoluyla nükleer yoğunluk dağılımının önemini araştırma amaçlı Blann tarafından sunulan Geometri Bağımlı Hibrit (GBH) Model (Blann, 1972),

$$\frac{d\sigma(\varepsilon_\nu)}{d\varepsilon_\nu} = \pi \tilde{\lambda}^2 \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell + 1) T_\ell P_\nu(\ell, \varepsilon_\nu) \quad (3.18)$$

denklemini ile formüle edilmiştir. Burada, $\tilde{\lambda}$; gelen parçacığın indirgenmiş de Broglie dalga boyu, ℓ ; gelen parçacığın yörünge açısız momentumu (\hbar biriminde), T_ℓ ; gelen parçacık için ℓ -inci kısmi dalganın optik model ile hesaplanabilen geçiş

katsayısıdır. $P_\nu(\ell, \varepsilon_\nu)$; Denklem (3.14) ile benzer olup, yoğunluğa bağımlılığı Fermi enerjisi, nükleon yoğunluğu ve etki parametresi için ortalama giriş kanal yörüngesi gibi temel parametrelerin kısmi değerleri hesaba katılarak sağlanmıştır. GBH model hesaplamasında Fermi yoğunluk dağılım fonksiyonu kullanılmıştır. R_ℓ yarıçapındaki Fermi nükleer yoğunluk dağılımı,

$$\rho(R_\ell) = \bar{\rho} [\exp(R_\ell - c) / Z + 1]^{-1} \quad (3.19)$$

ile ifade edilir. Burada, $\rho(R_\ell)$; R_ℓ yarıçapındaki yoğunluk, $c = 1,07A^{1/3}$ fm ve $Z = 0,55$ fm ve ℓ inci kısmi dalga için yarıçap $R_\ell = \lambda(\ell + 1/2)$ dir.

Nükleer yoğunluğunun Denklem (3.18)'te iki şekilde etkisi vardır. Açık olan ilk etkisi, $\bar{\rho} / \langle \rho(R_\ell) \rangle$ oranının azalması ile ortalama serbest yolun ($\bar{\lambda} = 1 / \rho \sigma$) artmasıdır. Yüksek etki parametrelerinde ortama serbest yol değeri, çekirdek içine göre, kayda değer biçimde artmaktadır. Ortalama serbest yolun artması, parçacık yayınlanma olasılığının artmasıyla sonuçlanmaktadır.

Nükleer yoğunluğun ikinci etkisi, ilgili bölgedeki Fermi enerjisinin ve potansiyel kuyu derinliğini değiştirmesidir. Boşluk enerjisi,

$$\varepsilon_F(R) = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2}{2} \rho(R) \right)^{2/3} \quad (3.20)$$

ile verilen Fermi enerjisinin yerel değerleri ile sınırlandırılmıştır ve böylece boşluk enerjisi değerinin Fermi enerjisinin değerini aşması engellenmiştir. Yüksek etki parametresinde Fermi enerjisi sıfıra yaklaşır ve bunun sonucunda uyarılma enerjisi sadece uyarılan parçacıklar arasında paylaşılır ve parçacıklar daha fazla ortalama enerjili olurlar.

Fermi enerjisine uyarak ölçülen potansiyel derinlik, her bir reaksiyon için

$$V(R_\ell) = 40[\langle \rho(R_\ell) \rangle / \bar{\rho}]^{2/3} \quad (3.21)$$

olarak alınır. Potansiyel kuyunun derinliğinin değişmesi az da olsa g tek parçacık durum yoğunluğunu etkilemektedir.

$$g = g(R) = [40/V(R)A/28] \quad (3.22)$$

olarak tanımlanır ve böylece yoğunluk g değerinin bir fonksiyonu olur (Blann, 1971, 1975; Blann ve Vonach, 1983; Gadioli ve Hodgson, 1992).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Protonlarla oluşturulan reaksiyon tesir kesitleri özellikle nükleer fizikte ve tıp biliminde önemli yer tutar. Bu tür reaksiyonların oluşturulması sırasında materyallerin yapısını etkileyecek değişimler oluşabilmektedir. Bu problemlerin öneminin anlaşılabilmesi ve sorunların giderilebilmesi için tesir kesitlerinin ve yayınlanma spektrumlarının deneysel olarak ölçülmesi ve önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için de teorik hesaplamaların yapılabilmesi gerekir. Örnek olarak, gönderilen parçacığa göre hangi enerji aralığında maksimum tesir kesiti olabileceğini, ya da gönderilen parçacığın enerjisinin hangi aralıkta olması gerektiğini görmek için bu hesaplamaların önemi ortaya çıkmaktadır. Diğer bir açıdan da, nükleer fiziğin sahip olduğu temel problemlerinin aşılabilmesi için bu modellerin nükleer reaksiyonlarda oynadığı rolü teorik olarak kestirmek ve deneysel olarak gözlemek gereklidir. Nükleer reaksiyonların daha detaylı olarak enerji bağımlılığı bilinmediğinden çok sayıdaki farklı enerjiler için tesir kesitlerinin ve spektral yayınlanma şeklinin incelenmesi önemlidir. Örneğin, reaktörlerde üretilen geçici çekirdekler genellikle kısa yarı ömürlüdür. Dolayısıyla, bu çekirdeklerin tesir kesitlerinin ve yayınlanma spektrumlarının doğrudan ölçülmesi pek mümkün olamamaktadır. Bu sebeple, zaman kazanılması açısından yapılacakların en önemlisi bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanmasıdır.

Nükleer fizik biliminin uygulama alanları hayatımızda önemli yerlere sahip olması nedeniyle bu bilim üzerine araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Teoriksel çalışmaların da katkısıyla (önceden tahmin etme, beklenen değerlerin bilinmesi ve deneysel çalışmalara yön verme gibi), nükleer uygulama alanları artmakta ve hayatımızı kolaylaştırmaya devam etmektedir.

4.1. Hesaplama Yöntemi

Bu çalışmada, gelme enerjileri (20-130) MeV arasında olan protonlar kullanılarak, ^{124}Te , ^{103}Rh , ^{85}Rb , ^{93}Nb , ^{209}Tl , ^{133}Cs , ^{127}I hedef çekirdekleri için (p,xn) reaksiyon tesir kesitleri hesaplandı. Hesaplamalarda HMS ALICE-2008 (Hybrid Monte-Carlo

Simulation), Hibrid Model ve Geometri Bağımlı Hibrid Model (GBHM) kullanıldı. Bu hesaplamalar ALICE-2008 (Blann vd.2008), ALICE/ASH (Broeders vd. 2006) bilgisayar programları yardımıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu'nun deneysel Nükleer Reaksiyon veri kütüphanesindeki (Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)) verilerle karşılaştırılmıştır.

4.1.1. ALICE/ASH Bilgisayar Programı

ALICE/ASH (Broeders vd., 2006b) programı ALICE program ailesinin geliştirilmiş ve değiştirilmiş bir sürümüdür. ALICE/ASH-2006 programı, 300 MeV' lik gelme enerjisine kadar, uyarılma fonksiyonu, ikincil parçacıkların açısız dağılımı ve enerjisi hesaplamaları için uygulanabilir. Başlangıç exciton sayısı $n_o = 3$ olarak alınır ve n-exciton durumundaki ν tipi parçacık sayısı X_ν^n , gelen nötron için,

$${}_3X_n = 2 \frac{(\sigma_{np} / \sigma_{nn})Z + 2N}{2(\sigma_{np} / \sigma_{nn})Z + 2N}, \quad (4.1)$$

$${}_3X_p = 2 - {}_3X_n$$

ve gelen proton için,

$${}_3X_p = 2 \frac{(\sigma_{pn} / \sigma_{pp})N + 2Z}{2(\sigma_{pn} / \sigma_{pp})N + 2Z} \quad (4.2)$$

$${}_3X_n = 2 - {}_3X_p$$

şeklindedir. Burada $\sigma_{pn} / \sigma_{pp} = \sigma_{np} / \sigma_{nn} = 1.375 \times 10^{-5} T^2 - 8.734 \times 10^{-3} T + 2.776$ 'dir.

