

$^{125}\text{Te}(p, xn)^{125,124,123,122}\text{I}$ Reaksiyonları İçin Uyarılma
Fonksiyonları ve Toplam Tesir Kesitlerinin Teorik Hesaplamaları

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nurdan KARPUZ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL

HAZİRAN 2009

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**$^{125}\text{Te}(p, xn)^{125,124,123,122}$ Reaksiyonları İçin Uyarılma Fonksiyonları ve Toplam Tesir
Kesitlerinin Teorik Hesaplamaları**

Nurdan KARPUZ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL

FİZİK ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2009

ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL danışmanlığında, Nurdan KARPUZ tarafından hazırlanan “ $^{125}\text{Te}(p, xn)^{125,124,123,122}\text{I}$ Reaksiyonları İçin Uyarılma Fonksiyonları ve Toplam Tesir Kesitlerinin Teorik Hesaplamaları” başlıklı bu çalışma lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca

...../...../.....

Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anabilim Dalında
Yüksek lisans tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı, SOYADI

İmza

Başkan Doç. Dr. İskender AKKURT

Üye Yrd. Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL

Üye Yrd. Doç. Dr. Bekir ORUNCAK

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

$^{125}\text{Te}(p, xn)^{125,124,123,122}\text{I}$ Reaksiyonları İçin Uyarılma Fonksiyonları ve Toplam Tesir Kesitlerinin Teorik Hesaplamaları

Nurdan KARPUZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL

Radyoizotop üretimi çekirdek tepkimeleri için değerlidir. Genelde iyodinin izotopları biyomedikal araştırmalarda ve kliniksel nükleer ilaçlarda başrolü oynamaktadır. Büyük olasılıkla siklotron üretiminde radyohalojen I-123 kullanılır. I-123 ün en çok kullanım alanlarından biri tümörleri lokalize etmek ve göz önünde canlandırmak için monoklinal antikoları incelemektir. I-123 ün üretimi için ortak reaksiyon, yüksek oranda zenginleştirilmiş Te-125 de $^{125}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ reaksiyonunun bulunmasıdır.

Bu çalışmanın amacı, bir proton hızlandırıcısında 5.5 - 100.5 MeV arası proton gelme enerji aralığında, ^{125}Te hedef çekirdekle oluşturulan; $^{125}\text{Te}(p,n)^{125}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,2n)^{124}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,3n)^{123}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,4n)^{122}\text{I}$ reaksiyonlarının reaksiyon tesir kesitlerini teorik olarak hesaplamaktır.

Bu çalışma sonucu hesaplanan tesir kesitleri ile referanstaki tesir kesitleri karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

2009, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tesir kesiti, ^{125}Te , ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I , ALICE/ASH programı.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

Calculations of Total Cross-Sections and Excitation Functions of
 $^{125}\text{Te}(p, xn)^{125,124,123,122}\text{I}$ Reactions

Nurdan KARPUZ

Afyon Kocatepe University

Institute of Science

Department of Physics

Supervisor: Asit. Prof. Dr. Rıdvan ÜNAL

Radioisotop production is valuable for nuclear medicine. Usually, radioisotopes of Iodine have a fundamental role in biomedical research and in clinical nuclear medicine. Probably the most widely used cyclotron produced radiohalogen is I-123. One of the most promising uses of I-123 is in the imaging of monoclonal antibodies to localize and visualize tumors. The most common reaction for He production of I-123 is the $^{125}\text{Te}(p,4n)^{122}\text{I}$ reaction on highly enriched Te-124.

The main aim of this work is the calculate on of $^{125}\text{Te}(p,n)^{125}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,2n)^{124}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,3n)^{123}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,4n)^{122}\text{I}$ reaction cross sections for the ^{125}Te target nucleus bombarded with protons accelerated between 5.5 – 100.5 MeV energy range.

It has been seen that the calculated cross section results are in good agreement with the results in literature.

2009, 70 pages

Key words: Cross section, ^{125}Te , ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I , ALICE/ASH program.

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma; Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı öğretim elemanlarından Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL'ın danışmanlığında hazırlanmıştır.

ÇalıŐmam boyunca beni sürekli ümitlendiren, emeğini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen saygı değer hocam Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL'a; veri hesaplanmasında bilgisayar programında yardımcı olan saygı değer hocam ArŐ. Grv. Ahmet AKKURT'a; her an yanımda olan maneviyat kaynağım canım aileme teŐekkürlerimi sunarım.

Nurdan KARPUZ

15.06.2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çekirdeğin Temel Özellikleri	1
1.1.1 Bileşenleri.....	1
1.1.2 Yarıçap	2
1.1.3 Kütle.....	4
1.1.4 Enerji.....	4
1.1.5 Temel Etkileşimler.....	6
1.1.6 Çekirdekte Uyarılmış Durumlar	7
1.2 Nükleer Kuvvet ve Özellikleri.....	8
1.2.1 Döteron Atomu	10
1.2.2 Nükleer Reaksiyonların Sınıflandırılması.....	11
1.2.3 Bileşik Çekirdek Reaksiyonları.....	12
1.2.4 Direk Reaksiyonlar	12
2. TEMEL NÜKLEER MODELLER	15
2.1 Nükleer Model Çeşitleri	15
2.1.1 Sıvı Damlası Modeli	15
2.1.2 Kabuk Modeli.....	19
2.1.3 Kolektif Model	22
2.2 Tesir Kesiti	24
2.2.1 Tesir Kesiti Hesaplanması.....	26
2.2.2 Siklotron Tipi Bir Hızlandırıcı ile Radyoizotop ve Nötron Üretiminin Nükleer	

Reaksiyon Modelleri ile Hesaplanması	27
2.2.3 Siklotron	27
2.2.4 Siklotronlarla İzotop Üretimi	28
2.2.5 Siklotronlarla Radyoizotop Üretimi (p,n) Reaksiyonu ve 15 MeV lik Protonlarla	29
2.2.6 Radyoaktif İyodin Üretimi	29
2.3 Yapılan Önceki Çalışmalar	31
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1 ALICE/ASH Programına Veri Girişi	35
3.2 Girilen Enerji Değerleri ve Hesaplanan Tesir Kesiti Değerleri (Teorik).....	38
3.3 Girilen Enerji Değerleri ve Hesaplanan Tesir Kesiti Değerleri (Deneysel).....	40
4. HESAPLANAN TESİR KESİTLERİ	41
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
α	:Alfa
A	:Kütle numarası
A^0	:Angstrom
akb veya u	:Atomik kütle
B	:Bağlanma enerjisi
β	:Beta
c	:Işık hızı
e	:Elektron yükü
fm	:Femtometre
γ	:Gama
N	:Nötron sayısı
μN	:Manyetik moment katsayısı
R_0	:Çekirdeğin merkez yoğunluğu
Z	:Atom numarası

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
eV	:Elektron volt
EXFOR	:Deneysel nükleer reaksiyon data
GeV	:Giga elektron volt
MeV	:Mega elektron volt
PET	:Positron emission tomography
SPECT	:Single photon emission tomography

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	Çekirdeğin yük yoğunluğunun nükleer yarıçapa göre değişimi.....2
Şekil 1.2	Kararlı çekirdekler için nükleon başına bağlanma enerjisinin atomik kütleyle göre değişimi5
Şekil 2. 1	Yüzeydeki nükleonlar, çekirdeğin iç kısmındakilere göre daha az sayıda nükleonla etkileşir bu yüzden bağlanma enerjisi azdır. Çekirdek ne kadar büyükse, yüzeydeki nükleonların sayısı o kadar azdır17
Şekil 2. 2	Kabuk modeline göre nükleon enerji düzeylerinin sıralanışı (ölçekli değil). Sağdaki sütundaki sayılar gözlenen sihirli sayılara karşılık gelir21
Şekil 2. 3	Çift-Z, çift-N li çekirdeklerin en düşük 2^+ durumlarının enerjileri. İzotoplar düz çizgilerle birleştirilmiştir23
Şekil 2. 4	Çift-Z, çift-N li çekirdeklerin en düşük 2^+ ve 4^+ durumlarının $E(4^+) / E(2^+)$ oranı kütle numarasına karşılık gösterilmiştir. İzotoplar düz çizgilerle birleştirilmiştir.....24
Şekil 4. 1	Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV enerji aralığında reaksiyonun I-122 fonksiyonu52
Şekil 4. 2	Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV enerji aralığında reaksiyonun I-123 fonksiyonu53
Şekil 4. 3	Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV enerji aralığında reaksiyonun I-124 fonksiyonu54

Şekil 4. 4	Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV enerji aralığında reaksiyonun I-125 fonksiyonu.....	55
Şekil 4. 5	Proton gelme enerjisi 5.5 – 100.5 MeV enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-122 fonksiyonu	56
Şekil 4. 6	Proton gelme enerjisi 5.5 – 100.5 MeV enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-123 fonksiyonu	57
Şekil 4. 7	Proton gelme enerjisi 5.5 – 100.5 MeV enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-124 fonksiyonu	58
Şekil 4. 8	Proton gelme enerjisi 5.5 – 100.5 MeV enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-125 fonksiyonu	59
Şekil 4. 9	Proton gelme enerjisi 5.5 – 100.5 MeV enerji aralığında reaksiyonun teoriksel I-122, I-123, I-124, I-125 fonksiyonu	60
Şekil 4. 10	Proton gelme enerjisi 5.5 – 100.5 MeV enerji aralığında reaksiyonun deneysel I-123, I-124, I-125 fonksiyonu	61
Şekil 4. 11	Proton gelme enerjisi 5.5 – 100.5 MeV enerji aralığında reaksiyonun deneysel ve teorisel I-122, I-123, I-124, I-125 fonksiyonları	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1. 1	Farklı metotlarla bulunan nükleer yarıçaptaki ($R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$) r_0 değerleri.....	3
Çizelge 1. 2	Temel etkileşmelerin alan kuantumları ve alan kuantumlarının spin, kütle, menzil ve şiddet değerleri	6
Çizelge 2. 1	İyodin I-123 üretimi	30
Çizelge 3. 1	Teorik olarak girilen enerji değerleri ve hesaplanan tesir kesiti değerleri	38
Çizelge 3. 2	Deneysel olarak girilen enerji değerleri ve hesaplanan tesir kesiti değerleri	40
Çizelge 4. 1	Proton gelme enerjisi 10-100 MeV aralığındaki I-122 nin hesaplanan tesir kesiti değerleri	41
Çizelge 4. 2	Proton gelme enerjisi 10-100 MeV aralığındaki I-123 ün hesaplanan tesir kesiti değerleri	42
Çizelge 4. 3	Proton gelme enerjisi 10-100 MeV aralığındaki I-124 ün hesaplanan tesir kesiti değerleri	42
Çizelge 4. 4	Proton gelme enerjisi 10-100 MeV aralığındaki I-125 in hesaplanan tesir kesiti değerleri	43
Çizelge 4. 5	Proton gelme enerjisi 5.5-38.8 MeV aralığındaki I-122 nin hesaplanan tesir kesiti değerleri	44

Çizelge 4. 6	Proton gelme enerjisi 5.5-38.8 MeV aralığındaki I-123 ün hesaplanan tesir kesiti değerleri	45
Çizelge 4. 7	Proton gelme enerjisi 5.5-38.8 MeV aralığındaki I-124 ün hesaplanan tesir kesiti değerleri	46
Çizelge 4. 8	Proton gelme enerjisi 5.5-38.8 MeV aralığındaki I-125 in hesaplanan tesir kesiti değerleri	47
Çizelge 4. 9	Proton gelme enerjisi 39.1-100.5 MeV aralığındaki I-122 nin hesaplanan tesir kesiti değerleri	48
Çizelge 4. 10	Proton gelme enerjisi 39.1-100.5 MeV aralığındaki I-123 ün hesaplanan tesir kesiti değerleri	49
Çizelge 4. 11	Proton gelme enerjisi 39.1-100.5 MeV aralığındaki I-124 ün hesaplanan tesir kesiti değerleri	50
Çizelge 4. 12	Proton gelme enerjisi 39.1-100.5 MeV aralığındaki I-125 in hesaplanan tesir kesiti değerleri	51

1. GİRİŞ

Nükleer fizik, atomu meydana getiren çekirdeğin özellikleri ve birbirleri ile yaptıkları etkileşmeler ile ilgilenir. Bu nedenle nükleer fiziği çekirdeğin statik özellikleri (nükleer yapı) ve dinamik özellikleri (bozunma ve nükleer reaksiyonlar) olmak üzere iki ana kısımda incelemek mümkün olur. Nükleer fizik günümüzde pek çok kullanım alanına sahiptir. Bu alanlardan bazıları şu şekildedir:

1. Tıp alanında: Teşhis ve tedavi amaçlı kullanılmaktadır. Nükleer fizik bünyesinde yapılan hızlandırıcılarla dokular, kemikler ve organlar test edilmekte ve beraberinde teşhiste yardımcı olmaktadır. Kanserli hücrelerin öldürülmesi için proton, nötron veya ağır iyonlar kullanılmaktadır.

2. Endüstri alanında: Basınç boruları, kaynatıcılar ve metal dökme kalıpların içindeki çatlak ve yarıkların araştırılmasında kullanılmaktadır.

3. Temel bilimler alanında: Fizik alanında; katıların elektron yapısını, yüzeylerin ve ara yüzeylerin incelenmesinde kullanılmaktadır. Kimya alanında; elektron spektroskopisi ile kimyasal analizde önem teşkil etmektedir. Biyoloji alanında ise; akışkan yüzeylerde kompleks biyomoleküllerin yapısını incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Nükleer yapının insanlık yararına olan kullanım alanlarının yanında insan neslinin sürekli tehdit altında olmasına sebep olan kitle imha silahlarının yapılmasına da olanak sağlamıştır.

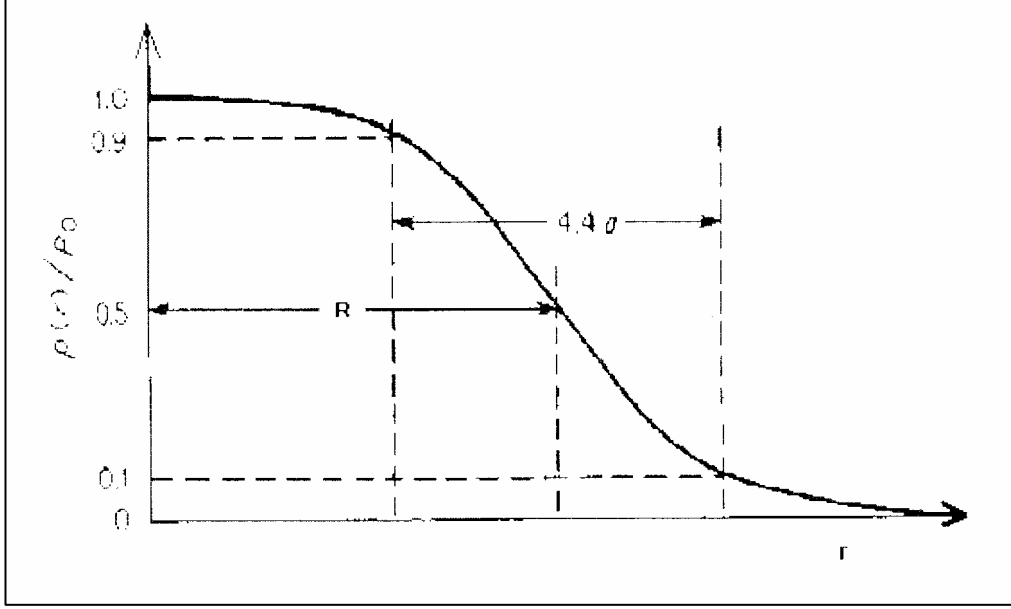
1.1 Çekirdeğin Temel Özellikleri

1.1.1 Bileşenleri

Atomun kimyasal özellikleri elektron yapısıyla, dinamik ve kinetik davranışını sembolize eden fiziksel özellikleri ise kütleyle ilgilidir. Bir atom çekirdeği denilince, çekirdek içindeki pozitif yüklerin toplamı ve toplam kütle sayısı akla gelir. Atom kütlelerinin neredeyse tamamı çekirdekten kaynaklanır.

1.1.2 Yarıçap

Elektron saçılma deneylerinin sonuçları, nükleer yoğunluğun çekirdek içinde yaklaşık olarak sabit, yüzeyde ise hızlıca sıfıra gittiğini göstermektedir (Şekil 1. 1).