ALICE/ASH' te kullanılan bazı parametreler Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. ALICE/ASH'e ait çeşitli parametreler

Gelen parçacık ayrılma enerjisi kütle tablosu ve Myers, Swiatecki, Lysekil (MSL) kütle formülü ile hesaplanmıştır (Blann ve Bisplinghoff, 1982; Blann, 1984,1988, 1991).
a_f/a_n oranı 1 alınmıştır.
Fisyon bariyerleri A.J. Sierk (Blann, 1991)'den sağlanmıştır.
Seviye yoğunluğu $\rho(U)\alpha(U - \delta)^{-5/4} \exp(\sqrt{a(U - \delta)})$ den alınmıştır ve seviye yoğunluğu parametresi $a = A / y$ dir.
Inverse (Ters) tesir kesit hesaplamalarında optik model kullanılmıştır. Nükleon ve döteron içeren reaksiyon tesir kesit hesaplamaları optik modele göre yapılmıştır (Blann ve Bisplinghoff, 1982; Blann, 1984,1988; Shubin vd., 1995; Blann ve Vonach, 1983).
Denge hesaplamalarında Weisskopf-Ewing buharlaşma modeli kullanılmıştır.
Ortalama serbest yol parametresi, ALICE/ASH'de nükleon serbest yolu çoğaltma faktörü olan COST değeri ile kontrol edilmektedir. Ortalama serbest yol değeri tesir kesiti hesaplamalarında COST +1 olarak çoğaltılır.

4.1.2. ALICE 2008 Bilgisayar Programı

ALICE 2008 programı, HMS denge öncesi bozunma, Weisskopf-Ewing evaporation, Bohr- Wheeler Fission modellerine dayanmaktadır. Açısız dağılım durumlarında Chadwick ve Oblozinsky lineer momentumun korunum modelleri kullanılır.

Programın çalıştırılması ve kullanılması diğer ALICE programlarına göre nispeten daha kolay ve hızlıdır. Bu kullanım kolaylığı, hesapların yapılmasında gerekli olan bilgilerin uygulama esnasında hazır bulunan kütüphane dosyalarından alınmasıyla sağlanır.

ALICE-2008 Programı, nötron ve proton girişli reaksiyonlara ek olarak foton ve ağır iyon girişli reaksiyonlar için de çalışmaktadır. 0.2 – 250 MeV enerji aralığında hedef elementler olarak Be' den sonraki hedeflerin kullanılması mümkündür (M Blann vd., (2008)).

4.1.2.1. Kodun Çalıştırılması Ve Opsiyonları

Programın giriş parametreleri ve çıkış dosyaları aşağıda özetlenmiştir:

Giriş parametreleri :

Çizelge 4.2.ALICE-2008'e ait giriş parametreleri

ZP : Merminin (gelen parçacığın) atom numarası
AP : Merminin (gelen parçacığın) kütle numarası
ZT : Hedef çekirdeğin atom numarası
ZP : Hedef çekirdeğin kütle numarası
ED : Yayınlanma enerji histogram aralığı. Bu değer "0" sıfır girilirse varsayılan değer 0,5 olarak atanır.
NCOUNT : Monte Carlo hesaplaması için olay sayısı. Bu değer "0" sıfır girilirse varsayılan değer 100000 olarak atanır.
NENG : Hesap yapılacak gelme enerji sayısı
EINC : Başlangıç enerjisi
EDELTA : Enerjinin artırım miktarı

Çıkış dosyaları:

Çizelge 4.3.ALICE-2008'e ait çıkış dosyaları

INSAVE : Ekrandan girilen bilgilerin kaydedildiği veri dosyası
OUTPT : Hesaplama sonuçlarının topluca verildiği dosya
PLOT : Uyarılma fonksiyonlarının grafiklerini gösterir.
FOUT : Enerjiye göre fisyon ürünlerinin verimi
FIZISOMR : Fisyon ürünlerinin verimi
FIZISRAT : Fisyon izomer oranları
FIZYBYA : Fisyon kütle ürünleri
FRAGSS : Fisyon ürünlerinin Z' ye karşı kütle dağılımı
FIZYLDS : Normalizasyonla fisyon parçalanma ürünleri
SDCSCM : Kütle merkezi koordinatındaki diferansiyel tesir kesitleri (mb/MeV)
LABOUT : Laboratuvar koordinatındaki diferansiyel tesir kesitleri (mb/MeV)

Çizelge 4.3 (devamı)

ENGANG : Kütle merkezi koordinatındaki açığa bağlı çift diferansiyel tesir kesiti (mb/Mev/sr)
ANGENG : Kütle merkezi koordinatındaki enerjiye bağlı çift diferansiyel tesir kesiti (mb/MeV/sr)
LABANGD: Laboratuar koordinat sisteminde enerjiye bağlı çift diferansiyel tesir kesiti (mb/MeV/sr).
LABENGD: Laboratuar koordinat sisteminde açığa bağlı çift diferansiyel tesir kesiti (mb/MeV/sr).
SDCSFLB: Filyon parçacıklarının tek diferansiyel tesir kesiti (mb/Mev/sr).
SDCSFCM: Filyon ürünlerinin tek diferansiyel tesir kesiti
SDCSTOTLB: Toplam tek diferansiyel tesir kesiti
DDCSFLB: Filyon parçacıklarının enerjiye bağlı çift diferansiyel tesir kesiti
DDCSFCM: Filyon ürünlerinin enerjiye bağlı çift diferansiyel tesir kesiti.
DDCSTOTLB: fizyon + buharlaşma için toplam çift diferansiyel tesir kesiti

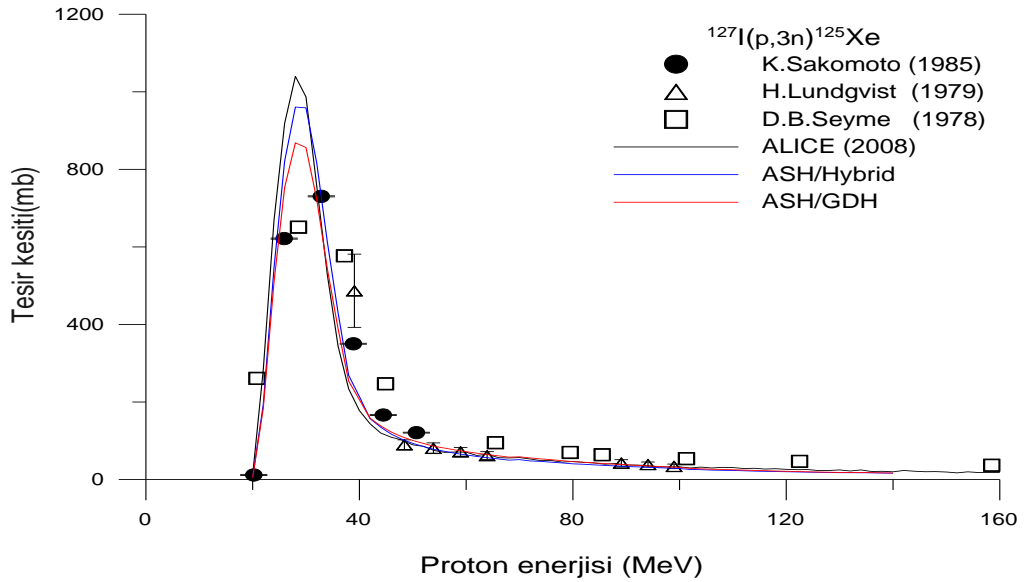
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada; Türk hızlandırıcı merkezi projesi kapsamında kurulması planlanan proton hızlandırıcısında üretilebilecek radyoizotopların radyoizotop tesir kesitleri hesaplanmış ve Uluslararası Atom Enerjisi Kurumunun deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden elde edilen deneysel tesir kesiti verileri ile karşılaştırılmıştır.

5.1. $^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}$ Reaksiyonu

Şekil.5.1'de $^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}$ Reaksiyonunda oluşan ^{125}Xe izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi 25-35 MeV enerji aralığı ^{125}Xe izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında sırasıyla, ALICE-2008 (1040 mb), ALICE-ASH/Hibrid(960,763 mb) ve ALICE-ASH/ GDH(868,655 mb) hesaplamaları en yüksek tesir kesitini vermektedirler. Genellikle tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