Şekil 1. 1 Çekirdeğin yük yoğunluğunun nükleer yarıçapa göre değişimi (Boztosun 2005).

Deneysel çalışmalar, nükleer yarıçapın $R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$ şeklinde değiştiğini gösterir. İfadedeki r_0 sabiti deneysel olarak bulunabilir ve değeri $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ m veya 1,4 fm dir. İfadede yer alan A belirtilen kütle sayısıdır. Deneysel yük yoğunluğu,

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R}{\alpha}\right)} \quad (1.1)$$

ifadesine uyar. Denklemdaki ρ_0 çekirdeğin merkez yoğunluğu, R çekirdeğin yoğunluğunun yarıya düştüğü mesafe ve α ise çekirdek kabuk kalınlığının bir ölçüsüdür. t kabuk kalınlığı olmak üzere $t = 4,4\alpha$ dır. Kabuk kalınlığı t , nükleer yoğunluğun %90'ından %10'una düştüğü uzaklık olarak tanımlanır. Yapılan deneyler

neticesinde tüm çekirdeklerin merkez yoğunluklarının aynı olduğu ve yarıçapın $A^{\frac{1}{3}}$ ile değiştiği görülmektedir.

Nükleer yarıçap çekirdek merkezi ve gelen mermi çekirdeğin nükleer kuvvetten etkilenmeye başladığı uzaklıktır. Nükleer metotlarla elde edilen yarıçapların biraz daha büyük olması beklenir. Çünkü nükleer kuvvet çekirdeğin gerçek fiziki büyüklüğünden biraz daha büyük uzaklıkları etkileyecektir. Aşağıdaki çizelge 1. 2’de nükleer kuvvetin yarıçapı ve yük yarıçapı farklı metotlarla bulunan değerleri gösterilmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi nükleer kuvvetin yarıçapı yük yarıçapından daha büyüktür.

Çizelge 1. 1 Farklı metotlarla bulunan nükleer yarıçaptaki ($R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$) r_0 değerleri.

Metot	$r_0 (fm)$
A. Kuvvet Yarıçapı	
1. Alfa saçılması	1,414
2. Alfa bozulması	1,48
3. Hızlı nötronların saçılması	1,37
B. Yük Yarıçapı	
1. elektron saçılması	1,26
2. Mezonik atom	1,2
3. Ayna çekirdekler	$1,28 \pm 0,05$
4. Proton saçılması	$1,25 \pm 0,05$
5. İzotopik kayma	1,20

Nükleer kuvvet çekirdekte proton ve nötronları bir arada tutan kuvvettir. Nükleonların bir araya gelerek oluşturdukları çekirdeğin kütlesi, çekirdeği oluşturan nükleonların kütesinden küçüktür. Bu aradaki fark kütle, yani kütle kaybı $\Delta E = \Delta Mc^2$ şeklinde karşılığı vardır. Kayıp kütleyle karşılık gelen bu enerji bağlanma enerjisidir.

1.1.3 Kütle

Nükleer kütleler “atomik kütle birimi” cinsinden ölçülmektedir ve gösterimi “akb veya u” şeklindedir. İfade olarak nötr bir karbon kütlelerinin 12 de biridir (1/12). Nükleer reaksiyon ve bozunmaların incelenmesinde çoğunlukla kütle enerjileri kullanılmaktadır. $1u=1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg ya da $931,502 \text{ MeV}/c^2$ olarak tanımlanır. Böylelikle nükleonlar yaklaşık olarak 1000 MeV kadarlık kütle enerjisine sahip olurlar. Kütlelerin enerjiye dönüşümü görecelik ifadesi $E=mc^2$ ifadesiyle yapılır. Birim olarak $c^2=931,502 \text{ MeV}/u$ alınır.

Bir çekirdeğin kütlesi, o çekirdeği oluşturan parçacıkların serbest haldeki kütlelerinin toplamından daha küçüktür. Bu farkın küçük veya büyük oluşuna göre çekirdeğin sağlamlığı (az veya çok) belirlenir. Einstein’ın $E=mc^2$ formülüne göre bu kütle farkı c^2 ile çarpılırsa enerji yani bağlanma enerjisi değeri bulunmuş olur. Bağlanma enerjisi çekirdeğin bileşenlerini bir arada tutan enerjidir. Ve beraberinde çekirdeği parçalamak için gerekli olan enerjidir. Bu enerji şöyle ifade edilir:

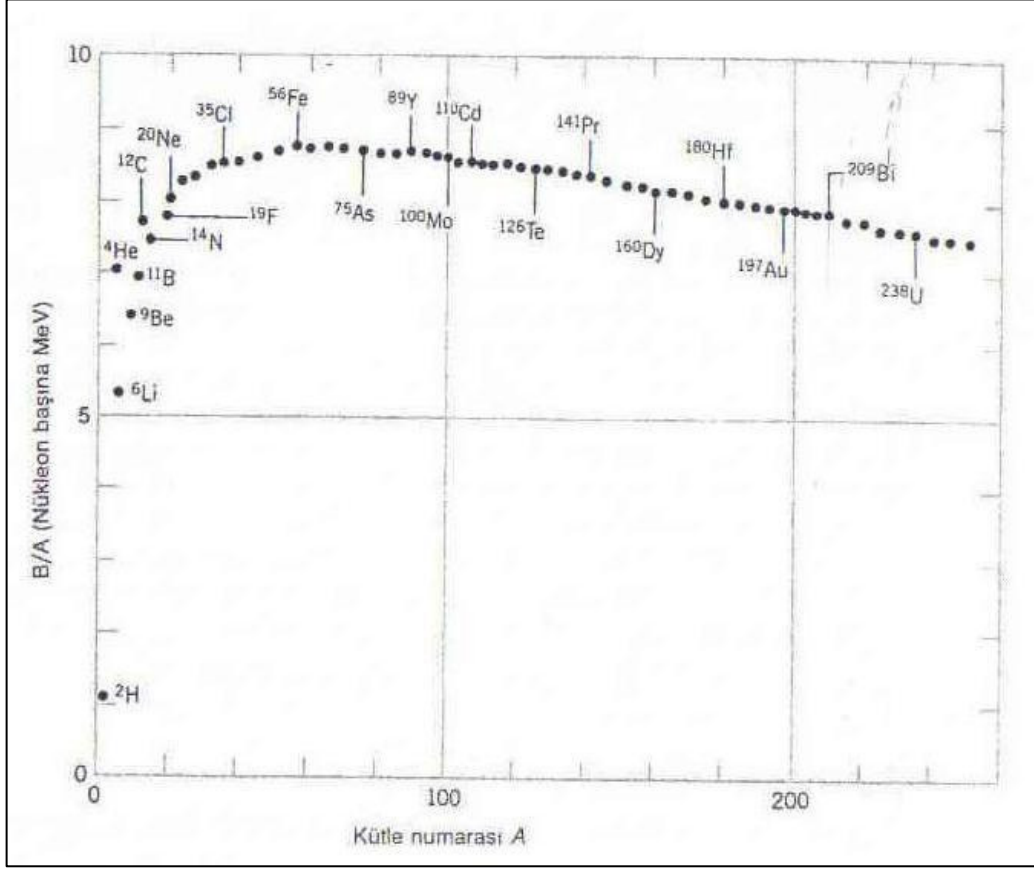
$$B = [Zm_p + Nm_n - M(^A X)]c^2 \quad (1.2)$$

Denklemdaki Z atom numarasını, N nötron sayısını, M ($^A X$) çekirdeğin kütlesini, A kütle sayısını ifade eder.

1.1.4 Enerji

Nükleer enerji birimi milyon elektron-volt (MeV) dur. Genel olarak α ve β bozunmalarının enerjileri 1 MeV’luk bir enerji aralığına sahiptir. Düşük enerjiye sahip reaksiyonlar 10 MeV’luk kinetik enerji ile oluşturulur. Bu tip enerjiler durgun kütle enerjilerinden daha küçüktür. Buna bağlantılı olarak nükleonların enerji ve momentumlarında göreceli olmayan bağıntılar kullanılır.

Çekirdeklerin nükleon başına bağlanma enerjilerinin bir sistematığı yapıldığı zaman Şekil 1. 2'dekine benzer durum sözkonusudur.



Şekil 1. 2 Kararlı çekirdekler için nükleon başına bağlanma enerjisinin atomik kütleyle göre değişimi (Krane 1992).

Bu şekilden şu sonuçları çıkarabiliriz:

- * Çekirdeklerin nükleon başına bağlanma enerjileri yaklaşık sabittir; $A=60$ için $\frac{B}{A} \cong 8,7$ MeV maksimum değerindeyken, $A=240$ için $\frac{B}{A} \cong 7,5$ MeV değerini alır. (B çekirdeğin bağlanma enerjisi ve A atomik kütlesidir).
- * Küçük kütleli çekirdeklerin bazılarında ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$ gibi çekirdeklerin bağlanma enerjisi çok büyüktür. Bu özelliği sıvı damlası modeli açıklayamadığı için kabuk modeli geliştirilmiştir.
- * Şekilden de görüldüğü gibi eğri, füzyon ve fisyon olabilirliğini doğrulamaktadır; kütle numarası büyük olan çekirdekler kararsızdır. Kararlı

olabilmesi için daha küçük çekirdeklere bölünürler. Ve bu sırada çıkan enerji çok büyüktür. Örneğin ^{238}U 'in nükleon başına bağlanma enerjisi 7,5 MeV iken ikiye bölündüğünde oluşan parçacık enerjisi ise 8,5 MeV dir. Ve açığa çıkan enerji 1 MeV dir.

- * Çekirdeklerin nükleon başına bağlanma enerjisinin sabit olması nükleonların yalnız komşu nükleonlarla etkileştiğini göstermektedir. Bu durum nükleer kuvvetin menzilin nereden çok kısa olduğunu açıklamaktadır.

1.1.5 Temel Etkileşimler

Doğada 4 temel etkileşim sözkonusudur. Bunlar gravitasyonel, elektromanyetik, kuvvetli ve zayıf etkileşimlerdir. İki parçacık arası etkileşme bu iki parçacığa özgü olan bir parçacığın değiş-tokuş edilişiyle mümkündür ki bu parçacığa alan kuantumu denir.

Bu dört etkileşmenin alan kuantumları ve beraberindeki spin, kütle, menzil, şiddet değerleri aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

Çizelge 1. 2 Temel etkileşmelerin alan kuantumları ve alan kuantumlarının spin, kütle, menzil ve şiddet değerleri.

Etkileşme	Taşıyıcı	Spin	Kütle(GeV)	Menzil(m)	Şiddet
Gravitasyonel	Graviton	2	0	∞	10^{-39}
Elektromanyetik	Foton	1	0	∞	10^{-2}
Kuvvetli	Gluon	1	0	10^{-15}	1
Zayıf	W^{\pm}, Z^0	1	80.2, 91.2	10^{-18}	10^{-5}

Parçacıkları ilk olarak “Fermiyon” ve “Bozon” olarak iki gruba ayırabiliriz. Fermiyonlar Fermi-Dirac istatistiğine uyan, buçuklu spinli parçacıklardır. Elektron,

proton, nötron gibi parçacıklar fermiyon grubundadır. Bozonlar ise Bose-Einstein istatistiğine uyan, tamsayı spinli parçacıklardır. Taşıyıcılar bu gruptadırlar.

Parçacıklar Lepton ve Hadron olarak da ikiye ayrılır. Leptonlar β bozunması ve zayıf etkileşmelerde görülürken, iç yapıya sahip olmadıklarından elementler parçacık olarak düşünülür. Spinleri $\frac{1}{2}$ olup fermiyon grubundadırlar. Her birinin bir anti-parçacığı vardır. Elektron, müon, tau, nötrino gibi parçacıklar leptondur.

Hadronlar kuvvetli ve zayıf etkileşmelerde etkileşmeye katılan ağır parçacıklar olup spinlerinin tamsayı ya da yarım olmasına göre baryonlar ve mezonlar olarak ayrılırlar. Baryonlar yarım spinli olan gruptur, örnek olarak proton ve nötron verilebilir. Mezonlar ise tamsayı spinlidirler. $\pi^+, \pi^-, \pi^0, \rho^-, \rho^0, \omega, \eta$ birer mezondur.

Kuarklar maddenin en elementer parçacıklarıdır, spinleri $\frac{1}{2}$ dir. Yukarı (top) ve aşağı (bottom) şeklinde adlandırılırlar ve yukarı olanın elektrik yük değeri $+\frac{2}{3}e$ ve aşağı olanın yük değeri ise $-\frac{1}{3}e$ 'dir. Üç kuark birleşerek baryon, kuark-antikuark birleşerek mezon oluşturur.

1.1.6 Çekirdekte Uyarılmış Durumlar

Çekirdek, atomdakine benzer olacak şekilde nükleer reaksiyonlar sonucu uyarılabilir. Tek valans nükleon kabuk şekline sahipse, (alkali atomların tek valans elektronuna sahip olmasına benzer şekilde) düşük uyarılmış durumlar sözkonusudur. Tek parçacık seviyelerinin uyarılması ve beraberinde bu seviyelerin belirlenmesi kabuk modeli için önem teşkil etmektedir. Nükleer reaksiyondaki hedef ve mermi çekirdek için kompleks yapıda oldukları düşünülürse, gelen parçacığın enerjisiyle bağlantılı olarak hedef ve mermi veya her ikisi de uyarılabilir. Uyarılmaya ilk olarak yüzeyde bulunan değerlik nükleonlarından başlanır. Enerjinin durumuna göre (enerji çok yüksekse) içerdeki nükleonlarda uyarılabilir. Nükleonlar uyarılmış durumlarında uzun süre kalamazlar, kararlı olabileceği taban durumuna hareket ederler. Taban durumuna hareketleri

esnasında dışarıya γ – ışınları yayınlırlar. Bu ışınlar analiz edilerek kompleks çekirdeklerin uyarılmış enerji seviyeleri hakkında bilgi edinilebilir. Nükleon bir üst uyarılmış durumlardan taban durumuna geçerken veya taban durumundan üst uyarılmış seviyelere çıkarken verdiği veya aldığı dönme kinetik enerjisi,

$$E(I) = \frac{\hbar^2}{2I} [I(I+1) - I_0(I_0+1)] \quad (1.3)$$

şeklinde verilir. Burada I, uyarılmış seviyelerin spini ve E(I) uyarılma enerjisidir. I_0 ise $E(I_0) = 0$ da taban durumundaki spindir. I ise çekirdeğin eylemsizlik momentidir. Çift N ve çift Z ye sahip olan çekirdekler için $I_0 = 0$ ve birçok durumda yalnız çift I en düşük banttadır.

Çekirdeklerin dönme kinetik enerjisine ek olarak titreşim enerjisi de vardır. Bu titreşim enerjisi nükleonların yaklaşık küresel harmonik osilasyon yapmasından kaynaklanır. Bu osilasyonların kuantası fononlar olarak adlandırılır ve enerjisi $\hbar\omega_\lambda$ ya sahiptir. Çift N ve çift Z çekirdeklerde uygun enerji spektrumu,

$$E_{n(\lambda)} = n(\lambda)\hbar\omega_\lambda \quad (1.4)$$

şeklindedir. Burada $n(\lambda) = 0,1,2,\dots$ değerlerini alır ve fonon sayısı 2^λ dır. Titreşim durumları arasındaki geçişler çok şiddetli olur fakat dönme durumundaki kadar şiddetli değildir.

1.2 Nükleer Kuvvet ve Özellikleri

Mikroskobik sistemlerin iç dinamiklerini kuvvetler cinsinden direk olarak yazamayız. Fakat bir potansiyelden türetebiliriz. Dolayısıyla nükleer kuvvetleri anlamak için yazılan nükleer potansiyellerin özellikleri çok önemlidir. Çekirdeği dikkate aldığımızda protonlar yüklerinden dolayı birbirlerine elektrostatik kuvvet uygularlar, bunu Coulomb potansiyeliyle temsil edebiliriz. Bu itici potansiyeli çok şiddetli olan çekici nükleer potansiyel dengeler fakat nükleer potansiyel o kadar şiddetlidir ki nükleonlar

birbirlerine çok yaklaşır, çekirdeğin bu çöküşü merkezci potansiyel tarafından önlenir ki bu potansiyel yaklaşık 0,5 fm'de etki etmeye başlar. Bu üç potansiyelin veya kuvvetin dengesi sonucu çekirdek kararlı yapıda kalır. Proton sayısı büyük olan çekirdeklerde nötronların, proton-proton etkileşimini perdelemesine rağmen Coulomb kuvveti nükleer kuvveti yener ve çekirdek kararsız hale gelerek bölünmek zorunda kalır. Çekirdekte var olan çekirdek kuvvetleri makroskobik fizikte karşılaşılan kuvvetlerden çok daha büyüktür. Diğer taraftan, Rutherford'un yaptığı saçılma deneyleri, çekirdeğin merkezinden 10 fermi gibi, küçük uzaklıklarda çekirdek kuvvetlerinin, aynı çekirdeğe ait elektrostatik kuvvetlere nazaran ihmal edilebilecek kadar zayıf olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, çekirdek kuvvetlerinin sonlu ve çok kısa menzile sahip oldukları söylenir.