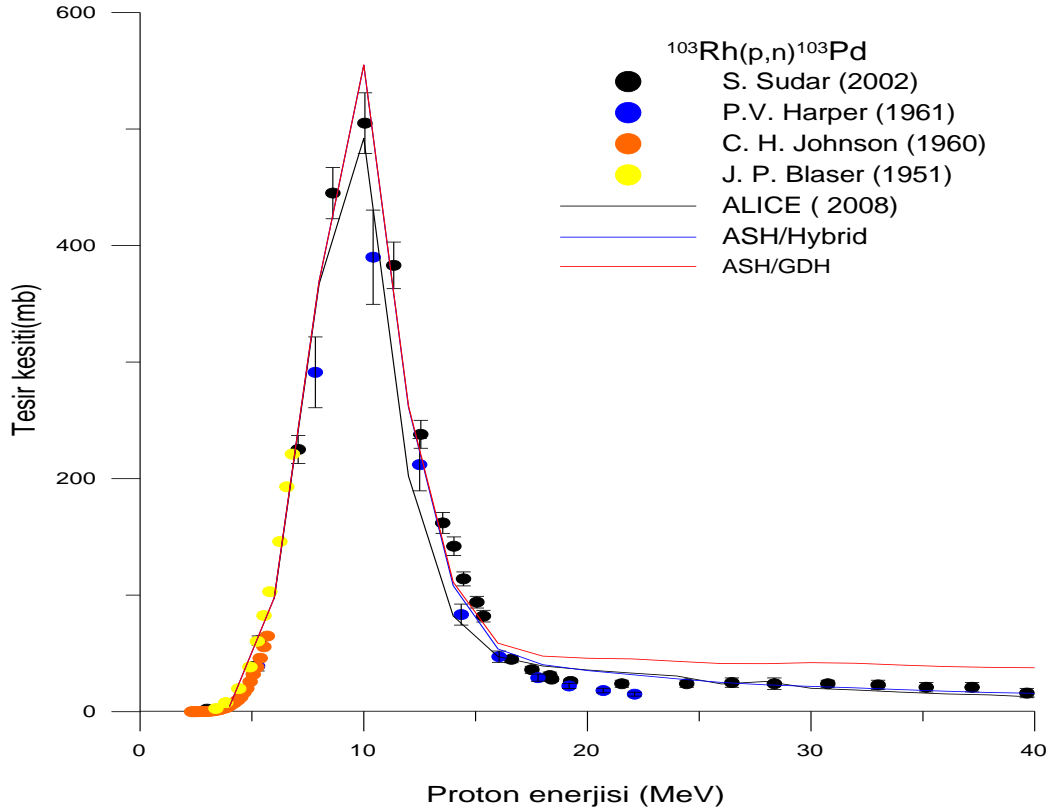


Şekil 5.1 $^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.2. $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$ Reaksiyonu

Şekil 5.2’de $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$ Reaksiyonunda oluşan ^{103}Pd izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi 10 MeV enerji civarı ^{103}Pd izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerjisi bölgesidir. Yüksek enerjilerde ALICE-2008 (492 mb), ALICE-ASH/Hibrid(554,962 mb) ALICE-ASH/GDH(554,942 mb) hesaplamaları en yüksek tesir kesitini vermekte olup deneysel verilerle daha uyumludur.

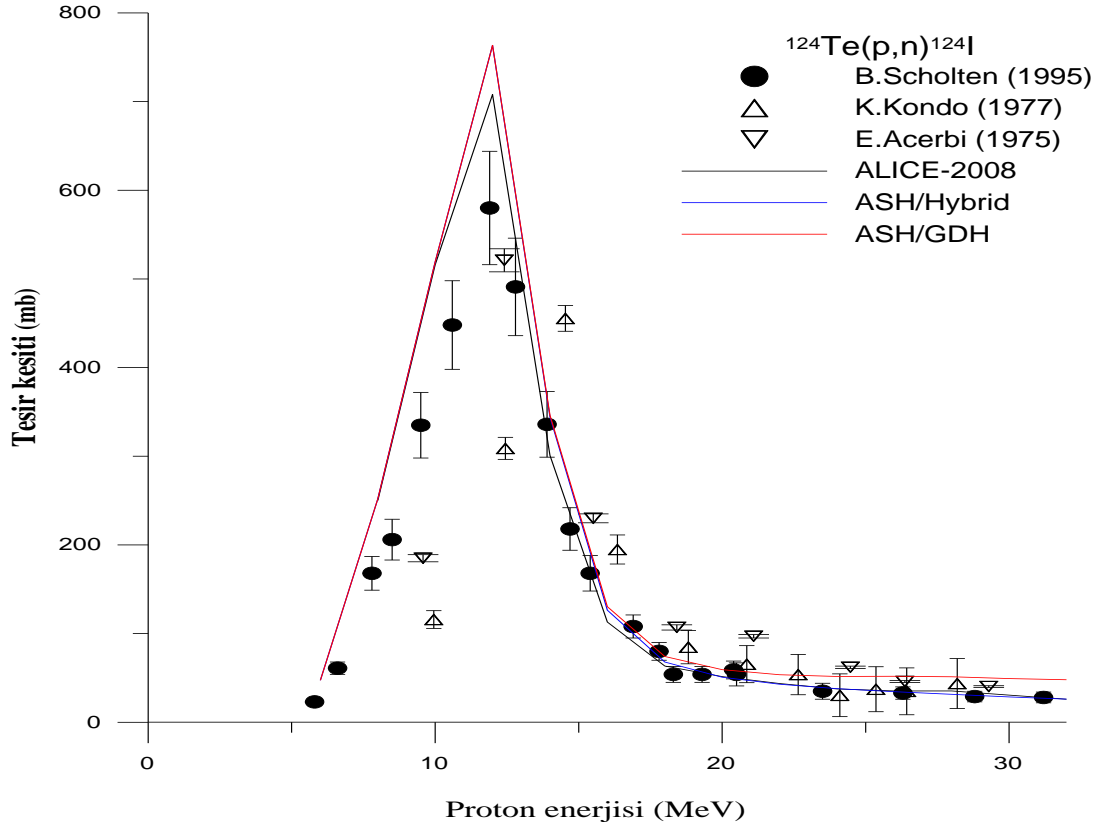


Şekil 5.2. $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.3. $^{124}\text{Te} (p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu

Şekil 5.3'de $^{124}\text{Te} (p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonunda oluşan ^{124}I izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi 10-15 MeV enerji aralığı ^{124}I izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-ASH/Hibrid(763,475 mb) ve ALICE-ASH/GDH(763,474 mb) hesaplamaları deneysel verilerle ALICE-2008(708 mb) göre daha uyumlu olduğu görülür. Sonuçta genel olarak tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

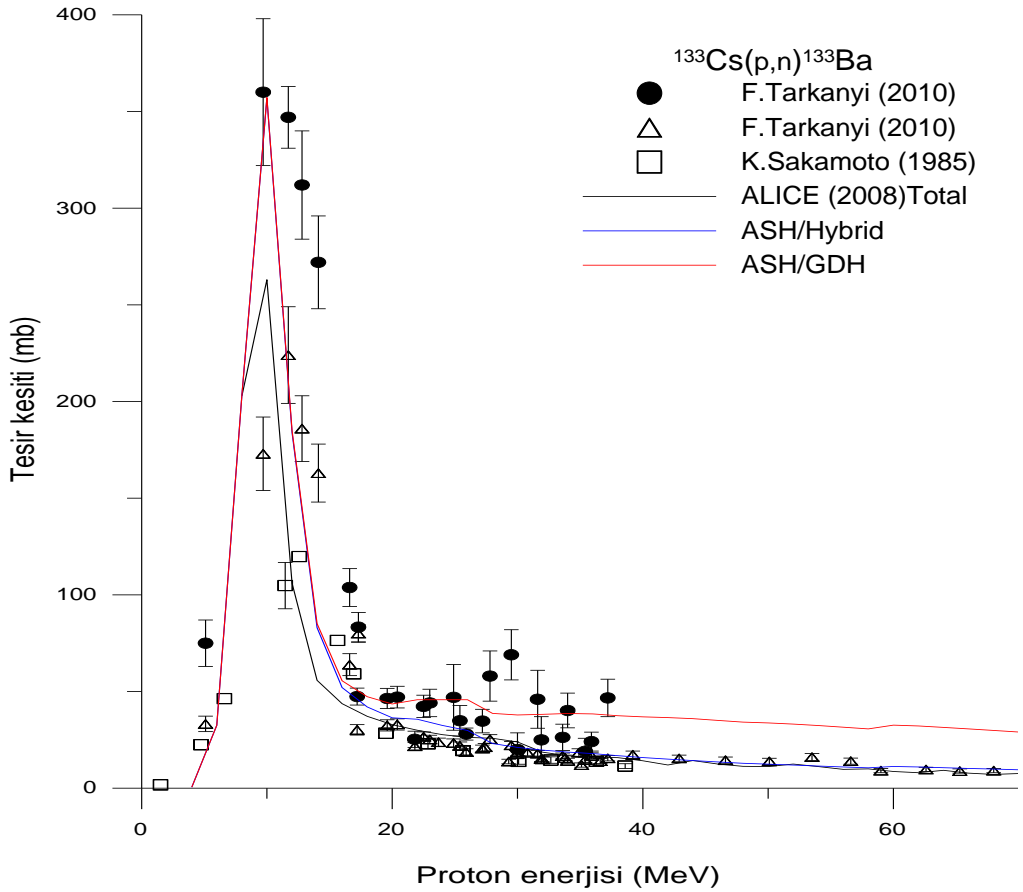


Şekil 5.3. $^{124}\text{Te} (p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.4. $^{133}\text{Cs}(p,n)^{133}\text{Ba}$ Reaksiyonu

Şekil 5.4'de $^{133}\text{Cs}(p,n)^{133}\text{Ba}$ Reaksiyonunda oluşan ^{133}Ba izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.4'de görüldüğü gibi 8-15 MeV enerji aralığı ^{133}Ba izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-ASH/GDH(357,179 mb) hesaplaması deneysel verilerle uyumlu olup en yüksek tesir kesitini vermektedir. Genellikle tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

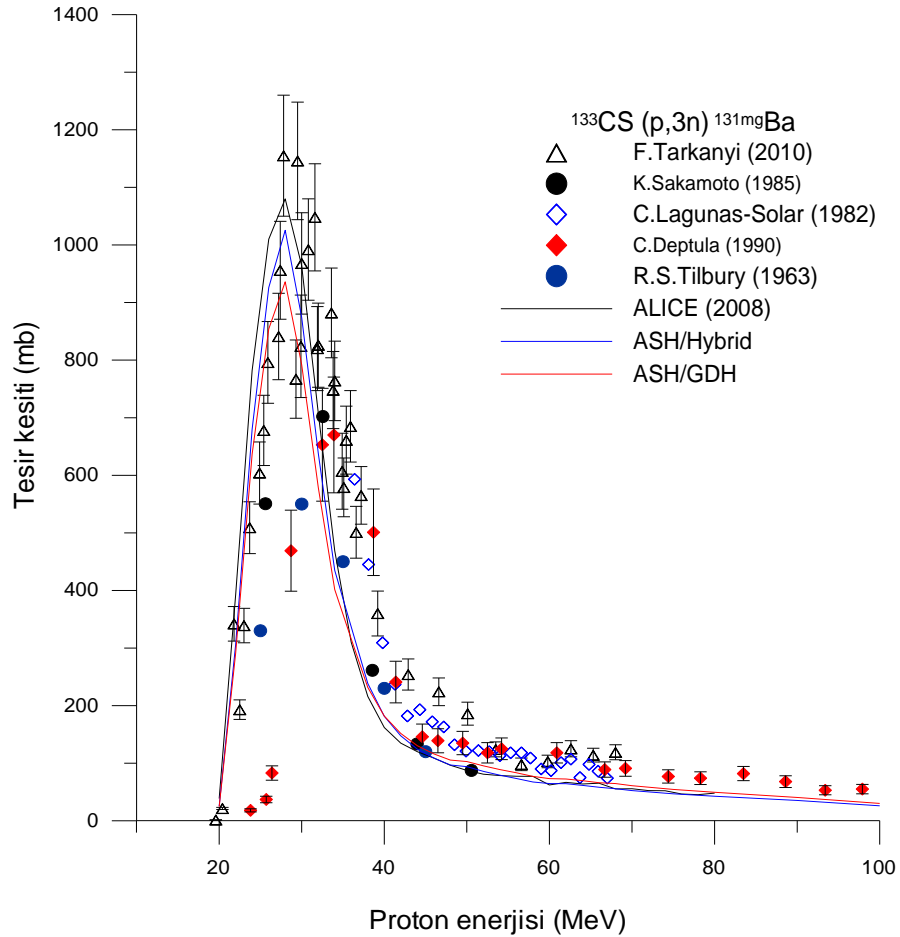


Şekil 5.4. $^{133}\text{Cs}(p,n)^{133}\text{Ba}$ Reaksiyonu $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.5. $^{133}\text{Cs}(p,3n)^{131\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonu

Şekil 5.5’de $^{133}\text{Cs}(p,3n)^{131\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonunda oluşan $^{131\text{m}}\text{Ba}$ izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi 30 MeV enerji civarı $^{131\text{m}}\text{Ba}$ izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji bölgesidir. Bu enerji aralığında sırasıyla, ALICE-2008 (1080 mb), ALICE-ASH/Hibrid(1025,38 mb) ve ALICE-ASH/GDH(936,054 mb) hesaplamaları en yüksek tesir kesitini vermektedirler. Genellikle tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

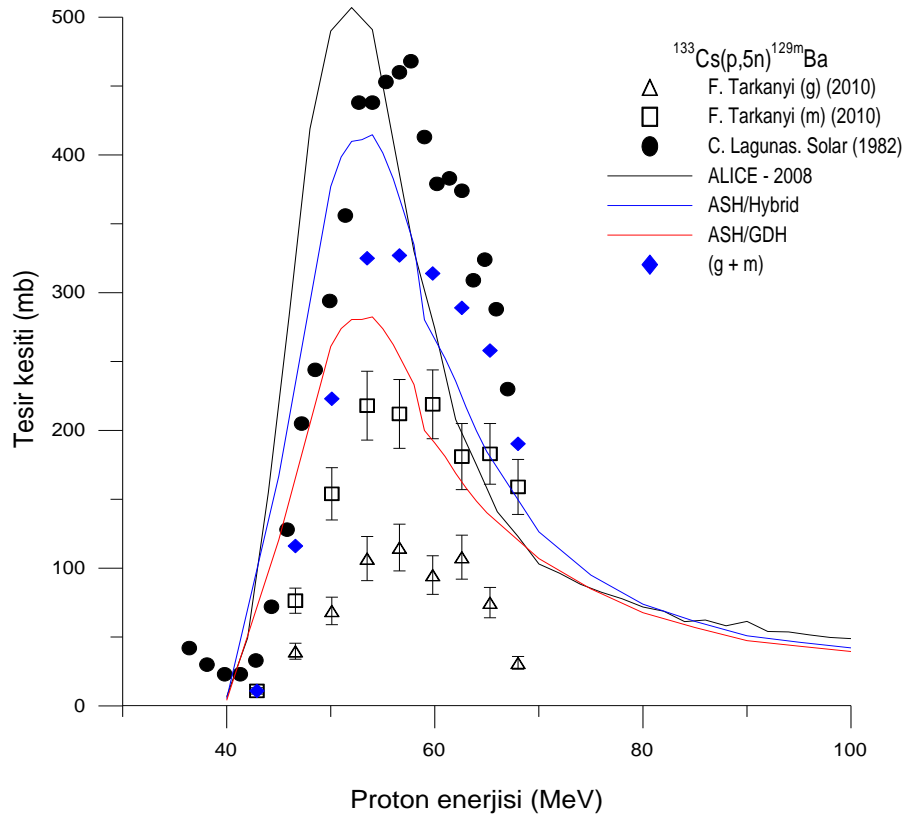


Şekil 5.5. $^{133}\text{Cs}(p,3n)^{131\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.6. $^{133}\text{Cs}(p,5n)^{129\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonu

Şekil 5.6'da $^{133}\text{Cs}(p,5n)^{129\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonunda oluşan $^{129\text{m}}\text{Ba}$ izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi 55-60 MeV enerji aralığı $^{129\text{m}}\text{Ba}$ izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında sırasıyla, ALICE-2008 (507 mb), ALICE-ASH/Hibrid(414,737 mb) ve ALICE-ASH/GDH(282,43 mb) hesaplamaları en yüksek tesir kesitini vermektedirler. Genellikle tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