Çekirdek kuvvetlerinin elektromanyetik alana benzer şekilde bir alanla tasfir edilebileceğini mümkün olduğunu düşünmek yanlış olmaz. Çekirdeğin elektromanyetik alanında elektriksel potansiyel, dışardan itibaren Coulomb kanununa uygun sonuçlar verecek şekilde artar. Yaklaşık 10^{-13} cm 'lik bir uzaklıkta maksimuma ulaşır. Bu yaklaşıma göre çekirdek bir potansiyel Seddi ile kuşatılmış gibi var sayılır.

Çekirdek protonlarının çok küçük mesafelerde bir birleri üzerinde çok büyük kuvvet uygulamalarına karşın, çekirdeğin sağlamlığını koruması, potansiyel engelinin içinde etkili olan çekirdek kuvvetlerinden dolayıdır.

Nükleonlar arasında etkili olan bu çekici kuvvetin çıkış yeri tam olarak açıklanamamakla birlikte nükleonlar arasında bir tanecik alışverişinin (π mezon alışverişi) sebep olduğu ileri sürülmektedir.

1935'de çekirdek kuvvetlerinin mezon kuramı ortaya atılmıştır. Çekirdeklerin çok küçük boyutlu parçacıklar olmasını hesaba katan Yukawa, nükleonlar arasından mezon alışverişi sonucunda, kısa mesafelerde etkiyen güçlü bir kuvvetin ortaya çıktığını öne sürmüştü ve mezonun kütesini hesaplamıştır. Ama bu kuram çekirdeklerin bütün özelliklerini tanımlamada yeterli olmamıştır.

Deneysel gözlemlerden ve teorik verilerden nükleer kuvvet hakkında aşağıdakileri yazabiliriz (Boztosun 2005):

- * Nükleer kuvvet kısa menzilli çekici ve çok şiddetlidir. Ancak nükleonlar arasındaki uzaklık 0,5 fm'den daha az olduğu zaman, nükleonlar itici ve şiddetli bir kuvvetle karşılaşır ki bu Pauli dışarlama prensibine uyar.
- * Nükleer kuvvetin menzili en fazla çekirdek mertebesinde; nükleonlar yalnız komşu nükleonlarla etkileşir.
- * Nükleer kuvvetler doyma karakteristiği gösterir. Yani çekirdek içindeki nükleonların etkileştiği nükleon sayısı sınırlıdır. B/A oranının nükleon sayısından bağımsız oluşu bunu doğrulamaktadır. Ayrıca yoğunluğun çekirdek içerisinde sabit oluşu buna delil olarak gösterilebilir.
- * Nükleer kuvvet yükten bağımsızdır. Yani p-p, n-n ve p-n etkileşimi için nükleer potansiyel aynıdır.
- * Nötron-proton saçılma deneyleri yüksek enerjilerde protonun nötrona nötronun protona dönüştüğünü göstermektedir. O halde çekirdek kuvvetleri arasında bir değiş tokuş kuvveti olması gerekir.
- * Nükleon-nükleon kuvveti nükleonların spinlerinin paralel veya anti paralel olup olmamalarına bağlıdır.
- * Nükleon-nükleon kuvvetinin merkezi olmayan bir tensör bileşeni vardır. Kuvvetin bu bileşeni merkezi kuvvetlerde bir hareket sabiti olan yörüngesel açısal momentumu korumaz.

Genel olarak bu özelliklere sahip olan çekirdek kuvvetlerinin ayrıntılı doğası günümüzde bile halen tam olarak anlaşılammıştır. Bu kuvvetlerin tabiatını açıklamak için çekirdek modelleri ortaya atılmıştır. Bu kuvveti anlamamanın en güzel yolu döteron atomunu incelemektir.

1.2.1 Döteron Atomu

Bir döteron 2H çekirdeği bir nötron ve bir protondan oluşmaktadır. Bir nötr 2H atomuna döteryum denir. Döteron, nükleonların en basit bağlı halidir ve bu yüzden

nükleon-nükleon etkileşmesinin incelemek için ideal bir örnektir. Bu nedenle döteron, çekirdek fiziği için önemlidir.

Hidrojenin uyarılmış durumları arasındaki elektromanyetik geçişlerin ölçülen Balmer serilerinin hidrojenin yapısını anlamayı sağladığı gibi, döteronun uyarılmış durumları arasındaki elektromanyetik geçişlerde onun yapısını anlamayı sağlamalı. Ancak, döteronun hiçbir uyarılmış durumu yoktur. Döteron öyle zayıf bağlı bir sistemdir ki, yalnız uyarılmış durumlar serbest bir proton ve serbest bir nötrondan ibaret olan bağlı olmayan sistemlerdir.

1.2.2 Nükleer Reaksiyonların Sınıflandırılması

Nükleer reaksiyonların gerçekleşmesi için mermi parçacıkların Coulomb bariyerini delmesi gerekir. Bunun için gelen parçacık lineer hızlandırıcılarla, siklotronlarla hızlandırılır veya nükleer reaktörlerde yüksek enerjili ışınlar kullanılabilir. Nükleer reaksiyonlar,

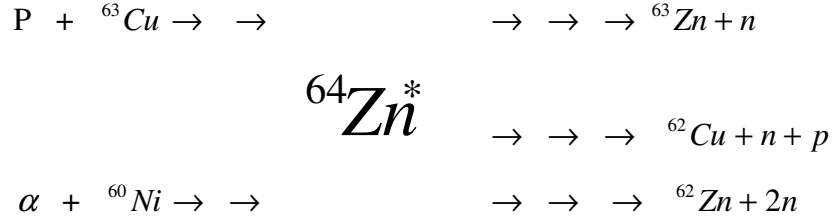


şeklinde ifade edilirler veya daha kısa gösterimle A(a,b)B şeklinde gösterilirler. Burada α hızlandırılan parçacık, A hedef çekirdek, B hedefte duran ve doğrudan gözlenemeyen ağır iyon, b tespit edilen ve sayılabilen parçacık ve Q reaksiyon sırasında açığa çıkan enerji veya reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan enerjidir. Burada α ve b genellikle nükleon veya hafif çekirdeklerdir. Q ifadesi,

$$Q = E_f - E_i = (m_B + m_b)c^2 - (m_A + m_a)c^2 \quad (1.6)$$

şeklinde verilir. Eğer Q pozitif ise reaksiyon endotermiktir, yani dışarı ısı salar. Q negatif ise reaksiyon ekzotermiktir, yani dışardan ısı alan bir reaksiyondur.

Nükleer reaksiyonlar yönetildiği mekanizmaya göre; bileşik çekirdek reaksiyonları, direk reaksiyonlar ve bu ikisi arasındaki durum olan rezonans reaksiyonları olarak sınıflandırılabilir.



1.2.3 Bileşik Çekirdek Reaksiyonları

Bu tür reaksiyonlar, $\alpha + A \rightarrow C^* \rightarrow B^* + b$ reaksiyonu şeklinde bir C^* ara durumuna sahiptirler. Bileşik çekirdek reaksiyonlarının meydana gelme süresi 10^{-22} sn den daha büyüktür. Bileşik çekirdek reaksiyonları hafif çarpışmaya ihtiyaç duyduğu için düşük enerjilerde (10-20 MeV) meydana gelirler. Tesir kesitleri direk reaksiyonlara göre çok büyüktür ve nükleonlar arası etkileşim rastgele olduğu için açıyla pek değişim göstermez, gelen parçacığın yönüne hafifçe bağlıdır.

Bileşik çekirdek modeline göre, bileşik çekirdeğin belli bir son ürünler kümesine bozunması için bağlı olasılığı, bileşik çekirdeğin oluşma şeklinden bağımsızdır. Bozunma olasılığı sadece sisteme verilen enerjiye bağlıdır. Etkin olarak bileşik çekirdek nasıl meydana geldiğini unuttur ve öncelikle istatistiksel kurallara göre bozunur.

1.2.4 Direk Reaksiyonlar

Direk reaksiyonlar aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- * Yüksek enerjilerde meydana gelirler ve reaksiyonun oluşma süresi bileşik çekirdek reaksiyonlarına göre daha kısadır (10^{-22} sn den daha kısa).
- * Reaksiyon sırasında mermi ve hedef çekirdek kontak yaparak şiddetli absorpsiyon meydana getirirler.
- * Etkileşim genelde yüzeyde, değerculik nükleonları arasında meydana gelir.

* Tesir kesitleri bileşik çekirdek reaksiyonlarınınkine göre düşüktür; tesir kesitleri küçük açılarda pik yaparken büyük açılarda şiddetleri düşmektedir.

Reaksiyonun bileşik çekirdek reaksiyonu mu yoksa direk reaksiyon mu olacağı mermi parçacığının enerjisine bağlıdır: 1MeV enerjili gelen nükleonun dalga boyu 4fm dir ve bu nedenle tek nükleonları göremez. Bu durumda bileşik çekirdek meydana gelmesi daha olasıdır. 20MeV lik bir nükleonun dalga boyu 1 fm civarında olup direk reaksiyonların meydana gelmesi daha olasıdır.

Elastik saçılma: Bu tür reaksiyonlarda giriş kanalı ($\alpha + A$), çıkış kanalına ($B+b$) eşittir. Yani $A=B$ ve $\alpha=b$ ve $Q=0$ dır. Diğer bir deyişle çekirdeklerin iç dinamiklerinde bir değişme olmamıştır, örnek olarak,



elastik saçılması verilebilir.

İnelastik saçılma: Eğer gelen parçacığın enerjisi Coulomb bariyerini aşabilecek kadar güçlü ise A hedef çekirdeği veya hem A hem de α uyarılabilir. Yani $A(\alpha, \alpha)A^*$ veya $A(\alpha, \alpha^*)A^*$. Tabi ki burada α nın kompleks bir çekirdek olduğunu düşünüyoruz. İnelastik saçılma durumunda Q değeri sıfırdan farklıdır; $Q = -E_x$, yani uyarılma durumunun enerjisine eşittir. Diğer bir deyişle gelen parçacığın enerjisinin bir kısmı hedef çekirdeğin uyarılmış durumlarına gitmiştir. İnelastik saçılma durumuna örnek olarak,



formülleri verilebilir.

Parçalanma reaksiyonları: Eğer mermi çekirdek kompleks bir çekirdekse, reaksiyon sırasında iki veya daha fazla bileşene ayrılabilir. Yani $A(\alpha, xy)$ A veya mermi hedefi uyarırsa $A(\alpha, xy) A^*$ şeklinde yazılabilir. Burada mermi çekirdek $\alpha = x + y$ şeklinde iki parçaya ayrılmıştır.

Transfer reaksiyonları: Bu tür reaksiyonlarda mermi çekirdekten hedefe veya hedeften mermi çekirdeğe nükleon transferi olur. Örneğin $A(d,p)B$ reaksiyonunda döterondan bir nükleon hedefe aktarılmıştır. Bu reaksiyon döteron soyma reaksiyonu olarak bilinir. Bir diğer örnek $A(p,d)B$ reaksiyonunda mermi nükleon hedeften bir nükleon kopararak döteron oluşturur.

Yakalama reaksiyonları: Bu tür reaksiyonlarda mermi çekirdek hedefle birleşerek uyarılmış yeni bir çekirdek oluşturur. Oluşan çekirdek kararlı hale geçebilmek için fazla enerjisini γ – ışınları şeklinde yayar. Örnek olarak,



reaksiyonu verilebilir. Bu reaksiyonların dışında mermi ve hedef çekirdek birleşerek,



biçiminde ikiden fazla ürün çekirdek de oluşturabilir. Örnek olarak,



reaksiyonu verilebilir.

Rezonans reaksiyonları: Bu tür reaksiyonlar direk reaksiyonlarla bileşik çekirdek reaksiyonları arasındaki reaksiyonlardır. Rezonans durumu belli enerji değerlerinde mümkün olabilir. Yani her enerji değerinde rezonans olamaz. Rezonans durumunda etkileşim potansiyelinin oluşturduğu dalgaların fazı ve genliği bariyer içinde ve dışında yaklaşık eşittir.

2. TEMEL NÜKLEER MODELLER

2.1 Nükleer Model Çeşitleri

2.1.1 Sıvı Damlası Modeli

Bu model çekirdeğin özelliklerini açıklamak için kullanılan ilk modeldir.

- * Çekirdeğin küresel olması,
- * Nükleon başına düşen bağlanma enerjisinin Periyodik tablonun büyük bir bölümünde sabit olmasının,
- * Nükleer maddenin kütle yoğunluğunun periyodik tablonun büyük bir bölümünde sabit olması,

özelliklerinin sıvı damlasının özelliklerine benzemesinden yola çıkılarak bu model geliştirilmiştir. Bu modelin öngördüğü yarı deneysel bağlanma enerjisi bağıntısı çeşitli değişikliklerden sonra şu hali almıştır:

$$E_b = E_h + E_y + E_c + E_a + E_c \quad (2.1)$$

$$= a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \frac{a_5}{A^{3/4}} \quad (2.2)$$

Denklemden yer alan katsayılar: $a_1 = 14.1 \text{ MeV}$, $a_2 = 13.0 \text{ MeV}$, $a_3 = 0.59 \text{ MeV}$, $a_4 = 19.0 \text{ MeV}$, $a_5 = 33.5 \text{ MeV}$. Bu ifadenin terimlerini şu şekilde açıklayabiliriz.

E_h hacim terimi: Bu terim her bir nükleonun tüm etrafının nükleonlarla çevrili olduğu varsayımına dayanılarak yazılmıştır. İki nükleon arasındaki bağlanma enerjisi U olarak düşünüldüğünde nükleon başına düşen bağlanma enerjisi $\frac{1}{2} U$ olarak bulunur. Bir nükleon en küçük hacmi kaplayacak şekilde paklendiğinde 12 nükleona temas edeceğinden sahip olduğu bağlanma enerjisi $6U$ olarak elde edilir. Bir çekirdekteki A tane nükleonun hepsinin içte olması durumunda, çekirdeğin bağlanma enerjisi:

$$E_h = 6AU$$

olacaktı. E_h enerjisi hacim enerjisi olarak anılır, A ile doğru orantılıdır ve basitçe

$$E_h = a_1 AU$$

şeklinde ifade edilir.

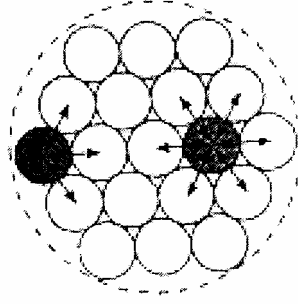
E_y yüzey terimi: Bu terim nükleonların tümünün ortada olmamasından yani bir kısmının yüzeyde olmasından dolayı hacim terimi için eklenen düzeltme terimidir.

Gerçekte, çekirdeğin bazı nükleonları şekilde görüldüğü gibi 12 den daha az komşuya sahiptir.

Bu tür nükleonların sayısı, çekirdek yüzeyinin büyüklüğüne bağlıdır. R yarıçaplı bir çekirdeğin yüzölçümü $4\pi R^2 = 4\pi R_0^2 A^{2/3}$ 'dir. Dolayısıyla, bağ sayısı en büyük değerden az olan nükleonların sayısı, $A^{2/3}$ ile orantılı olup bu, bağlanma enerjisini

$$E_y = -a_2 A^{2/3}$$

kadar azalır. Negatif E_y enerjisi bir çekirdeğin yüzey enerjisi diye anılır. Bu en çok, hafif çekirdeklerde önemlidir; çünkü bunlarda nükleonların daha büyük bir kesri yüzeydedir. Doğal sistemler her zaman düşük potansiyel enerjili yerleşimlere doğru gittiklerinden, çekirdekler en büyük bağlanma enerjili yerleşimlere doğru giderler. Dolayısıyla, bir çekirdek, bir sıvı damlasıyla aynı yüzey gerilimi etkilerini gösterecek ve diğer etkilerin yokluğunda küresel olacaktır, çünkü verilmiş bir hacim için en düşük yüzölçümüne sahiptir.