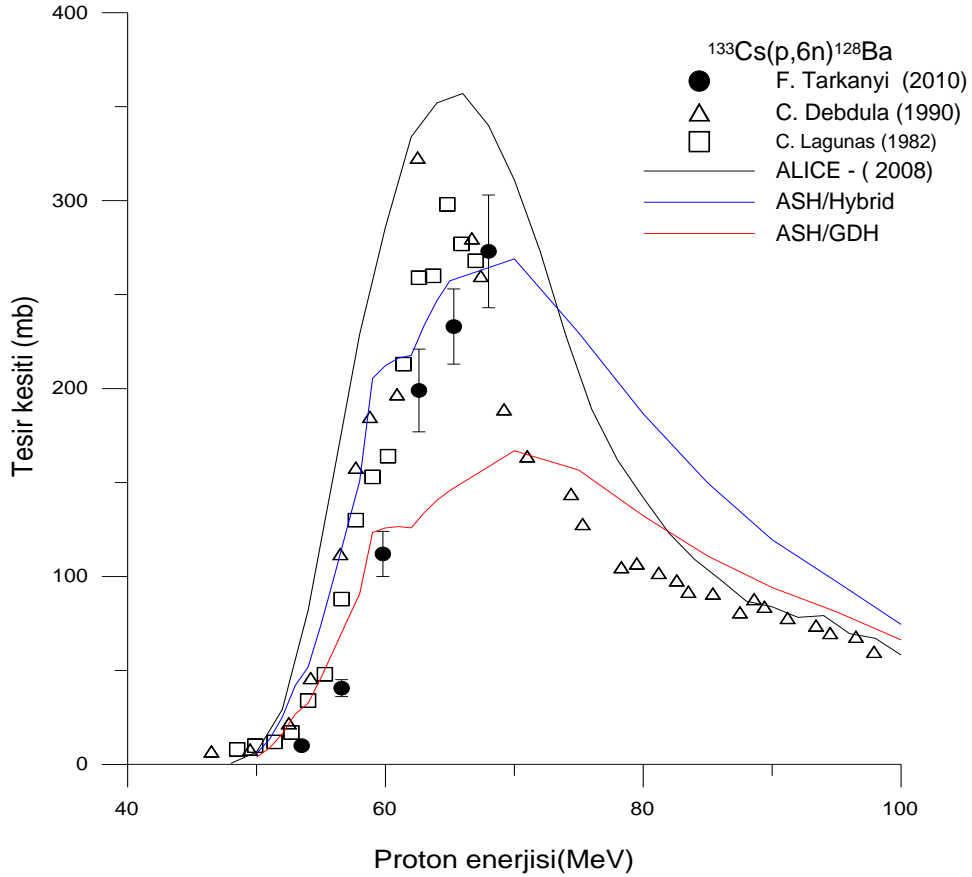


Şekil 5.6. $^{133}\text{Cs}(p,5n)^{129\text{m}}\text{Ba}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.7. $^{133}\text{Cs}(p,6n)^{128}\text{Ba}$ Reaksiyonu

Şekil 5.7’de $^{133}\text{Cs}(p,6n)^{128}\text{Ba}$ Reaksiyonunda oluşan ^{128}Ba izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi 60-65 MeV enerji aralığı ^{128}Ba izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-ASH/Hibrid(268,971 mb) hesaplamaları deneysel verilerle diğer ALICE-2008(357 mb) ve ALICE-ASH/GDH(166,906 mb) hesaplamalarına göre daha uyumlu olup en yüksek tesir kesitini oluşturmaktadırlar. Ancak tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

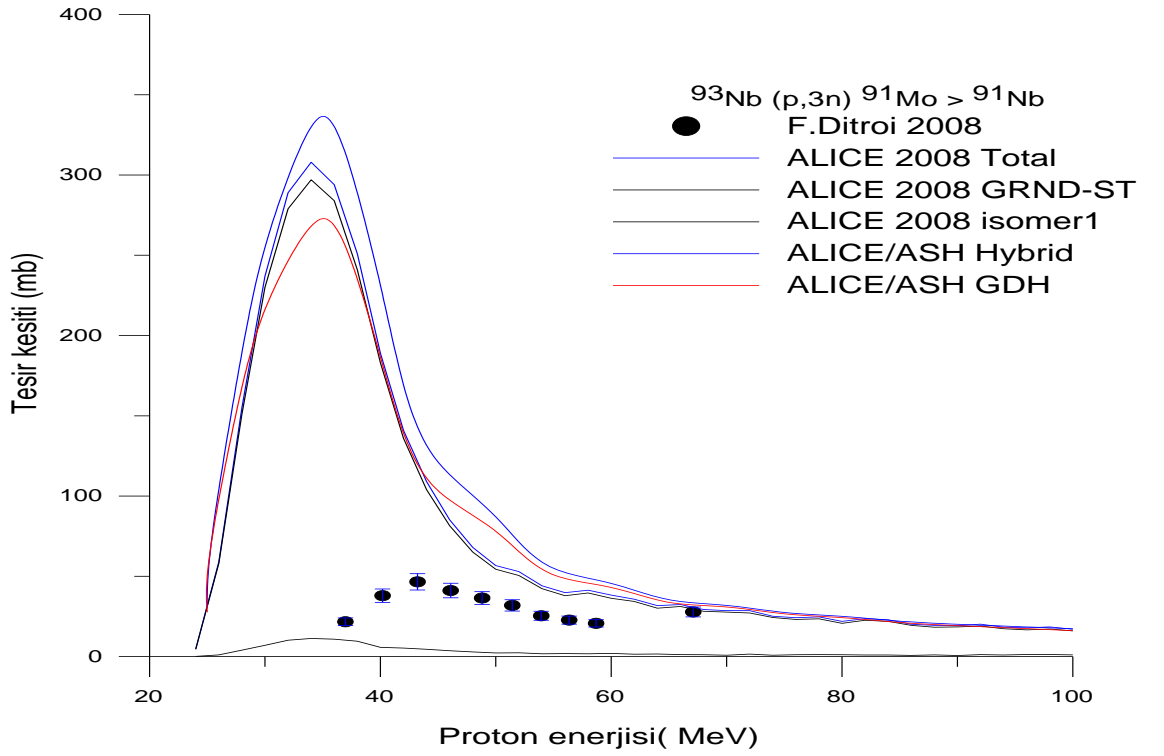


Şekil 5.7. $^{133}\text{Cs}(p,6n)^{128}\text{Ba}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.8. $^{93}\text{Nb}(p,3n)^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$ Reaksiyonu

Şekil 5.8'de $^{93}\text{Nb}(p,3n)^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$ Reaksiyonunda oluşan $^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$ izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi 35-50 MeV enerji aralığı ^{91}Nb izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-2008 isomer1 (11,3 mb) hesaplamaları deneysel verilerdeki isomer1 değerleri ile daha uygundur. Burada ALICE-ASH/GDH(272,854 mb) ve ALICE-ASH/Hibrid(336,622 mb) programları ile metastabil durumlar (isomer1, GRND-ST, Total) hesaplanmadığı için ALICE-2008 programının bu programlara göre daha üstün olduğu anlaşılmaktadır.

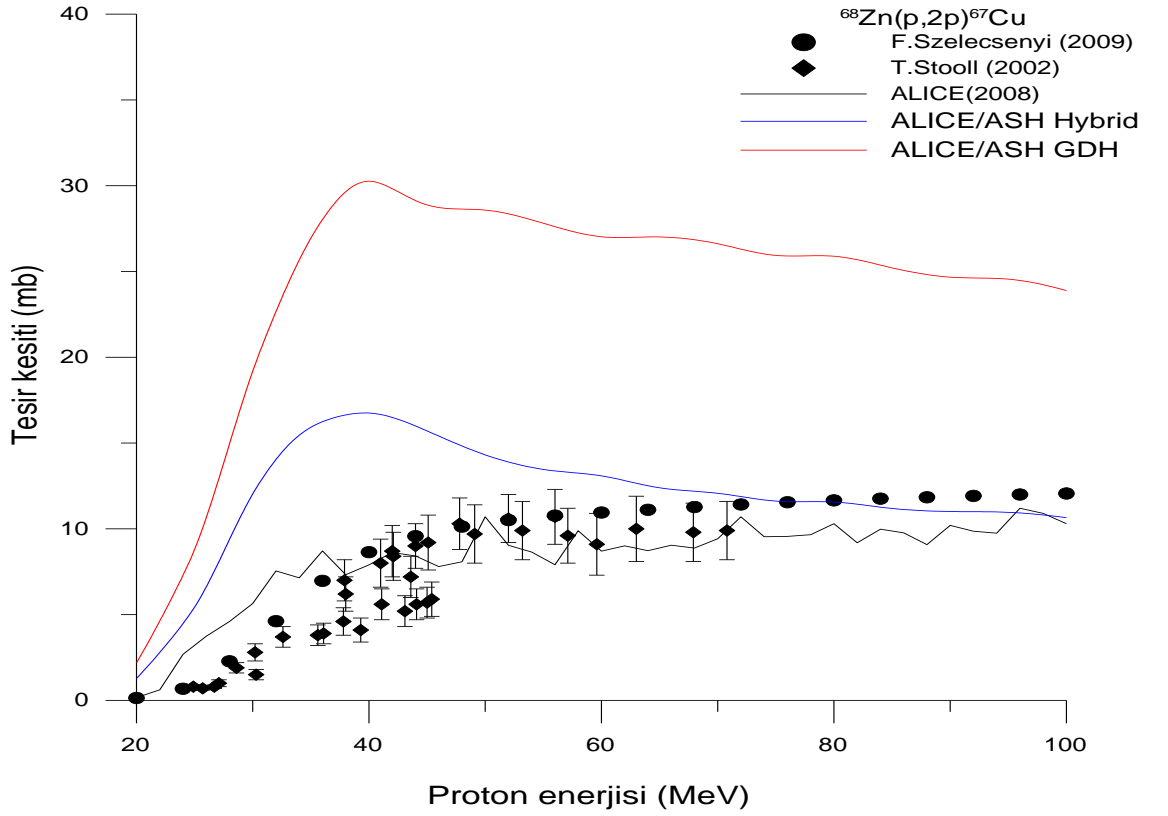


Şekil 5.8. $^{93}\text{Nb}(p,3n)^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.9. $^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$ Reaksiyonu

Şekil 5.9'da $^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$ Reaksiyonuna oluşan ^{67}Cu izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.9'da görüldüğü gibi 35-50 MeV enerji aralığı ^{67}Cu izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-2008(10,9 mb) hesaplamaları deneysel verilerle diğer ALICE-ASH/Hibrid(16,7521 mb) ve ALICE-ASH/GDH(30,2682 mb) hesaplamalarına göre daha uyumlu olup en yüksek tesir kesitini oluşturmaktadırlar.

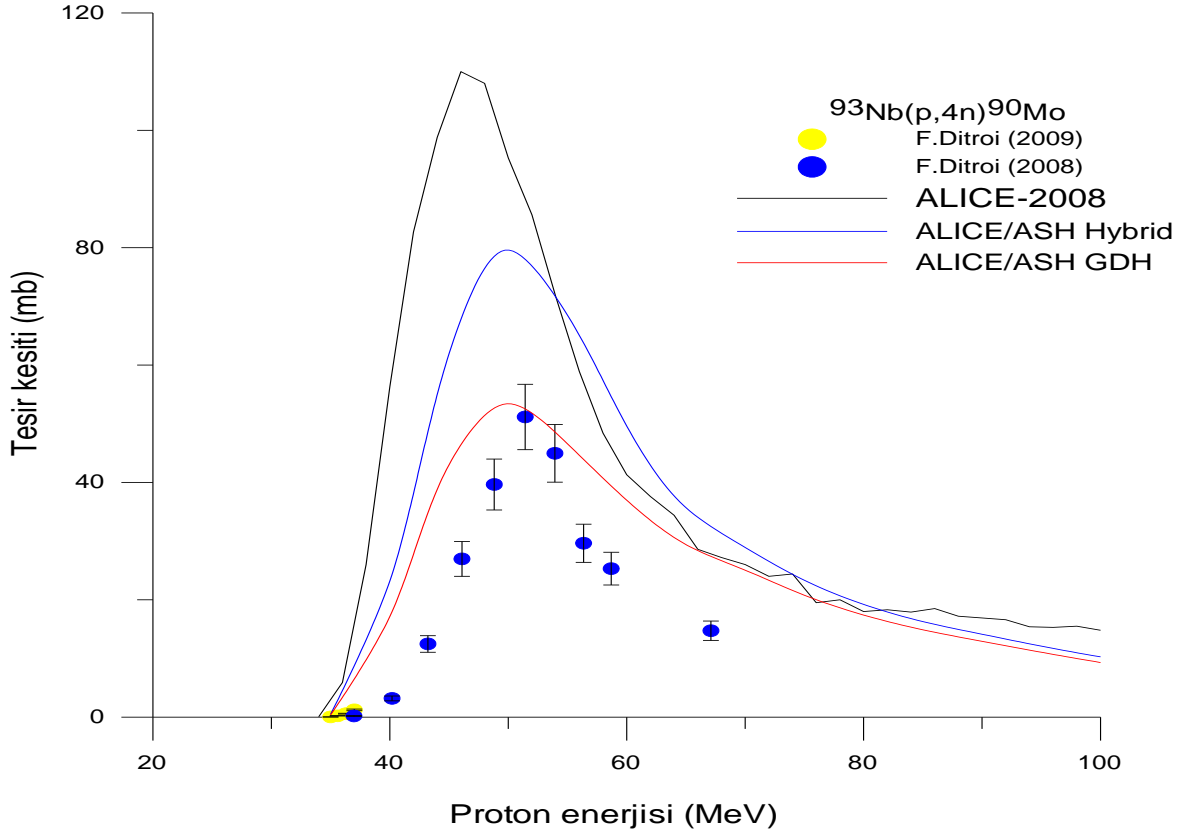


Şekil 5.9. $^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.10. $^{93}\text{Nb}(p,4n)^{90}\text{Mo}$ Reaksiyonu

Şekil 5.10'da $^{93}\text{Nb}(p,4n)^{90}\text{Mo}$ Reaksiyonunda oluşan ^{90}Mo izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi 40-60 MeV enerji aralığı ^{90}Mo izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-ASH/GDH(53,408 mb) hesaplamaları deneysel verilerle diğer ALICE-ASH/Hibrid(79,5985 mb) ve ALICE-2008(110 mb) hesaplamalarına göre daha uyumlu olup en yüksek tesir kesitini oluşturmaktadırlar. Ancak tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

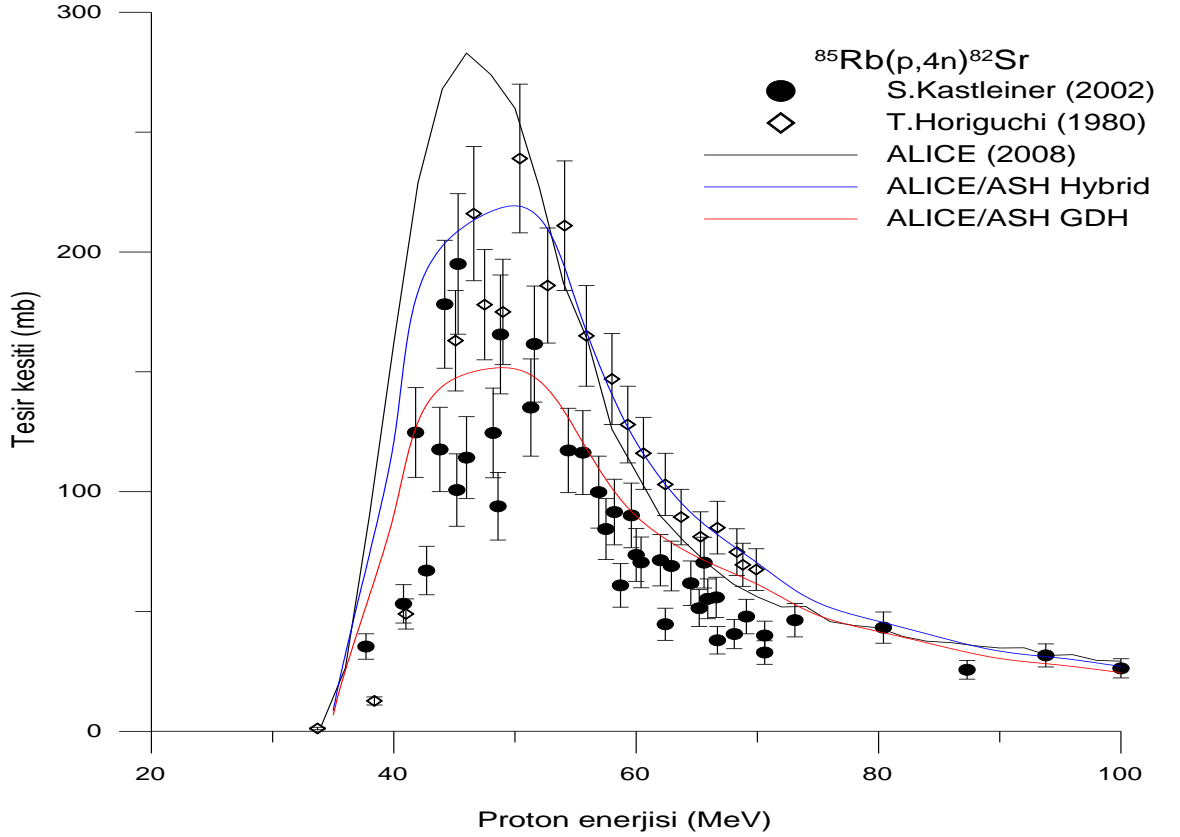


Şekil 5.10. $^{93}\text{Nb}(p,4n)^{90}\text{Mo}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.11. $^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$ Reaksiyonu

Şekil 5.11’de $^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$ Reaksiyonunda oluşan ^{82}Sr izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi 40-60 MeV enerji aralığı ^{82}Sr izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-ASH/GDH(125,684 mb) ALICE-ASH/Hibrid(219,302 mb) ve ALICE-2008(239 mb) hesaplamaları deneysel verilerle uyumlu olup en yüksek tesir kesitini oluşturmaktadırlar.