Şekil 2. 1 Yüzeydeki nükleonlar, çekirdeğin iç kısmındakilere göre daha az sayıda nükleonla etkileşir bu yüzden bağlanma enerjisi daha azdır (Beiser 1992).

E_c Coulomb terimi: Bu terim potansiyel enerjiden dolayı bağlanma enerjisine gelen katkıyı gösterir. Bir çekirdekteki her proton çifti arasındaki elektriksel itmede bağlanma enerjisini azaltmaya katkıda bulunur. Bir çekirdeğin E_c Coulomb enerjisi, Z tane protonu sonsuzdan çekirdek büyüklüğünde bir küresel topluluğa getirmek için yapılması gereken işittir. Birbirinden r uzaklığındaki bir çift protonun potansiyel enerjisi şöyledir:

$$V = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$Z(Z-1)/2$ tane proton çifti olduğundan

$$E_c = \frac{Z(Z-1)}{2} V = -\frac{Z(Z-1)e^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r}\right)_{ort}$$

bulunur. Burada $(1/r)_{ort}$, $1/r$ nin bütün proton çiftleri üzerinden ortalaması alınmış değeridir. Protonlar R yarıçaplı bir çekirdek içine düzgün olarak dağılmışlarsa $(1/r)_{ort}$ $1/R$ ye dolayısıyla $1/A^{1/3}$ ile orantılıdır:

$$E_c = -a_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

Coulomb enerjisi, negatiftir. Çünkü çekirdek kararlılığına karşıt bir etkiden dolayı ortaya çıkmıştır.

E_a asimetri terimi: Bu terim $Z \neq N$ durumunda bağlanma enerjisinde meydana gelen azalmayı gösterir. $Z \neq N$ durumunda ikisinin eşit olduğu durumdakinden farklı olarak daha yüksekteki enerji durumları doldurulur. İki enerji seviyesi arasında ε kadar fark olduğunu varsayarsak A 'yı değiştirmeden $N - Z = 8$ gibi bir nötron fazlalığı oluşturmak istersek, $N = Z$ olan bir çekirdekte $\frac{1}{2}(N - Z) = 4$ nötronun protonların yerine geçmesi gerekir. Yeni nötronlar, yerlerine geçtikleri protonlara göre enerjileri $2\varepsilon = 4\varepsilon/2$ kadar yüksek olan düzeylere yerleşeceklerdir. Yeni nötron sayısının $\frac{1}{2}(N - Z)$ olduğu genel durumda, her bir nötronun enerjisi $\frac{1}{2}(N - Z) \varepsilon/2$ kadar artacaktır. Gereken toplam iş şöyle bulunur:

$$\Delta E = (\text{yeni nötronların sayısı}) (\text{enerjideki artış / yeni nötron})$$

$$= \left[\frac{1}{2}(N - Z) \right] \left[\frac{1}{2}(N - Z) \frac{\varepsilon}{2} \right] = \frac{\varepsilon}{8}(N - Z)^2$$

$N = A - Z$ olduğundan $(N - Z)^2 = (A - 2Z)^2$ ve

$$\Delta E = \frac{\varepsilon}{8}(A - 2Z)^2 \quad (2.3)$$

bulunur. Bir çekirdekteki nükleonların sayısı ne kadar büyükse, enerji düzeyleri arasındaki ε aralığı o kadar küçük olup; ε , $1/A$ ile orantılıdır. Bu sebepten N ile Z arasındaki farktan doğan E_a asimetri enerjisi şöyle yazılabilir:

$$E_a = -\Delta E = -a_4 \frac{(A - 2Z)^2}{A} \quad (2.4)$$

Asimetri enerjisi negatiftir, çünkü çekirdeğin bağlanma enerjisini azaltır.

E_c çiftlenme terimi: Bu terim iki aynı nükleonun aynı olmayanlara göre daha kuvvetli bağlanmasından kaynaklanır. E_c çiftlenme enerjisi çift-çift çekirdekler için pozitif, tek-çift ve çift-tek çekirdekler için 0, tek-tek çekirdekler içinse negatif değer alır.

$$E_c = (\pm,0) \frac{a_5}{A^{3/4}} \quad (2.5)$$

2.1.2 Kabuk Modeli

Kabuk modeli üzerinde kurulan atom teorisi, atom yapısının karmaşık yapısını açıklamakta çok başarılı olmuştur. Bu modelde kabuklar giderek artan enerjili elektronlarla, Pauli prensibine uyacak şekilde doldurulur. En dıştaki tabakanın doluluk oranı, atomun davranışının bazı önemli taraflarını belirler. Model, atomik özelliklerin esas olarak değerlilik elektronları tarafından belirlendiği varsayımına dayanır. Atomik sistemlerin, ölçülen bazı değerleri modelin öngördükleri ile karşılaştırıldığında büyük bir uyum içinde olduğu görülür.

Proton ve nötronun ayırma enerjileri yarı deneysel bağlanma enerjisi formülü ile hesaplanan değerlerden sapmalar göstermesi, nükleer kabukların varlığını destekleyen kanıtlardan biridir. Ayrılma enerjisi, atomik iyonlaşma enerjisi gibi N veya Z ile düzgün olarak artar. Ayrılma enerjilerindeki ani ve kesikli davranışlar aynı proton ve nötron sayılarında ortaya çıkar. Bu sayılara (N veya Z =2, 8, 20, 50, 82 ve 126) sihirli sayılar denir.

Çekirdeğin kabuk modeli, sihirli sayıların varlığını ve bazı çekirdek özelliklerini, nükleonların bir ortak kuvvet alanındaki davranışlarıyla açıklama yönünde bir girişimdir.

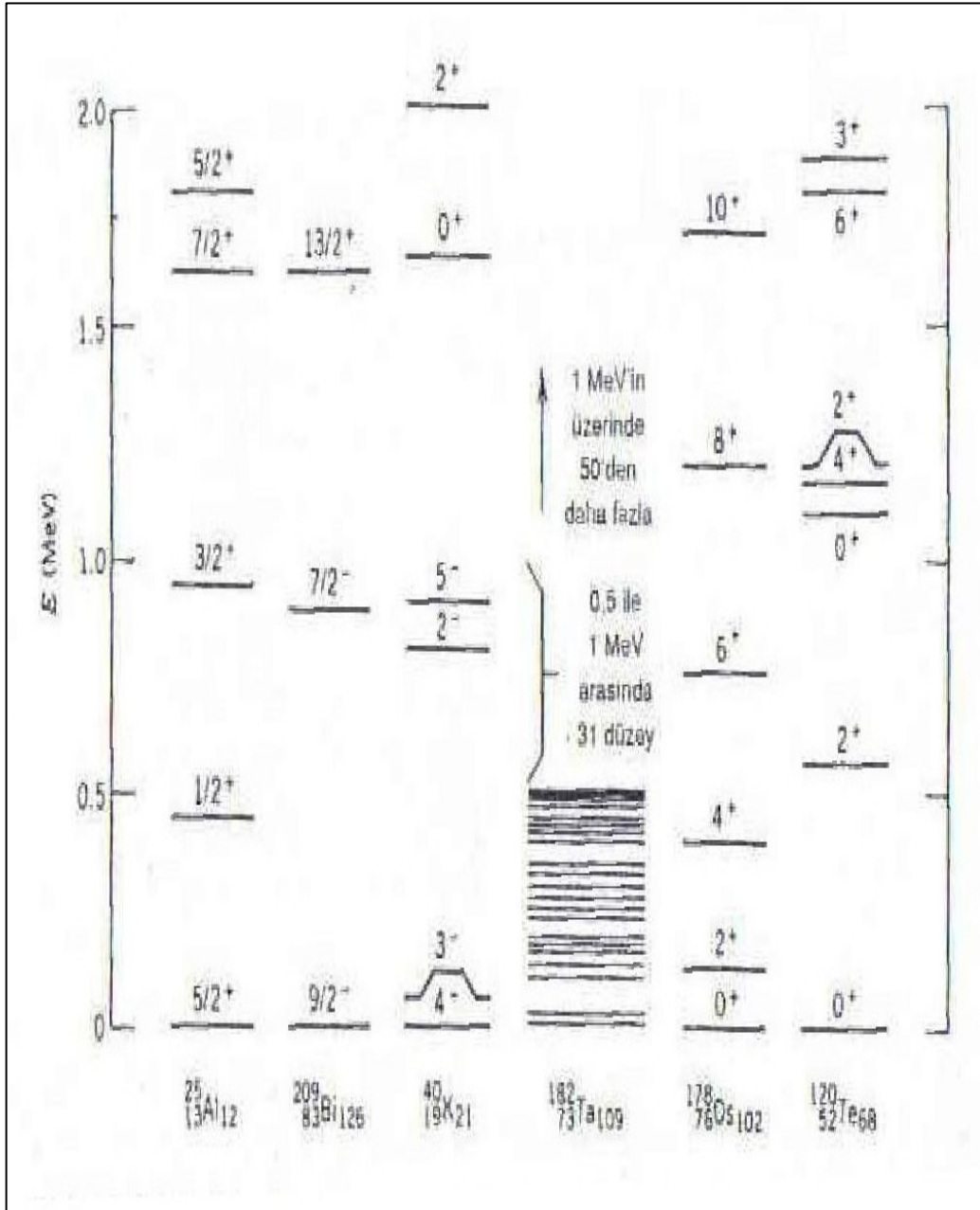
Kabuk kuramı $L \bullet S$ çiftleniminin sadece l değerlerinin küçük olduğu en hafif çekirdekler için geçerli olduğunu kabul eder. Bu modelde, ilgili parçacıkların S_i içsel spin açısal momentumları, bir S toplam spini oluşturmak üzere birbirleriyle eşleşirler. L_i yörünge açısal momentumları, bunlardan ayrı olarak bir L toplam yörünge momentumu oluşturmak üzere birbirleriyle bağlaşırlar. Daha sonra S ve L , birbirleriyle bağlaşılarak, büyüklüğü $\sqrt{J(J+1)}\hbar$ olan bir J toplam açısal momentumunu oluştururlar.

Bir ara etkileşim biçiminin geçerli olduğu bir geçiş bölgesinden sonra, daha ağır çekirdekler jj etkileşimi gösterirler. Bu durumda önce her parçacığın S_i ye L_i 'si bağlaşılarak, o parçacık için büyüklüğü $\sqrt{J(J+1)}\hbar$ olan bir J_i oluşturur, sonra değişik J_i ler birbirleriyle bağlaşılarak J toplam açısal momentumunu oluştururlar. jj etkileşimi çekirdeklerin büyük bir çoğunluğu için geçerlidir.

Kabuk modeli sihirli sayılardan başka, birçok çekirdek olgusunu da açıklar. Öncellikle, zıt spinli iki parçacık tarafından doldurulabilen enerji alt düzeylerinin varlığı çift Z ve çift N 'li çekirdeklerin bolluk eğilimini açıklar.

Kabuk modeli çekirdek açısal momentumlarını da önerebilir. Çift-çift çekirdeklerde, bütün proton ve nötronlar, birbirlerinin spin ve yörünge açısal momentumlarını yok edecek şekilde çiftlenmelidirler. Dolayısıyla çift-çift çekirdeklerin çekirdek açısal momentumları gözlemlendiği gibi sıfır olmalıdır. Çift-tek ve tek-çift çekirdeklerde, tek başına kalan "artık" nükleonun buçuklu spini, çekirdeğin geriye kalan kısmının tam sayı açısal momentumuyla birleşerek yarım tamsayı bir toplam açısal momentum verir. Tek-tek çekirdeklerin her birinin bir fazla nötronu ve bir fazla protonu bulunup bunların yarım tamsayı spinlerini vereceği toplam açısal momentum tamsayı olur. Bu öngörüyle her ikisi de deneyle doğrulanmıştır.

Spin-yörünge etkileşmesi için uygun bir yeğlilik kabul edildiğinde, her iki sınıf nükleonun da enerji düzeyleri Şekil 2. 2'de gösterildiği gibi dizilir.



Şekil 2. 2 Kabuk modeline göre nükleon enerji düzeylerinin sıralanışı. 2 MeV'in altındaki uyarılmış durumları gösteren bazı düzey şemaları (Krane 1992).

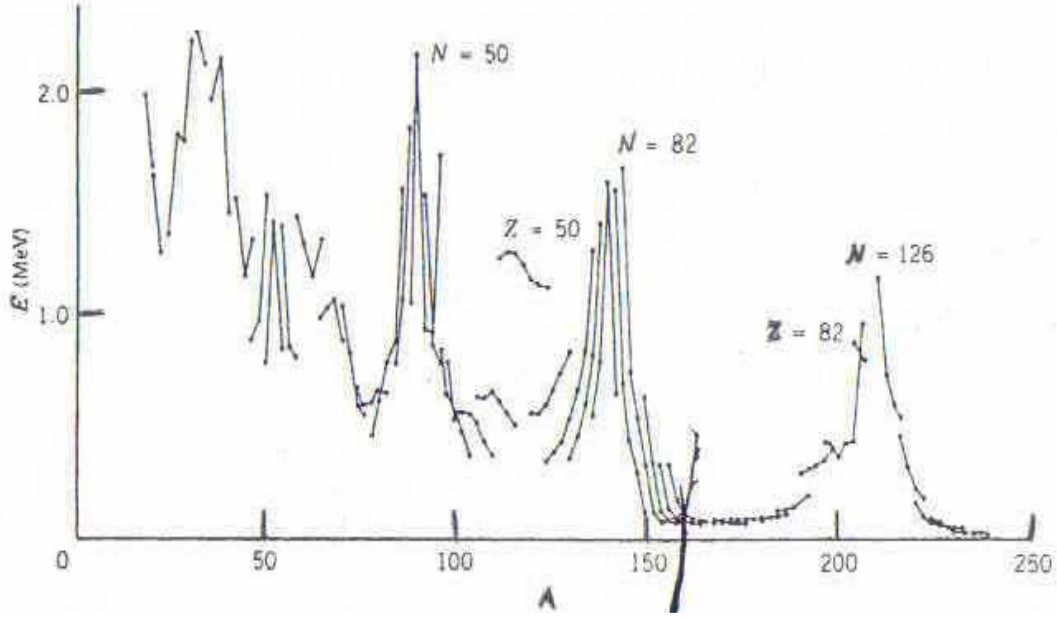
Düzeyler; n , toplam kuantum sayısına eşit olan bir önsayı, o düzeydeki her parçacık için l değerini alışılagelmiş biçimde ($l = 0,1,2,3,4,\dots$ 'ye karşılık gelmek üzere sırasıyla s, p, d, f, g,\dots) belirten bir harf ve j 'ye eşit olan bir alt indisle gösterilir. Spin-yörünge etkileşmesi, belli bir j 'ye karşılık gelen her durumu, J_i 'nin $2j+1$ tane mümkün yönelimi olduğundan, $2j+1$ alt duruma yarar. Aynı ayrı tabakalar kavramıyla uyum içindeki aralıklarla, düzeylerin birbirine olan uzaklıklarında büyük enerji boşlukları oluşur. Her çekirdek tabakasındaki çekirdek durumlarının sayısı, yükselen enerji sıralandırılmasıyla 2, 6, 12, 8, 22, 32 ye 44 'tür. Dolayısıyla tabakalar, bir çekirdekte 2, 8, 20, 28, 50, 82 ye 126 nötron veya proton bulunduğunda dolmuştur.

2.1.3 Kolektif Model

Aage Bohr ve Ben Mottelson tarafından ortaya atılan Kolektif model daha önce anlatılan sıvı damlası ve kabuk modelin birleştirilmesi sonucu oluşmuş, başarılı sonuçlar veren bir modeldir. Bu model; kabuk modelinde görülen, çekirdeklerin manyetik ve kuadropol momentlerini belirlemedeki eksiklikleri, bazı çekirdeklerin uyarılmış enerji seviyeleri için beklenen değerinde meydana gelen hataları giderir. Bunun yanında çift-çift olmayan bütün çekirdeklerin küresel olmayan şekilleri ile dönen bir çekirdeğin merkezkaç kuvvetinden doğan şekil bozukluklarını da hesaba katar.