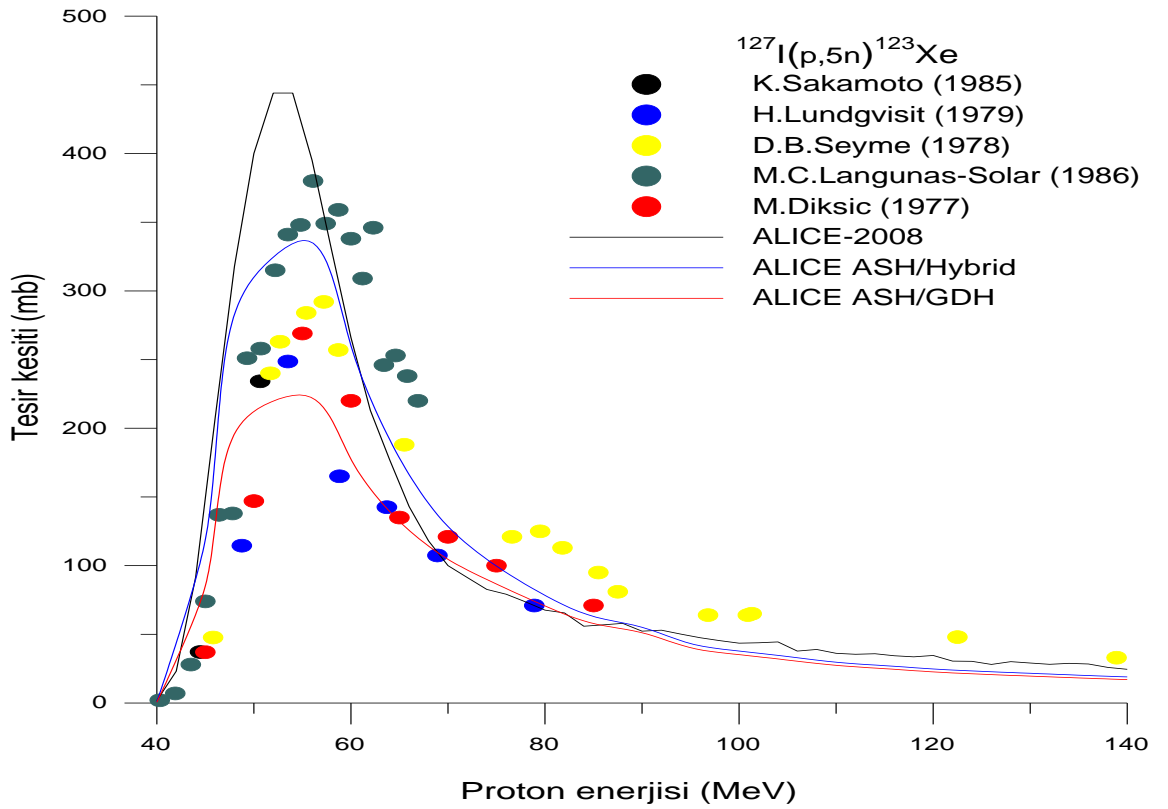


Şekil 5.11. $^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

5.12. $^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}$ Reaksiyonu

Şekil 5.12’de $^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}$ Reaksiyonunda oluşan ^{123}Xe izotopu için deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi. Hesaplanan sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılarak tartışıldı.

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi 45-55 MeV enerji aralığı ^{123}Xe izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığıdır. Bu enerji aralığında ALICE-ASH/GDH(224,162 mb) hesaplamaları ile ALICE-ASH/Hibrid(336,695 mb) hesaplamaları deneysel verilerle diğer ALICE-2008(444 mb) hesaplamalarına göre daha uyumlu olup en yüksek tesir kesitini oluşturmaktadırlar. Ancak tüm hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.12. $^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}$ Reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bugün dünyada, hastalıkların teşhis ve tedavisi amacıyla yaklaşık olarak 140 farklı radyoizotop yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Ülkemizde TAEK tarafından 2012 yılında işletmeye alınacak olan dairesel proton hızlandırıcısında 15 - 30 MeV enerji aralığındaki protonlarla ^{123}I , ^{18}F , ^{67}Ga , ^{111}In ^{201}Tl gibi radyoizotopların üretilmesi planlanmaktadır. Bu çalışmada, kurulmasına ait çalışmalar hızla devam eden Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı tesisinde 30 MeV'in üzerindeki proton enerjilerinde üretilebilecek radyoizotop potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tezde, $^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}$, $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$, $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$, $^{133}\text{Cs}(p,n)^{133}\text{Ba}$, $^{133}\text{Cs}(p,3n)^{131\text{mg}}\text{Ba}$, $^{133}\text{Cs}(p,5n)^{129\text{m}}\text{Ba}$, $^{133}\text{Cs}(p,6n)^{128}\text{Ba}$, $^{93}\text{Nb}(p,3n)^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$, $^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$, $^{93}\text{Nb}(p,4n)^{90}\text{Mo}$, $^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$, $^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}$ reaksiyonlarıyla üretilen radyoizotopların üretim tesir kesitleri ALICE/ASH ve ALICE2008 bilgisayar programları ile hesaplanmıştır ve en uygun proton enerji aralıkları belirlenmiştir (Çizelge 6.1)

Çizelge 6.1. Potansiyel radyoizotopların tesir kesitleri ve üretim enerji aralığı.

Radyoizotop	Maksimum tesir kesiti (mb)	Enerji aralığı (MeV)
^{125}Xe	1040	30-160
^{123}Xe	444	40-140
^{103}Pd	554,962	5-40
^{124}I	763,474	5-30
^{133}Ba	357,179	5-60
$^{131\text{mg}}\text{Ba}$	1080	20-100
$^{129\text{m}}\text{Ba}$	507	40-100
^{128}Ba	357	50-100
^{91}Nb	336,622	20-100
^{67}Cu	30,2682	20-100
^{90}Mo	110	20-100
^{82}Sr	239	20-100

Bu hesaplamalarda, yaygın olarak kullanılan denge öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar literatürden alınan deneysel tesir kesiti verileriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, ^{125}Xe , ^{103}Pd , ^{124}I , ^{133}Ba , $^{131\text{m}}\text{Ba}$, $^{129\text{m}}\text{Ba}$, ^{128}Ba , $^{91}\text{Mo} > ^{91}\text{Nb}$, ^{67}Cu , ^{90}Mo , ^{82}Sr ve ^{123}Xe gibi radyoizotopların THM Proton Hızlandırıcısı Tesisi'nde üretilebileceği görülmektedir. Hem TAEK tesislerinde hem de THM Proton Hızlandırıcısı Tesisi'nde yapılacak radyoizotop üretimi hâlihazırda ithalat yoluyla temin edilen birçok radyoizotopun ülkemiz kaynaklarıyla üretilmesini sağlayacaktır. Ancak bir radyoizotopun üretilebilirliği yalnızca proton enerji aralığına bağlı değildir. Aynı zamanda bahsedilen enerji aralığı için izotopik kirliliğin ne düzeyde olduğu, kullanılacak hedefin kalınlığı, üretim aktivitesi ve üretim verimliliği gibi faktörlerin de incelenmesi gereklidir. Bu çalışmanın kapsamını aşacağı için bu faktörler tez çalışmasına dahil edilmemiştir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde olabilecek bir başka çalışmada hedef kalınlığı, üretim aktivitesi ve üretim verimliliği gibi faktörler incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Aydın, A., Tel, E., Şimşek, O., Nötronların 8-24 MeV Gelme Enerjileri İçin (n,p) Reaksiyon Tesir Kesitlerinin İncelenmesi. II. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, 44. Ankara (2004).
- Berezhnoy, Y.A., The Quantum World of Nuclear Physics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN 981-256-387-3, 191p. Singapore (2005).
- Bertrand, F.E., Peelle, R.W., Complete Hydrogen and Helium Particle Spectra from 30- to 60-MeV Proton Bombardment of Nuclei with $A=12$ to 209 and Comparison with the Intranuclear Cascade Model. *Physical Review C*, 8 (3), 1045-1064, (1973).
- Bertini, H.W., Harp, G.D., Bertrand, F.E., Comparisons of predictions from two intranuclear-cascade models with measured secondary proton spectra at several angles from 62 - and 39 - MeV protons on various elements. *Physical Review C*, 10 (6), 2472-2482, (1974).
- Běťák, E., Hodgson, P.E., Particle-hole state densities in pre-equilibrium nuclear reaction models. *Reports on Progress in Physics*, 61 (5), 483-524, (1998).
- Bekiş R., Değirmenci B., Ak İ., ve ark., “Tc-99m MIBI meme sintigrafisi (Sintimammografi) uygulama kılavuzu”, *Turk J Nucl Med*, 10:119-123 (2001).
- Blann, M., Hybrid model for Pre-equilibrium decay in nuclear reactions. *Physical Review Letters*, 27 (6), 337-340, (1971).
- Blann, M., Importance of the nuclear density distribution on preequilibrium decay. *Physical Review Letters*, 28 (12), 757-759, (1972).
- Blann, M., Preequilibrium decay. *Annual Review of Nuclear and Particle Science.*, 25, 123-166, (1975).
- Blann, M., Bisplinghoff, J., Code ALICE/LIVERMORE 82, Livermore Lawrence Laboratory, UCID-19614, (1982).