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 2.3 ve 2.4) çift-çift çekirdeklerin kolektif davranış içeren dört farklı özelliği gösterilmiştir. İlk 2^+ uyarılmış durumunun (Şekil 2.3) enerjisinin A 'nın fonksiyonu olarak oldukça düzgün biçimde azaldığı görülmektedir. $A=150$ ile $A=190$ arasındaki bölgede $E(2^+)$ değerleri hem çok küçük hem de sabittir.

Yine, kapalı kabuk yakınındaki çekirdekler hariç $E(4^+) / E(2^+)$ oranları $A=150$ 'den küçük çekirdekler için kabaca 2,0 ve $150 < A < 190$ ile $A > 230$ bölgelerinde 3,3 değerine sahiptir.

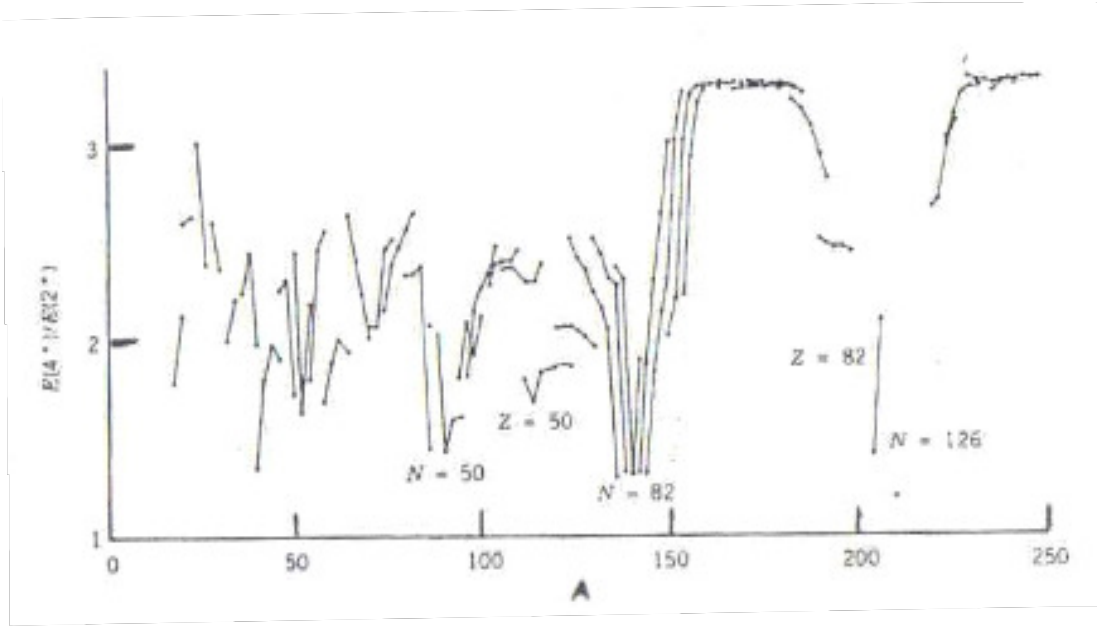


Şekil 2. 3 Çift-Z, çift N'li çekirdeklerin en düşük 2^+ durumlarının enerjileri. İzotoplar düz çizgilerle birleştirilmiştir (Krane 1992).

Daha önce Kabuk modelinin, $N=126$ 'nın bir nötron sihirli sayısı olduğu yolundaki öngörü gözlemlerle uyum içindedir. Fakat, $Z>109$ olan çekirdekler bilinmediğinden $Z=126$ 'nın bir proton sihirli sayısı olup olmadığı doğrulanamamaktadır. Hatta, $Z=82$ 'den sonraki proton sihirli sayısının, çekirdekdeki protonların Coulomb potansiyel enerjilerinden dolayı, $Z=126$ 'dan küçük olması olasılığı vardır. Büyük Z için bu enerji, çekirdek potansiyel enerjisine göre önem kazanır.

Coulomb potansiyeli, düşük l'li proton düzeyleri üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir çünkü, böyle düzeylerin olasılık yoğunluklarının arttığı çekirdek merkezi civarında daha kuvvetlidir. Sonuçta proton düzeylerinin sırası $Z=114$ 'ü bir proton sihirli sayısı yapacak şekilde değiştirir.

Kolektif model bu sonucu biraz daha geliştirerek $Z=110$ 'un $Z=82$ 'den sonraki proton sihirli sayısı için daha iyi bir aday olduğunu ileri sürer. Dolayısıyla $Z=110$ (veya 110 ile 114 arasında) ve $N=184$ olan bir çekirdek iki kez sihirli ve diğer ağır çekirdeklerden daha karalı olmalıdır. Böyle bir çekirdek veya çekirdekler doğada veya laboratuvarlarda henüz bulunamamıştır.



Şekil 2. 4 Çift-Z, çift-N li çekirdeklerin en düşük 2^+ ve 4^+ durumlarının

$E(4^+)/E(2^+)$ oranı kütle numarasına karşılık gösterilmiştir. İzotopları düz çizgilerle birleştirilmiştir (Krane 1992).

2.2 Tesir Kesiti

Tesir kesiti, gelen parçacık akısındaki azalmayı hesaplamak amacıyla ortaya atılmış bir kavramdır. Hedef parçacık üzerindeki soğurma ihtimaline veya herhangi bir olayın meydana gelme ihtimaline de denilir. Birimi barn (b) dır ve $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$ dir. Yani tesir kesiti alan boyutunda bir büyüklüktür. Gelen parçacık tesir kesiti ile belirtilen büyüklükteki bir alanın içine düşerse hedef ile etkileşmeye girer. Örneğin altın atomlarından oluşmuş çok çok ince (arka arkaya iki atom olmayacak kadar) bir hedefi alfa parçacıklarıyla bombardıman ettiğimizi düşünelim. Burada hedef çok ince olduğundan, bir miktar He çekirdeği hiç etkileşmeye girmeden hedefi geçerken bir kısmı çeşitli açılarla saçılır. Bir kısmı da u dönüşü yaparak geldikleri yöne geri döner. Saçılan alfaların saçılmadan geçenlerden farkı, altın çekirdeğinin coulomb kuvvetini hissedecek kadar çekirdeğe yaklaşmış olmalarıdır. Burada alfaların saçılma olasılığı bu etkin alanın (tesir kesitinin) büyüklüğüne bağlıdır. Tesir kesiti ne kadar büyükse saçılan alfaların sayısı da o kadar fazla olacaktır. Etkileşmenin çeşidine ve hedefin türüne göre etkileşmenin olduğu alan değişeceğinden her element ve çekirdeğin her etkileşme türü için ayrı bir tesir kesiti vardır.

I şiddetinde bir ışın demeti, t kalınlığındaki bir A yüzeyine gelsin. Maddenin birim hacmindeki atom sayısı n ve atomik tesir kesiti σ ise, ışına maruz kalan madde alanı $An\sigma$ olur. Bu ifadeye $n\sigma$ etkin alan tesir kesri adını alır. Etkin alan kesri f ile gösterilir ve levhadan geçen demetin şiddetindeki değişimin kesrini temsil eder. Gelen ışın demetindeki N parçacıktan N_s tanesi etkileşime giriyorsa, tesir kesitinin klasik ifadesi;

$$N_s = \sigma n N t \quad (2.6)$$

$$\sigma = \frac{N_s}{n N t} \quad (2.7)$$

olarak yazılır. Etkileşen ışın demeti, saçılma meydana geldikten sonra tesir kesiti farklı açılar için farklı değerler alır. Bunun için açığa bağlı başka bir tesir kesiti tanımlanır. Bu yeni tesir kesitine diferansiyel tesir kesiti denir ve birim katı açı başına düşen tesir kesiti olarak tanımlanır. Bu etkileşimde θ gelme açısı doğrultusundaki $d\Omega$ katı açısı içinde saçılan ışın sayısının, gelen ışın sayısına oranının ölçüsüdür. Diferansiyel saçılma tesir kesiti, gelen ışının birim katı açı başına saçılma ihtimali olarak da tanımlanır.

Nötronlarla oluşturulan reaksiyon tesir kesitleri fisyon ve füzyon enerji reaktörlerinin tasarımında önemli yer tutar. Bu tür reaksiyonların gerçekleştirilmesi sırasında materyallerin yapısal dayanıklılığını etkileyecek değişimler oluşabilmektedir. Seçilen reaktör malzemesi istenmeyen radyoaktiflik üretiminin en az olacak ve malzemenin yapısının şiddetli nötron bombardımanı altında bozulmayacağı şekilde seçilmelidir. Bu problemin öneminin anlaşılabilmesi ve sorunların giderilebilmesi için tesir kesitlerinin ve yayınlanma spektrumlarının deneysel olarak ölçülmesi ve önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için de teorik olarak hesaplanabilmesi gereklidir (Acir vd. 2006).

2.2.1 Tesir Kesiti Hesaplanması

Son zamanlarda, çekirdeklerin reaksiyon mekanizmalarının araştırılmasında ve birçok nükleer uygulama alanlarında önemli bir yer tutan reaksiyon tesir kesitlerini ölçmek için birçok deneysel teknikler ve bazı teorik modeller geliştirilmektedir. Nükleer uygulamalar için orta enerjilerde, içinde fisyon tesir kesitlerinin de bulunduğu, büyük miktarda nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin bilinmesine gerek vardır. Özellikle,

- Parçacık hızlandırıcılarının, fisyon ve füzyon reaktörlerinin zırhlanmasında
- Uzay araştırmalarında kullanılan insan ve gereçlerin maruz kaldığı radyasyonun kestirilmesinde
- Tıbbi radyoizotop üretimi ve radyasyon tedavisi konularında
- Nükleer santral ve diğer nükleer tesislerde üretilen uzun yarı ömürlü nükleer atıkların hızlandırıcı kullanılarak daha kısa yarı ömürlü izotoplara dönüştürülmesi (ADS) işlemlerinde nükleer veri eksikliği bulunmaktadır (Şarer 2007).

Doğada var olan veya laboratuvarlarda üretilen yaklaşık 4000 civarındaki izotopun, nötron, proton, alfa ve diğer nükleer parçacıklar için, birkaç GeV'e kadar uzanan enerji aralığında, nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin ölçülmesi fiziksel ve ekonomik olarak zordur.

Bu nedenle, teorik model hesaplamaları çok önemli bir rol oynamaktadır. Bunun için güvenilir nükleer modeller ve nükleer bilgisayar programları gereklidir (Şarer 2007). Reaksiyon sistematiği, teorik modeller kullanılarak tesir kesiti hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Demirkol vd. 2006).

Proton giriş reaksiyon tesir kesitleri denge ve denge öncesi modellerle hesaplanmaktadır. Denge hesaplamaları için Weisskopf-Ewing teorileri kullanılmaktadır. Denge öncesi hesaplamalar hibrid model, geometri bağımlı hibrid model, full exciton model ve Cascade Exciton Model ile yapılmaktadır. Uyarılma fonksiyonları denge ve denge öncesi reaksiyon modellerinden hesaplanarak deneysel değerlerle karşılaştırılır. Uyarılma fonksiyonlarının hesaplanmasında, denge öncesi bileşeni hibrid ve geometri bağımlı hibrid modeli ALICE91 programı kullanılarak

yapılmaktadır. Cascade Exiton Model bilgisayar programı ile hesaplanmaktadır. Deneysel veriler Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu' nun EXFOR/ CSISRS kütüphanelerinden elde edilir. Grafikler üzerinde deneysel veriler nükleer modellerle hesaplanan çizilen sonuçlarla karşılaştırılır.

2.2.2 Siklotron Tipi Bir Hızlandırıcı ile Radyoizotop ve Nötron Üretiminin Nükleer Reaksiyon Modelleri ile Hesaplanması

Siklotron, proton veya helyum çekirdeği gibi ağırca yüklü tanecikleri, aşırı büyük gerilimler gerektirmeden yüksek hızlara çıkarmakta kullanılan magnetik rezonanslı hızlandırıcı cihazdır. 1931'de Lawrence ve Livingston tarafından geliştirilmiştir. Bu cihaz sayesinde hızlandırılan yüksek enerjili tanecikler, atom çekirdeğini parçalayarak yapısını incelemek için kullanılır.

2.2.3 Siklotron

Siklotronda D harfine benzediği için "de" denilen iki elektrod bulunur. Hızlandırılacak olan yüklü parçacıklar "de" ler arasında siklotron aralığında serbest bırakılır. Aralıktaki elektriği alan, taneciği hızlandırarak "de"lerden birine doğru fırlatır."de"ye belirli bir hızla, manyetik alana dik olarak giren tanecik "de" nin içinde dairevi bir yörünge takip eder ve dönüp tekrar aralığa gelir. Tanecik tam aralığa geldiği anda "de" ler arasındaki elektriği alan yön değiştirecek olursa, hareket yönünde uygulanan ikinci bir itme dolayısıyla yeniden hızlandırılır. Böylece tanecik yarım daire çizip aralığa her gelişinde elektriği alanın yönü değiştirilerek yeni bir itmeye tabi tutulursa gittikçe daha fazla hız kazanır. Ağırlığı binlerce tonu bulan böyle bir cihazla, tanecikler kullanılarak 100MeV dolaylarında enerji elde etmek mümkündür. D ler bir magnetik alana yerleştirilir ($B=1,6 \text{ Weber}/m^2$), bu magnetik alan büyük elektromagnetlerle sağlanır.

- * İyonlar basıncı 10^{-6} mmHg civarına düşürülmüş boşlukta hareket ederler.
- * İyonun yörüngesi D nin dış kenarına geldiğinde negatif yüklü bir saptırıcı levha onu yörüngesine çeker.

Radyolüknidleri elde edilmesinde kullanılır. I-123, C-11, N-13, O-15, O-19, F-18, Fe-52...

Çok amaçlı siklotron; teşhis ve terapide medikal izotop uygulamaları alanında, ticari izotop üretimini ve R&D (Research and development) yi destekleyen akıllı bir evrensel alettir.

2.2.4 Siklotronlarla İzotop Üretimi

Klasik SPECT izotopları (p,2n) reaksiyonu yolu ile üretilir ve proton enerjileri ~25 MeV civarındadır.

Kısa ömürlü PET izotopların üretimi çoğunlukla (p,n) reaksiyonu yoluyla ve tercih edilen proton enerjisi ~15 MeV dir. Normal olarak PET için küçük siklotronlar kullanılır. Bununla birlikte, üretim teknolojisi ve hedefin yüksek standardından dolayı geniş ölçekli bir FDG-üretimi; (^{18}F - fluorodeoxyglucose veya FDG) düşük ışın zamanı gerektirdiğinden (yüksek üretilebilirlik), günümüzde geniş bir siklotron programıyla ekonomik olarak bütünleştirilebilir.

SPECT izotoplarına birkaç örnek şu şekilde verilebilir:

- * ^{201}Tl : ^{203}Tl (p,3n), ^{201}Pb , ^{201}Tl En önemli SPECT izotoplarından ve radiopharmaceutical Co. tarafından ticaretleştirilmiştir. Dünyada kurulu toplam üretim kapasitesi talebi aşmaktadır.
- * ^{123}I : ^{124}Xe (p,2n), ^{123}Cs $^{123}Cs \rightarrow ^{123}Xe \rightarrow ^{123}I$. ^{123}I çok önemli SPECT izotopudur ve dünyada yaygın üretimi vardır. Toplam mümkün olan kapasitesi 10 Ci dir.
- * ^{111}In : ^{112}Cd (p,2n) ^{111}In bazı SPECT teknikleri için önemlidir. Düşük talebinden dolayı pahalıdır.
- * ^{67}Ga : ^{68}Zn (p,2n), ^{67}Ga üretimi kolaydır. Talebi düşüktür.

(p;2n) prosesi, siklotronlarla klasik medikal radyoizotop üretiminde standard reaksiyondur. En önemlileri ^{123}I , ^{111}In ve ^{67}Ga dir. Diğer çoğu ticari öneme sahip

radyonüklidler bu reaksiyon yoluyla üretilebilir. Bununla birlikte; ^{201}Tl , üretim siklotronunun parametresini gerektirir.

2.2.5 Siklotronlarla Radyoizotop Üretimi (p,n) Reaksiyonu ve 15 MeV lik Protonlarla

^{18}F : ^{18}O (p, n), ^{18}F küçük siklotron kullanan çoğu merkezler tarafından ticaretleştirilen çok önemli PET izotopudur. Aynı zamanda, 30 MeV veya hatta 65 MeV lik siklotronlarda üretilir.

^{124}I : ^{124}Te (p,n), ^{124}I ticari açıdan çok önemli PET izotopudur. Geniş ölçekli üretim teknolojisi henüz mevcut değildir. Aynı teknoloji, ^{123}Te hedef materyaline dayalı orta ölçekli ^{123}I üretimi için kullanılabilir.

^{64}Cu : ^{64}Ni (p,n), ^{64}Cu terapi esnasında bio dağılım ölçümlerine yarayan RIT ve PET için terapötik izotoptur.

(p,n) prosesi sadece ~15 MeV gerektirir ve normal olarak küçük PET siklotronlarında oluşturulur. Aynı zamanda; demet diagnostiğinde yüksek üretim hedeflerinin modern sistemle birleşmesinden dolayı, sadece kullanılabilir demet zamanının küçük bir bölümü için bu reaksiyon ekonomik şartlar altında daha büyük siklotronlarda da oluşturulabilir.

2.2.6 Radyoaktif İyodin Üretimi

Radyoizotop üretimi çekirdek tepkimelerini temel alır. Genelde çekirdek tepkimelerinde bir hedef üzerine belli enerjide gönderilen parçacıklarla tepkimeye girdiğinde bir ürün çekirdek oluşur ve kimyasal yöntemlerle işlem görüp nükleer tıpta kullanılacak hale getirilir. SPECT ve PET yöntemlerinde kullanılan ve EC/β^+ bozunumu yapan C-11, F-18, Ga-67, Tl-201, I-123 gibi radyoizotopların üretimi, hızlandırılmış yüklü parçacıklar gerektiğinden, sadece siklotronda mümkündür.

Büyük olasılıkla siklotron üretiminde radyohalojen I-123 kullanılır. I-123 ün en çok kullanım alanlarından biri tümörleri lokalize etmek ve göz önünde canlandırmak için

monoklinal antikorları incelemektedir. I-123 üretimindeki temel reaksiyonlar aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi I-123 te iki temel yol verilmektedir. Birincisi direkt (doğrudan) yol ve ikincisi Xenon-123 içindeki işarettir. Xe-123 içinden gitmesinin avantajı, Xenon orijinal hedef materyallerden ayrılmış olabilir ve izolasyonda bozunmaya izin verir.

Çizelge 2. 1 İyodin I-123 üretimi

Nükleer reaksiyon	Kullanılan enerji oranı	Doğadaki % miktarı	Referanslar
$^{127}I(p,5n)^{123}Xe: ^{123}I$	55	100	Adilbish 1980, Cunninghame 1976, Jungerman and Lagunassolar 1981
$^{127}I(d,6n)^{123}Xe: ^{123}I$	83	100	Weinreich 1976

I-123'ün üretimi için ortak reaksiyon, yüksek oranda zenginleştirilmiş Te-124 de $^{124}Te(p,2n)^{123}I$ reaksiyonunun bulunmasıdır. Yüksek oranda zenginleştirme gereklidir, bundan dolayı I-124 ün bileşeninde ikinci bir kaynak vardır ve bu $^{125}Te(p,2n)^{124}I$ nükleer reaksiyonundan gelir.

I-123'ün üretimi için kullanılan hedefler üç sınıfta gruplanabilir. Bunlar katı hedefler, sıvı veya erimiş hedefler ve gaz hedefler. I-123 genellikle hedeflerin üç tipinden de üretilir. (Hedefler; bir hedef materyal zenginleştirilmiş Xe-124 ün kullanılabilirliğine ve kullanılan siklotronun enerjisine bağlıdır). Hedeflerin her bir tipi kendi avantaj ve dezavantajlarına sahiptir.

I-123'ün üretimi için ortak hedeflerden biri tellurium reaksiyonudur. Tipiksel hedefler iki farklı materyallerdir. Birincisi elementel tellurium ve ikincisi tellurium oksittir. Tipiksel bir hedef, bir bakır zemin üzerinde elektriklenmiş telluriumdur. Tellurium siklotronunda içten ışınlanmaktadır. Hedefin bu tipinin temel avantajı (yüksek demet akımları) hedefe demetin etki alanında düşük açının bir sonucu olarak kullanılmış olabilir. Katı hedefin bu genel tipi bir dış hedef olarak kullanılabilir.

Katı hedefler, toz haline getirilmiş telluriumdan yapılmaktadır. I-123 üretimi için geniş olarak kullanılmaktadır. Tellurium tozu hedefin ısı transfer karakterlerini artırmak için alüminyum tozu ile karıştırılmaktadır. Bu hedefler ile ortak sorun element halindeki telluriumun eritilmesidir.

I-123 üretimi için kullanılan sıvı hedefler üç çeşittir. Bunlar, yüksek enerji demetinde sodyum iyodin tuzundan I-123'ün üretimi için kullanılan erimiş tuz hedeflerdir. Sıvı iyodin hedef, alışlagelen üretim için kullanılmıştır (Godart et al 1977). Sonucusu hedef çevresinde dolaşmada metilen iyodine benzer bir sıvının kullanılmasıdır.

I-123 üretimi için gaz hedefler, protonla zenginleştirilmiş Xe-124 gazının reaksiyonundan oluşturulmaktadır. Bu hedef, hedef materyalin kolaylıkla geri alınmasıyla yüksek saflıkta I-123 üretiminde avantajdır.

2.3 Yapılan Önceki Çalışmalar

Yapılan bu çalışmada “ ^{124}I nin üretimine özel referans ile 100 MeV enerji değerine uyumlu $^{125}Te(p, xn)$ reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonları” (Hohn et al 2000) makalesi referans alınarak bir proton hızlandırıcısında 5.5 – 100.5 MeV arası proton gelme enerji aralığında ^{125}Te hedef çekirdekle oluşturulan; $^{125}Te(p, n)^{125}I$, $^{125}Te(p, 2n)^{124}I$, $^{125}Te(p, 3n)^{123}I$, $^{125}Te(p, 4n)^{122}I$ reaksiyonlarının tesir kesitleri teorik olarak hesaplanmıştır. Benzer çalışma olarak; A. Hohn, H. H. Coenen ve S. M. Qaim 1999 yılında 13.5 MeV enerji değerinde $^{120}Te(d, xn)^{121,120mg}I$ reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonlarını ve ^{120g}I nin üretimindeki

devam eden çalışmaları araştırmışlardır. Uyarma fonksiyonları stacked-foil tekniğiyle ölçülmüştür. Ölçülen uyarma fonksiyonlarından, ^{121}I , ^{120m}I ve ^{120g}I nin integral ve diferansiyel alanları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda (p,n) süreci (p,3n) reaksiyonunda ^{120g}I nin biraz düşük alanını verir, fakat saflığı yüksektir ve küçük boyutlu siklotrona eşdeğerdir. Hedef miktarı, genellikle çok büyüktür. ^{120g}I nin alanı çok düşüktür ve ^{121}I nin saf olmayan seviyesi çok yüksektir. Bu yüzden ^{120g}I için, $^{122}Te(p,3n)$ üretiminden birisi veya $^{120}Te(p,n)$ reaksiyonu kullanılmalıdır.

Th. Bastian, H. H. Coenen ve S. M. Qaim 2001 yılında 14 MeV enerji değerinde $^{124}Te(d,xn)^{124,125}I$ reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonlarını ve ^{124}I nin üretimi için nükleer kuralların uyum sürecini araştırmışlardır. Uyarma fonksiyonları önceki çalışmalara benzer olarak stacked-foil tekniğiyle ölçülmüştür. Ve sonuçta $^{124}Te(d,2n)^{124}I$ reaksiyonu için şuanki veri, literatürdeki deneysel veriden miktar olarak daha yüksektir fakat hibrit model hesaplamasının sonuçlarıyla iyi uyumdadır. Ölçülen tesir kesitlerinden, $^{124,125}I$ nin integral alanları hesaplandı. $^{125}Te(p,2n)$ reaksiyonu orta büyüklükteki siklotrona çok elverişlidir. $^{124}Te(d,2n)^{124}I$ reaksiyonu için veriler Firouzbakht'in deneysel verileri ile uyumsuz fakat Shubin'in model hesaplamasıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Şuana kadar ki çalışmalarda $^{123}Te(p,n)$, $^{120}Te(d,xn)$, $^{125}Te(p,xn)$ reaksiyonlarının farklı enerji değerlerine uyumlu uyarılma fonksiyonları üzerinde durulmuştur.

Biraz farklı bir çalışma olmak üzere; Nalan Özkan 2004 yılında çekirdek sentezi ve yüklü parçacık yakalama reaksiyon tesir kesiti ölçümünü araştırmıştır. Araştırmada; yıldız içinde ve patlamalarda çekirdek sentezi, reaksiyon hızı hesaplamaları, yüklü parçacık yakalama reaksiyonları için aktivasyon metodu ile tesir kesiti ölçümleri ve projeleri üzerine durulmuştur.

H. Herzog, S. M. Qaim, L. Tellmann, S. Spellerberg, D. Kruecker, H. H. Coenen 2006 yılında yaptıkları çalışma ile PET örneği için kısa ömürlü saf olmayan pozitron yayan nüklit ^{120}I ni değerlendirmişlerdir. ^{120}I , $^{120}Te(p,n)$ nin güçlendirilmiş ^{120}Te ile

reaksiyonu sonucu oluşturulmuştur. Ölçümler Siemens HR+ tarayıcı ve 2D PET GE PC4096+tarayıcı ile yapılmıştır. Silindir 3 soğuk ilave içerir ve fantoma benzeyen bir insan beyni dilimi yarılanma süresinin, pozitron miktarının ve arka plan düzeltmelerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Numune ayırım gücünü analiz etmek için, 1mm lik bir tüp ^{120}I ve ^{18}F ile dolu bir suya konulmuştur. ^{18}F , ^{124}I ve ^{123}I nin (SPECT ile ölçülmüştür) karşılaştırmaları hoffman 3D beyin fantomu kullanılarak yapılmıştır. Veriler sonucunda ^{120}I nin yüksek radyonüklitik saflığı radyoiyot-etiketli ilaçların PET numunesi için uygun bir nüklit olduğu görülmüştür.

PET numunesi için uygun bir nüklit olan iyodinin önemini daha iyi anlamak için David J. Schlyer 2001 yılında radyoaktif iyodin üretimini araştırmıştır. Bu çalışma kapsamında; ^{123}I nin en çok kullanım alanlarından biri tümörleri lokalize etmek ve monoklinal antikoları incelemektir. ^{123}I nin üretimi için ortak reaksiyon, yüksek oranda zenginleştirilmiş ^{124}Te de $^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ reaksiyonun bulunmasıdır. Sonuç olarak, iyodinin radyoizotopları biyomedikal araştırmalarda ve kliniksel nükleer ilaçlarda başrolü oynamaktadır. Gelecekte de bu izotoplar aktif görülmektedir ve bunların ayrımı ve üretimine devam edilecektir.

Tesir kesitlerinin incelenmesinin yanında tesir kesitinin nasıl hesaplanacağını inceleyen çalışmalar da söz konusudur. Şule Güler 2007 yılında yaptığı çalışmasında nötronlarla oluşturulan nükleer reaksiyonlar için deneysel tesir kesiti formüllerini elde etmiştir. Bu çalışmada, 14 - 15 MeV enerjili nötronlar ile oluşturulan (n,d) ve (n, ^3He) reaksiyonları için nükleer kabuk modeli ve asimetri parametresi göz önüne alınarak, deneysel tesir kesiti formülleri elde edilmiştir. Bu tesir kesiti formülleri ile yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan sayısal sonuçlar, literatürdeki deneysel değerler ve başka araştırmacılar tarafından bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve karşılaştırmanın uyumlu olduğu görülmüştür.

Nükleer reaksiyonun uyarılma fonksiyonlarını ve hesaplanan tesir kesitini nükleer reaksiyondaki hedef çekirdeğe proton veya nötron göndererek inceledik. Bu durumdan farklı çalışmalarda söz konusudur. Bunlardan biri Ziya Sağlam'ın 1989 yılında yaptığı çalışmadır. Bu çalışmada 4 - 300 eV enerji aralığında elektron-su molekülü çarpışma

toplam tesir kesitlerinin ölçümü incelenmiştir. Elektron-su molekülü çarpışmasının mutlak toplam tesir kesitleri lineer transmisyon spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Lineer transmisyon cihazı elektron tabancası, çarpışma odası ve dedektörden oluşmaktadır. Tabancada tamamen elektrostatik mercekler kullanılmıştır. Çarpışma odasında bulunan gazın basıncı MKS Baratron kapasitans manometresi ile sıcaklığı ise bir termistör yardımı ile doğru bir şekilde ölçülebilmektedir. Toplam tesir kesitinde 5 eV civarında 0.2×10^{-24} (A°) 2 değerinde bir minimum, 612 eV arasında ise tepe değeri 8 eV civarında değeri 19.24×10^{-24} (A°) 2 olan geniş bir maksimum gözlenmiştir. Bulunan sonuçlar daha önceki deneysel ve teorik sonuçlar tarafından desteklenmektedir.

Yine buna benzer bir çalışmayı 1990 yılında İsmet Çelenk yapmıştır. Çalışmada nötron self absorpsiyon özelliğinden faydalanarak V, Co, Cu, In, Dy, Au elementlerinin makroskopik ve mikroskopik termal nötron tesir kesitleri ölçülmüştür. Yöntemin esası, nötron öz soğurma özelliğine dayanır. Bu elementlerin değişik kalınlıklara sahip saf hedefleri ⁵Ci Pu-238/Be nötron kaynağı ile ışınlanmıştır. Işınlamadan sonra, radyoizotopların bir HPGe dedektörle gama spektrumları alınmıştır. Her bir elementin gama spektrumları değerlendirilerek ilgilenilen gama fotopik alanları elde edilmiştir. Fotopik alanlarında gama öz soğurma düzeltmesi yapılmış ve bu fotopik alanlarının hedef kalınlığına bağlı olarak değişim fonksiyonlarına lineer olmayan en küçük kareler yöntemi uygulanarak söz konusu elementler için toplam termal nötron makroskopik ve mikroskopik tesir kesitleri tesbit edilmiştir. Bu sonuçlar, daha önce klasik tesir kesiti ölçüm yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında önemli fark olmadığı görülmüştür.

Proton gelme enerjisi 5.5-100.5 MeV aralığında ¹²⁵Te hedef çekirdekle oluşturulan ¹²⁵Te(p,n)¹²⁵I, ¹²⁵Te(p,2n)¹²⁴I, ¹²⁵Te(p,3n)¹²³I, ¹²⁵Te(p,4n)¹²²I reaksiyonlarının reaksiyon tesir kesitlerini ALICE/ASH programını kullanarak teorik olarak hesaplamak hedefimizdir. Proton gelme enerjisi 5.5-100.5 MeV arasındadır. Yapılan diğer çalışmalarda bu enerji aralığında ve ¹²⁵Te hedef çekirdekle çalışılmamıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada bir proton hızlandırıcısında 5-100 MeV arası proton gelme enerji aralığında, ^{125}Te hedef çekirdekle oluşturulan; $^{125}\text{Te}(p,n)^{125}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,2n)^{124}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,3n)^{123}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,4n)^{122}\text{I}$ reaksiyonlarının reaksiyon tesir kesitleri hesaplandı. Hesaplamalarda denge durumu için Weisskopf-Ewing model; denge öncesi etkileri incelemek için Hibrid model, Geometri bağımlı hibrid model, Cascade exciton model, Full exciton model kullanıldı.

5-100 MeV gelme enerjili protonlar için deneysel tesir kesitleri literatürden ve Deneysel Nükleer Reaksiyon Data (EXFOR) kütüphanesinden elde edildi. Deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldı ve üretim verimliliğinin optimum enerji aralıkları belirlendi.

Reaksiyon sistematikleri, teorik modeller kullanılarak tesir kesiti hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aydın vd. 2004). $^{125}\text{Te}(p,n)^{125}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,2n)^{124}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,3n)^{123}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,4n)^{122}\text{I}$ reaksiyonlarının reaksiyon tesir kesitleri nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak hesaplandı.