- Blann, M., Vonach, H.K., Global test of modified precompound decay models. *Physical Review C*, 28 (4), 1475-1492 (1983).
- Blann, M., Code ALICE/85/300 Livermore Lawrence Laboratory, UCID-20169, (1984).
- Blann, M., ALICE87 (Livermore) Precompound Nuclear Model Code, Report IAEA-NDS-93 REV.O (1988).
- Blann, M., ALICE-91: Statistical Model Code System with Fission Competition, RSIC Code Package PSR-146 (1991).
- Blann, M., Konobeev, A.A., Wilson, W.B., Mashnik, S.G., Manual for Code Alice Version, NEA / Package-ID Status ALICE 2008 USCD1238/01 (2008).
- Blogger, Particle Physics, Privacy Matters c/o Google Inc. 1600 Amphitheatre Parkway Mountain View CA 94043, ABD (2007).
- Broeders, C.H.M., Konobeyev, A.Yu., Development of Calculation Methods to Analyze Radiation Damage, Nuclide Production and Energy Deposition in ADS Materials and Nuclear Data Evaluation. *Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft Wissenschaftliche Berichte FZKA 7197* (2006a).
- Broeders, C.H.M., Konobeyev, A.Yu., Korovin, Yu.A., Lunev, V.P., Blann, M., ALICEIASH — Pre-compound and Evaporation Model Code System for Calculation of Excitation Functions, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reactions at Intermediate Energies. *Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft Wissenschaftliche Berichte FZKA 7183* (2006b).
- Cline, C.K., Extensions to the pre-equilibrium statistical model and a study of complex particle emission. *Nuclear Physics A*, 193 (2), 417-437 (1972).
- Çalışkan A., Yılmaz M., “100 MeV Energy DTL Design for TAC Linear Proton Accelerator”, *Balkan Physics Letters*, 14 (4), 135-143 (2007).

- Çalışkan A., Yılmaz M., "55 MeV energy DTL design and optimization for TAC Linear Proton Accelerator", *Balkan Physics Letters*, 18 (181002), 8-15 (2009).
- David R. Lide, Norman E. Holden "Section 11, Table of the Isotopes". *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th Edition. Boca Raton, Florida: CRC Press (2005).
- Ertürk, S., Boztosun, İ., *Nükleer Fizik Araştırmalarında Kullanılan Hızlandırıcılar ve Uygulama Alanları. II. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi Kitapçığı*. Ankara (2004).
- EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data File), Brookhaven National Laboratory National Nuclear Data Centre. İnternet Sitesi. <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/exfor/>. Erişim Tarihi: 10.01.2011.
- Feshbach, H., Kerman, A.K., Koonin, S., The statistical theory of multi-step compound and direct reactions. *Annals of Physics*, 125 (2), 429-476 (1980).
- Gadioli, E., Hodgson, P.E., *Pre-equilibrium nuclear reactions*. Oxford University Press, ISBN 0-19-851734-3, 518p. New York (1992).
- Griffin, J.J., *Statistical Model of Intermediate Structure*. *Physical Review Letters*, 17, 478-481 (1966).
- Griffin, J.J., *Int. Nucl. Phys. Conf. 1966, Gatlinburg, Tenn.* ed. R.L. Becker, p. 778, Academic. New York (1967a).
- Griffin, J.J., *Energy dependence of average direct reaction cross sections and partial nuclear level densities*. *Physics Letters B*, 24 (1), 5-7 (1967b).
- Griffin, J.J., *Intermediate Structure in Nuclear Reactions*, ed. H.P. Kennedy, R. Schriels, Univ. Kentucky Press, 219 pp. Lexington (1968).
- Harp, G.D., Miller, J.M., Berne, B.J., *Attainment of Statistical Equilibrium in Excited Nuclei*. *Physical Review*, 165 (4), 1166-1169 (1968).
- Harp, G.D., Miller, J.M., *Precompound Decay from a Time-Dependent Point of View*. *Physical Review C*, 3 (5), 1847-1855 (1971).

- Hodgson, P.E., Gadioli, E., Gadioli Erba, E., *Introductory nuclear physics*. Oxford University Press, ISBN 0-19-851897-8, 723p. New York (2003).
- J. Wei, S. Fu, J. Tang, J. Tao, D. Wang, F. Wang, S. Wang, “China Spallation Neutron Source - an overview of application prospects”, *Chinese Physics C* 33, 1033 (2009).
- Krane, K.S., *Nükleer Fizik-II*. Palme Yayıncılık, No: 195, 559s, 560s, 561s, 563s. Ankara (2002).
- McLaughlin A.F., Southee A.E., *Nuclear Medicine in Clinical Diagnosis and Treatment*. New York: 711-35 (1994).
- Nishioka, H., Verbaarschot, J.J.M., Weidenmüller, H.A., Yoshida, S., Statistical theory of precompound reactions: The multistep compound process. *Annals of Physics*, 172 (1), 67-99 (1986).
- Nishioka. H., Weidenmüller, H.A., Yoshida, S., Statistical theory of precompound reactions: The multistep direct process. *Annals of Physics*, 183 (1), 166-187 (1988).
- Nishioka. H., Weidenmüller, H.A., Yoshida, S., Direct-reaction effects in compound-nucleus and multistep compound reactions. *Annals of Physics*, 193 (1), 195-205 (1989).
- Qaim SM, “Therapeutic radionuclides and nuclear data”, *Radiochim. Acta*, 89: 297 (2001).
- Rubbia, C., et al., “Conceptual Design of A Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier”, *International Conference on Accelerator- Driven Transmutation Technologies and Applications*, Las Vegas, 1-6 (1994).
- Ribansky, I., Oblozinsky, P., Běták, E., Pre-equilibrium decay and the exciton model. *Nuclear Physics A*, 205 (3), 545-560 (1973).
- Serber, R., The Production of High Energy Neutrons by Stripping. *Physical Review*, 72 (11), 1008-1016 (1947a).

- Serber, R., Nuclear Reactions at High Energies. Physical Review, 72 (11), 1114-1115 (1947b).
- Sultansoy, S.,“ Türk Hızlandırıcı Kompleksi Genel Tasarımı” DPT’2002K120250 nolu DPT projesi Sonuç Raporu, 6-8 ,95-112 (2006).
- Sultansoy, S., Parçacık Hızlandırıcıları: Dün, Bugün, Yarın. I.Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi Kitapçığı. Ankara(2001).
- Shirokov, Y.M., Yudin, N.P., Nuclear Physics, Volume: 1. Mir Publishers, 445p. Moscow (1982).
- Shubin, Yu.N., Lunev, V.P., Konobeyev, A.Yu., Dityuk, A.I., Cross-Section Library MENDL-2 to Study Activation and Transmutation of Materials Irradiated by Nucleons of Intermediate Energies. Report INDC(CCP)-385 (1995).
- Tarkanyi F, Takacs S, Gul K, Hermanne A, Mustafa, MG, Nortier FM, Oblozinsky P, Qaim SM, Scholten B, Shubin YN, Zhuang Y, “Charged-particle cross section database for medical radioisotope production”, IAEA-TEC DOC-1211, 285 (2001).
- TAEK,(<http://www.taek.gov.tr/sanaem/html/hizlandiricifizik.html>). Erişim tarihi : (06.04.2011).
- Tamura, T., Udagawa, T., Lenske, H., Multistep direct reaction analysis of continuum spectra in reactions induced by light ions. Physical Review C, 26 379-404 (1982).
- Yalçiner, E.G., Proton Hızlandırıcılarının Nükleer Uygulama Alanları İle Protonlarla Oluşturulan Nükleer Reaksiyon Tesir Kesitlerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,132, Ankara, Türkiye (2008).
- Yavas, Ö., I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları Yaz Okulu, Ankara.
<http://bilge.science.ankara.edu.tr/tac/YAZOKULU/FILES>. Erişim tarihi: 05.03.2011(2005)
- YUUP Projesi I. Altı Aylık Gelişim Raporu (Ocak-Haziran 2006).

YUUP Projesi V. Altı Aylık Gelişim Raporu (Ocak –Haziran 2008 dönemi).

YUUP Projesi VII. Altı Aylık Gelişim Raporu (Ocak - Haziran 2009 dönemi).