Hesaplamalar; ALICE/ASH (Hibrid ve Geometri Bağımlı Hibrid Model için), paket programıyla yapıldı. Programlar NEA DATA BANK'tan temin edildi.

3.1 ALICE/ASH Programına Veri Girişi

ALICE/ASH kodu bir gelişmedir ve ALICE kodunun kodunun biçimlendirilmiş versiyonudur. Biçimlendirmelerin kapsamı iki-bileşenli karşıt parçacık emisyonu, hızlı γ -emisyonu, farklı görünürdeki nükleer seviye yoğunluk hesaplaması için ve fisyon alan hesaplaması için modeldir.

ALICE/ASH kodu 300 MeV enerji ile nükleonlar ve çekirdeği kapsayan nükleer reaksiyonlarda ikinci parçacıkların enerji ve açısal dağılımı, uyarma fonksiyonlarının hesaplanması için uygun olabilir.

ALICE/ASH koduyla başlangıç enerji nükleonları ve çekirdek ile hedef çekirdeğin etkileşiminin çalışması yazılmıştır. ALICE/ASH kodu FORTRAN da yazılmıştır.

Kod nükleer reaksiyonlarda, gerekli nükleer alanda ve toplam elastik olmayan tesirkesitinde (300 MeV enerjiyle çekirdek ve parçacıkları kapsayan nükleer reaksiyonlar için) uyarılmış parçacıkların enerji ve açısal dağılımlarını hesaplar.

ALICE kodu Blann tarafından geliştirilmiştir. Hybrid model ve geometri bağlantılı hybrid model parçacık spektrumunun hesaplanması için kullanılabilir.

Programa veri girişi basamaklar halinde şu şekildedir:

- * ALICE/ASH programı bilgisayara masaüstüne atılmıştır.
- * “Başlangıç” komutu, “programlar” ve beraberinde gelen “donatılar” komutu verilmiştir.
- * “C:\ komut sistemi” ifadesi tıklanmıştır.
- * Ekran açılan siyah pencereye “edit” yazılıp “enter” tuşuna basılmıştır.
- * Karşımıza gelen mavi ekrana sırasıyla “dosya”, “aç” komutlarının beraberinde “dizin” başlığı altında bulunan “desktop” komutları verilmiştir.
- * “Dizin” kısmından bilgisayar masa üstünde bulunan ALICE/ASH a ait program dosyası bulunmuş ve açılmıştır.
- * Açılan program ekranından “dosya” kısmında bulunan “ALICE.DAT” dosyasına tıklanmıştır.
- * Açılan mavi ekrana gereken veriler yazılmıştır.
- * Bu veri girişinde
 - İlk sütun (ap) elementin kütle numarası
 - İkinci sütun (at) hedef elementin kütle numarası
 - Üçüncü sütun (zp) elementin yükü
 - Dördüncü sütun (qval) reaksiyonun q değeri

Beşinci sütun (cld) tek parçacık seviye yoğunlukları af/an, D=1

En son sütun (m3) her çekirdekten uyarılan parçacıkların sayı ve çeşitlerini belirtmektedir.

Bu yazılım da yine belli kurallar altında yazılmıştır.

Gerekli kinetik enerji değeri dördüncü satıra yazılır.

- * Yapılan veri girişlerinden sonra sırasıyla “dosya” ve “kaydet” komutlarıyla veriler kaydedilmiştir.
- * Kayıt işleminden sonra ekran kapatılmıştır.
- * Bilgisayarın masaüstünde bulunan ALICE/ASH program dosyasının içinde yer alan “ALICE” açılmıştır.
- * Açılan siyah ekranda bizden verileri hangi isim altında kaydetmemiz istenmektedir. Bu nedenle herhangi bir dosya ismi girilerek “enter” tuşuna basılmıştır.
- * ALICE programı çalışmaya yani bizim girdiğimiz verilere ait (enerji değerlerine) tesir kesitlerini “optical model” yoluyla hesaplamaya başlar.
- * Bilgisayar girilen enerji değerlerine göre hesaplanan tesir kesiti değerlerini program dosyasına aktarır.
- * Program dosyasında yer alan ürün elementlere ait dosya sırasıyla “birlikte aç”, “wordpad MFC uygulaması” ile ilgili reaksiyona ait girilen enerji değerleri ve hesaplanan tesir kesiti verilerine ulaşılmıştır.

3.2 Girilen Enerji Değerleri ve Hesaplanan Tesir Kesiti Değerleri (Teorik)

Çizelge 3. 1 Teorik olarak girilen enerji değerleri ve hesaplanan tesir kesiti değerleri

<u>MeV</u>	<u>122-I</u>	<u>123-I</u>	<u>124-I</u>	<u>125-I</u>
5.5	0	0	0	2.46E+01
7.4	0	0	0	1.79E+02
10.1	0	0	0	5.38E+02
10.6	0	0	0	6.04E+02
13.3	0	0	5.19E+02	3.76E+02
16.1	0	0	9.47E+02	1.19E+02
18.5	0	0	1.09E+03	6.48E+01
21.5	0	3.99E+02	7.38E+02	5.09E+01
22.1	0	4.91E+02	6.49E+02	4.97E+01
23.3	0	5.61E+02	5.81E+02	5.35E+01
25.1	0	8.79E+02	2.87E+02	4.21E+01
26.1	0	9.46E+02	2.29E+02	4.04E+01
27.8	0	9.73E+02	1.97E+02	4.31E+01
31.5	4.14E+01	9.54E+02	1.15E+02	3.36E+01
32.5	1.01E+02	8.90E+02	1.06E+02	3.22E+01
35.1	4.28E+02	5.56E+02	8.47E+01	2.77E+01
38.4	4.82E+02	4.59E+02	7.68E+01	2.88E+01
38.8	5.87E+02	3.46E+02	7.40E+01	2.80E+01
39.1	6.24E+02	3.00E+02	6.84E+01	2.45E+01
39.5	5.28E+02	3.94E+02	7.31E+01	2.81E+01
42.5	5.74E+02	2.65E+02	6.32E+01	2.58E+01
43.8	5.48E+02	1.83E+02	5.64E+01	2.21E+01
44.9	5.39E+02	2.07E+02	5.69E+01	2.39E+01
45.2	4.47E+02	1.63E+02	5.30E+01	2.10E+01
45.3	4.46E+02	1.63E+02	5.33E+01	2.13E+01
48.8	3.01E+02	1.30E+02	4.73E+01	1.95E+01
50.2	2.56E+02	1.19E+02	4.48E+01	1.86E+01
54.3	1.75E+02	9.92E+01	4.00E+01	1.74E+01
55.1	1.88E+02	1.13E+02	4.15E+01	1.94E+01
59.7	1.25E+02	8.75E+01	3.57E+01	1.65E+01
61	1.30E+02	8.96E+01	3.51E+01	1.70E+01
64.1	1.02E+02	8.13E+01	3.29E+01	1.62E+01
65.2	9.70E+01	7.89E+01	3.23E+01	1.61E+01
68.2	8.43E+01	7.24E+01	3.02E+01	1.54E+01
70.9	7.18E+01	5.88E+01	2.71E+01	1.31E+01
80.9	5.33E+01	5.04E+01	2.30E+01	1.19E+01
90.8	4.46E+01	4.42E+01	1.95E+01	1.10E+01
100.5	3.46E+01	3.56E+01	1.68E+01	1.00E+01

Birinci sütün bizim veri olarak girdiğimiz enerji değerini (MeV); ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci stnlar reaksiyondan ürün olarak çıkan ve tesir kesiti değerleri hesaplanan elementleri ifade etmektedir.

Bu çalışmada teoriksel tesir kesiti hesaplamaları, ALICE-IPPE koduyla uygulanmıştır. Bu kod hybrid exciton modelini kullanmaktadır (Blann 1982). $^{125}\text{Te}(p, xn)$ reaksiyonlarının bütün uyarma fonksiyonları 5.5 MeV enerji değerinden 100.5 MeV enerji değerine kadar hesaplanmıştır.

Gelen proton enerjisinin bir fonksiyonu olarak konumlanan tesir kesiti değerleri grafik olarak çizilmiştir. Grafik iziminde “Origin Pro8” programı kullanılmıştır.

3.3 Girilen Enerji Değerleri ve Hesaplanan Tesir Kesiti Değerleri (Deneysel)

Çizelge 3. 2 Deneysel olarak girilen enerji değerleri ve hesaplanan tesir kesiti değerleri

<u>MeV</u>	<u>122-I</u>	<u>123-I</u>	<u>124-I</u>	<u>125-I</u>
5.5				18 ± 3
7.4				224 ± 36
10.1				578 ± 92
10.6			63 ± 8	687 ± 110
13.3			579 ± 75	355 ± 57
16.1			922 ± 120	141 ± 23
18.5			979 ± 127	74 ± 12
21.5		38 ± 6		
22.1				67 ± 11
23.3		292 ± 47		
25.1			320 ± 42	79 ± 13
26.1		674 ± 108		
27.8			182 ± 24	57 ± 9
31.5		885 ± 142		
32.5			92 ± 12	45 ± 7
35.1			91 ± 12	38 ± 6
38.4			80 ± 10	39 ± 6
38.8	291 ± 47	484 ± 77	86 ± 11	42 ± 7
39.1			64 ± 8	36 ± 6
39.5		291 ± 47		
42.5			71 ± 9	
43.8	420 ± 67	251 ± 40	73 ± 9	41 ± 7
44.9		134 ± 21	56 ± 7	31 ± 5
45.2			67 ± 9	26 ± 4
45.3		172 ± 28		
48.8	294 ± 47	206 ± 33	74 ± 10	43 ± 7
50.2		101 ± 16	52 ± 7	33 ± 5
54.3	162 ± 26	164 ± 26	57 ± 7	39 ± 6
55.1		84 ± 13	45 ± 6	32 ± 5
59.7		82 ± 13	43 ± 6	27 ± 4
61	78 ± 12	106 ± 17	49 ± 6	
64.1		64 ± 10	37 ± 5	26 ± 4
65.2	72 ± 12		45 ± 6	26 ± 4
68.2		60 ± 10	33 ± 4	25 ± 4
70.9			44 ± 6	24 ± 4
80.9	41 ± 7		35 ± 5	22 ± 4
90.8			29 ± 4	24 ± 4
100.5	37 ± 6		28 ± 4	19 ± 3

4. HESAPLANAN TESİR KESİTLERİ

Bir proton hızlandırıcısında 10-100 MeV ve 5.5-100.5 MeV arası proton gelme enerji aralığında, ^{125}Te hedef çekirdekle oluşturulan; $^{125}\text{Te}(p,n)^{125}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,2n)^{124}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,3n)^{123}\text{I}$, $^{125}\text{Te}(p,4n)^{122}\text{I}$ reaksiyonlarının reaksiyon tesir kesitleri verileri ALICE/ASH programından elde edilmiştir. Proton gelme enerjileri ve beraberinde hesaplanan tesir kesiti değerleri şu şekildedir:

Çizelge 4. 1 Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV aralığındaki I- 122

<u>ENERJİ DEĞERİ (MeV)</u>	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ (mb)</u>
1.00000E+01	0.00000E+00
2.00000E+01	0.00000E+00
3.00000E+01	2.49399E+01
4.00000E+01	5.46184E+02
5.00000E+01	3.11830E+02
6.00000E+01	1.38584E+02
7.00000E+01	7.44139E+01
8.00000E+01	5.41593E+01
9.00000E+01	4.24023E+01
1.00000E+02	3.49170E+01

Çizelge 4. 2 Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV aralığındaki I- 123

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
1.00000E+01	0.00000E+00
2.00000E+01	1.18550E+02
3.00000E+01	9.91005E+02
4.00000E+01	3.65914E+02
5.00000E+01	1.45077E+02
6.00000E+01	9.27094E+01
7.00000E+01	6.03348E+01
8.00000E+01	4.79359E+01
9.00000E+01	3.96128E+01
1.00000E+02	3.59070E+01

Çizelge 4. 3 Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV aralığındaki I- 124

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
1.00000E+01	0.00000E+00
2.00000E+01	1.00430E+03
3.00000E+01	1.23271E+02
4.00000E+01	7.12174E+01
5.00000E+01	4.79232E+01
6.00000E+01	3.60455E+01
7.00000E+01	2.77958E+01
8.00000E+01	2.27507E+01
9.00000E+01	1.89080E+01
1.00000E+02	1.69804E+01

Çizelge 4. 4 Proton gelme enerjisi 10 – 100 MeV aralığındaki I- 125

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
1.00000E+01	5.24742E+02
2.00000E+01	5.69208E+01
3.00000E+01	3.31462E+01
4.00000E+01	2.77039E+01
5.00000E+01	2.12512E+01
6.00000E+01	1.72942E+01
7.00000E+01	1.34722E+01
8.00000E+01	1.15284E+01
9.00000E+01	9.99120E+00
1.00000E+02	1.00737E+01

I-122 radyoizotopu 10 ve 20 MeV enerji değerinde, I-123 radyoizotopu 10 MeV enerji değerinde, I-124 radyoizotopu 10 MeV enerji değerinde tesir kesiti değeri vermemiştir.

Çizelge 4. 5 Proton gelme enerjisi 5.5 – 38.8 MeV aralığındaki I- 122

<u>ENERJİ DEĞERİ (MeV)</u>	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ (mb)</u>
5.50000E+00	0.00000E+00
7.40000E+00	0.00000E+00
1.01000E+01	0.00000E+00
1.06000E+01	0.00000E+00
1.33000E+01	0.00000E+00
1.61000E+01	0.00000E+00
1.85000E+01	0.00000E+00
2.15000E+01	0.00000E+00
2.21000E+01	0.00000E+00
2.33000E+01	0.00000E+00
2.51000E+01	0.00000E+00
2.61000E+01	0.00000E+00
2.78000E+01	0.00000E+00
3.15000E+01	4.13862E+01
3.25000E+01	1.00842E+02
3.51000E+01	4.27826E+02
3.84000E+01	4.81613E+02
3.88000E+01	5.87078E+02

Çizelge 4. 6 Proton gelme enerjisi 5.5 – 38.8 MeV aralığındaki I- 123

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
5.50000E+00	0.00000E+00
7.40000E+00	0.00000E+00
1.01000E+01	0.00000E+00
1.06000E+01	0.00000E+00
1.33000E+01	0.00000E+00
1.61000E+01	0.00000E+00
1.85000E+01	0.00000E+00
2.15000E+01	3.98891E+02
2.21000E+01	4.90852E+02
2.33000E+01	5.61044E+02
2.51000E+01	8.79425E+02
2.61000E+01	9.46320E+02
2.78000E+01	9.73377E+02
3.15000E+01	9.53832E+02
3.25000E+01	8.90191E+02
3.51000E+01	5.55845E+02
3.84000E+01	4.59328E+02
3.88000E+01	3.45956E+02

Çizelge 4. 7 Proton gelme enerjisi 5.5 – 38.8 MeV aralığındaki I- 124

<u>ENERJİ DEĞERİ (MeV)</u>	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ (mb)</u>
5.50000E+00	0.00000E+00
7.40000E+00	0.00000E+00
1.01000E+01	0.00000E+00
1.06000E+01	0.00000E+00
1.33000E+01	5.18704E+02
1.61000E+01	9.47060E+02
1.85000E+01	1.09083E+03
2.15000E+01	7.37678E+02
2.21000E+01	6.48748E+02
2.33000E+01	5.80684E+02
2.51000E+01	2.87228E+02
2.61000E+01	2.29430E+02
2.78000E+01	1.96733E+02
3.15000E+01	1.15267E+02
3.25000E+01	1.05779E+02
3.51000E+01	8.47010E+01
3.84000E+01	7.68323E+01
3.88000E+01	7.40527E+01

Çizelge 4. 8 Proton gelme enerjisi 5.5 – 38.8 MeV aralığındaki I- 125

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
5.50000E+00	2.45748E+01
7.40000E+00	1.79361E+02
1.01000E+01	5.38168E+02
1.06000E+01	6.03989E+02
1.33000E+01	3.75544E+02
1.61000E+01	1.18949E+02
1.85000E+01	6.48047E+01
2.15000E+01	5.08677E+01
2.21000E+01	4.96628E+01
2.33000E+01	5.34637E+01
2.51000E+01	4.21487E+01
2.61000E+01	4.03872E+01
2.78000E+01	4.30972E+01
3.15000E+01	3.35953E+01
3.25000E+01	3.22411E+01
3.51000E+01	2.77100E+01
3.84000E+01	2.87828E+01
3.88000E+01	2.80340E+01

I-122 radyoizotopu 5.5 ile 31.5 MeV enerji aralığında, I-123 radyoizotopu 5.5 ile 18.5 meV enerji aralığında, I-124 radyoizotopu 5.5 ile 13.3 MeV enerji aralığında tesir kesiti değeri vermemiştir.

Çizelge 4. 9 Proton gelme enerjisi 39.1 – 100.5 MeV aralığındaki I- 122

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
3.91000E+01	6.24297E+02
3.95000E+01	5.27963E+02
4.25000E+01	5.74488E+02
4.38000E+01	5.47888E+02
4.49000E+01	5.38962E+02
4.52000E+01	4.46612E+02
4.53000E+01	4.45799E+02
4.88000E+01	3.00792E+02
5.02000E+01	2.55562E+02
5.43000E+01	1.75006E+02
5.51000E+01	1.88412E+02
5.97000E+01	1.25366E+02
6.10000E+01	1.30183E+02
6.41000E+01	1.01990E+02
6.52000E+01	9.69677E+01
6.82000E+01	8.43216E+01
7.09000E+01	7.18107E+01
8.09000E+01	5.33244E+01
9.08000E+01	4.46102E+01
1.00500E+02	3.45788E+01

Çizelge 4. 10 Proton gelme enerjisi 39.1 – 100.5 MeV aralığındaki I- 123

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
3.91000E+01	3.00415E+02
3.95000E+01	3.93741E+02
4.25000E+01	2.64523E+02
4.38000E+01	1.82636E+02
4.49000E+01	2.06946E+02
4.52000E+01	1.62556E+02
4.53000E+01	1.62561E+02
4.88000E+01	1.29505E+02
5.02000E+01	1.19228E+02
5.43000E+01	9.91696E+01
5.51000E+01	1.12951E+02
5.97000E+01	8.75396E+01
6.10000E+01	8.96165E+01
6.41000E+01	8.13463E+01
6.52000E+01	7.89155E+01
6.82000E+01	7.23694E+01
7.09000E+01	5.88141E+01
8.09000E+01	5.03559E+01
9.08000E+01	4.42207E+01
1.00500E+02	3.56281E+01

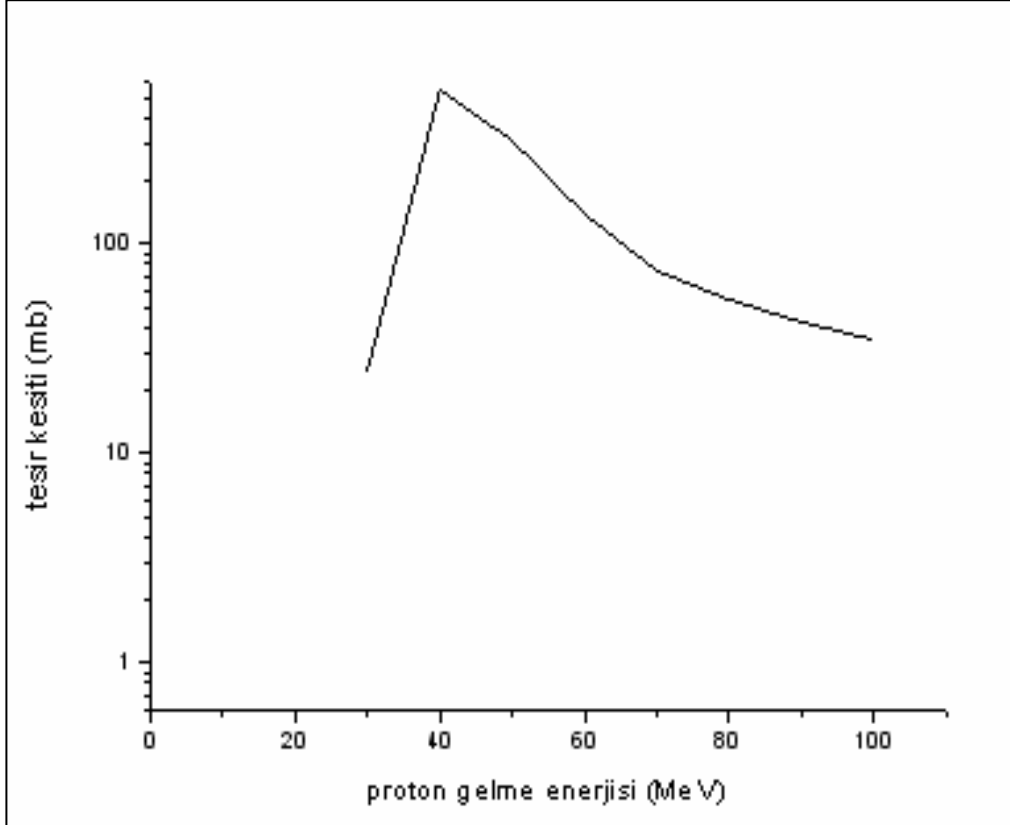
Çizelge 4. 11 Proton gelme enerjisi 39.1 – 100.5 MeV aralığındaki I- 124

<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
3.91000E+01	6.84227E+01
3.95000E+01	7.30986E+01
4.25000E+01	6.32086E+01
4.38000E+01	5.63925E+01
4.49000E+01	5.68713E+01
4.52000E+01	5.30037E+01
4.53000E+01	5.32924E+01
4.88000E+01	4.73002E+01
5.02000E+01	4.47848E+01
5.43000E+01	3.99634E+01
5.51000E+01	4.14509E+01
5.97000E+01	3.57224E+01
6.10000E+01	3.51306E+01
6.41000E+01	3.29338E+01
6.52000E+01	3.23238E+01
6.82000E+01	3.02039E+01
7.09000E+01	2.70584E+01
8.09000E+01	2.30089E+01
9.08000E+01	1.94985E+01
1.00500E+02	1.68376E+01

Çizelge 4. 12 Proton gelme enerjisi 39.1 – 100.5 MeV aralığındaki I- 125

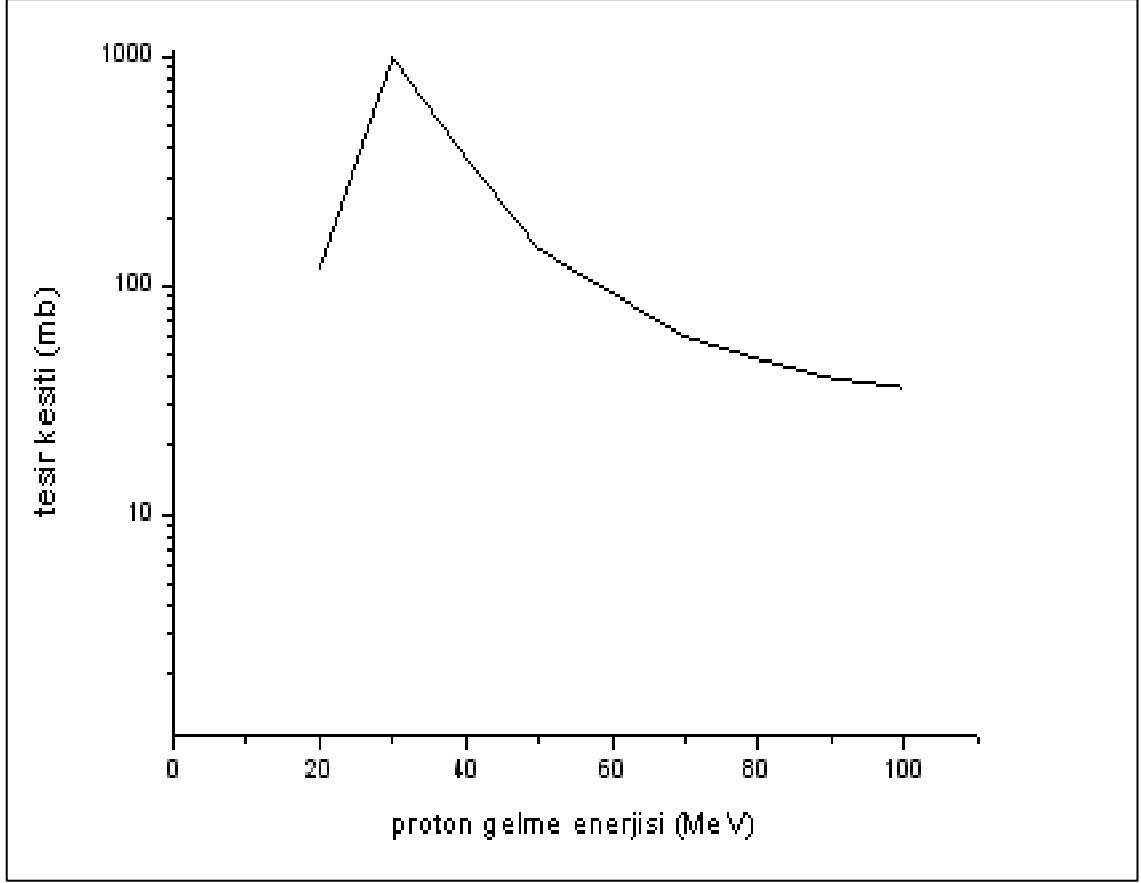
<u>ENERJİ DEĞERİ</u> (MeV)	<u>TESİR KESİTİ DEĞERİ</u> (mb)
3.91000E+01	2.45402E+01
3.95000E+01	2.81494E+01
4.25000E+01	2.58151E+01
4.38000E+01	2.21499E+01
4.49000E+01	2.38545E+01
4.52000E+01	2.10466E+01
4.53000E+01	2.13136E+01
4.88000E+01	1.95381E+01
5.02000E+01	1.86124E+01
5.43000E+01	1.73778E+01
5.51000E+01	1.93640E+01
5.97000E+01	1.64668E+01
6.10000E+01	1.69554E+01
6.41000E+01	1.62280E+01
6.52000E+01	1.61465E+01
6.82000E+01	1.53674E+01
7.09000E+01	1.30689E+01
8.09000E+01	1.18819E+01
9.08000E+01	1.10402E+01
1.00500E+02	1.00145E+01

Bu belirtilen proton gelme enerjisi ve programla hesaplanan tesir kesiti verilerine ait grafikler şu şekildedir:



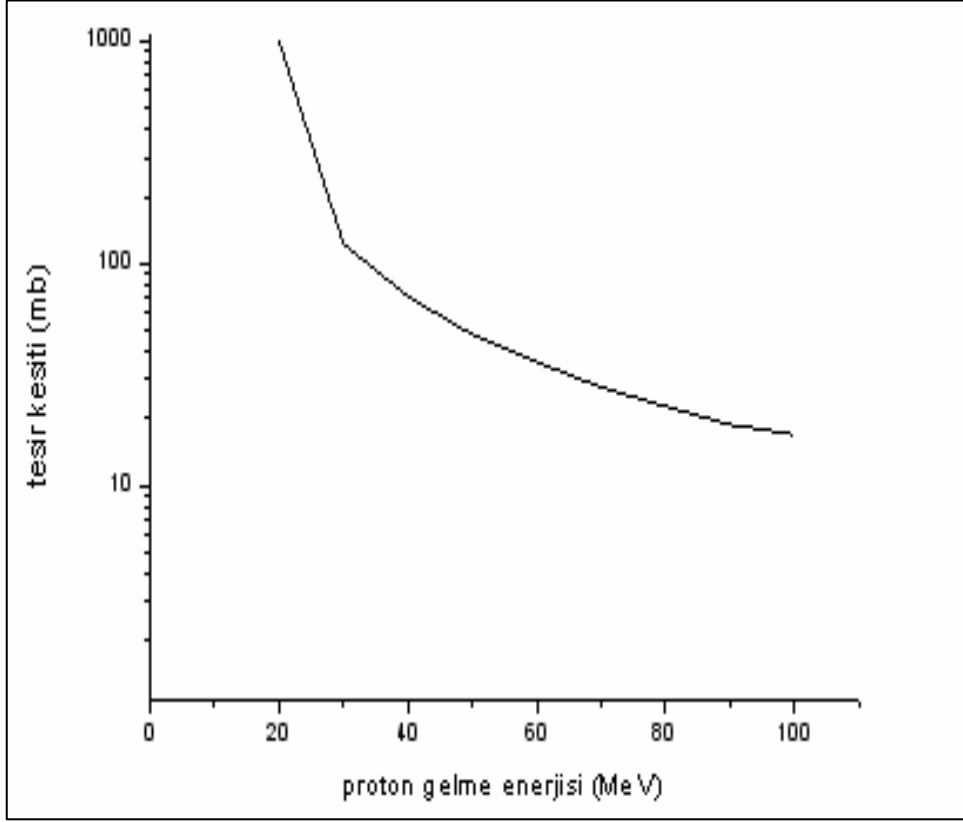
Şekil 4. 1 “10 – 100 MeV” enerji aralığında I-122’nin tesir kesiti

10-100 MeV enerji aralığında gelen protonların ^{122}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri yaklaşık 25 MeV de 20 mb da başlamış, 55 MeV maksimum değerinde 500-600 mb a ulaşmış ve 100 MeV enerji değerinde 40-50 mb arasında azalmıştır.



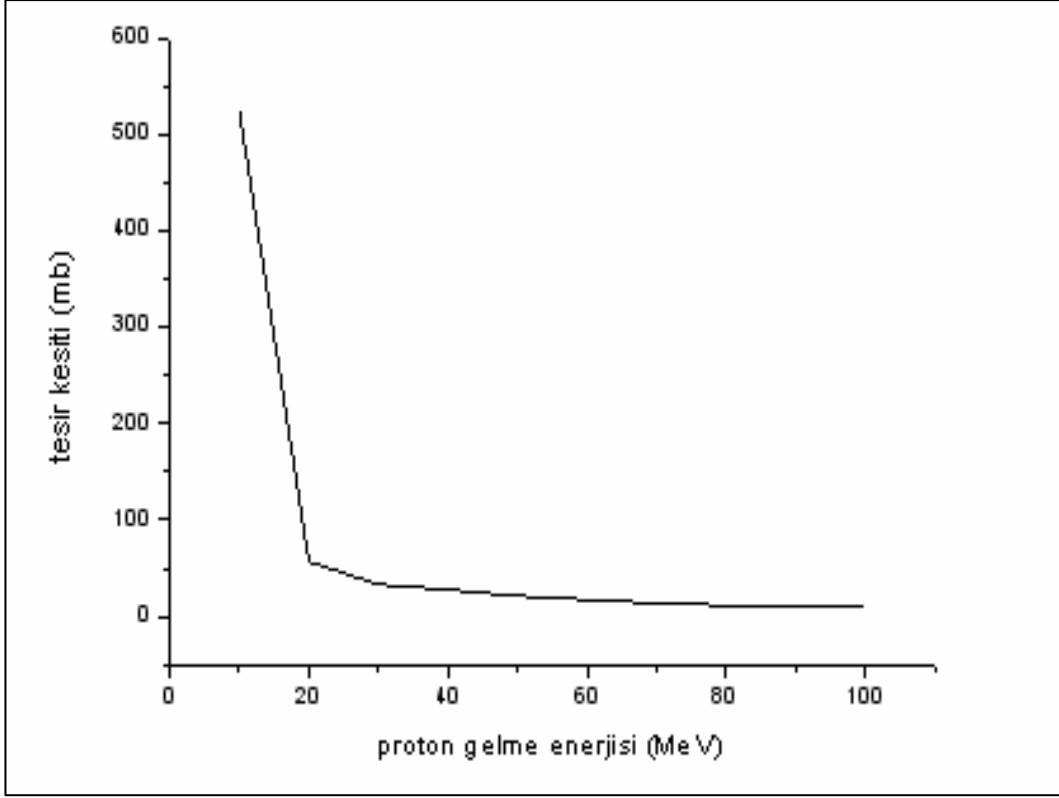
Şekil 4. 2 “10 – 100 MeV” enerji aralığında I-123’ün tesir kesiti

10-100 MeV enerji aralığında gelen protonların ^{123}I fonksiyonunu belirtmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri yaklaşık 20 MeV de 100 mb da başlamış, 40 MeV de maksimum değeri 1000 mb a ulaşmış ve 100 MeV enerji değerinde yaklaşık 40-50 mb arasında azalmıştır.



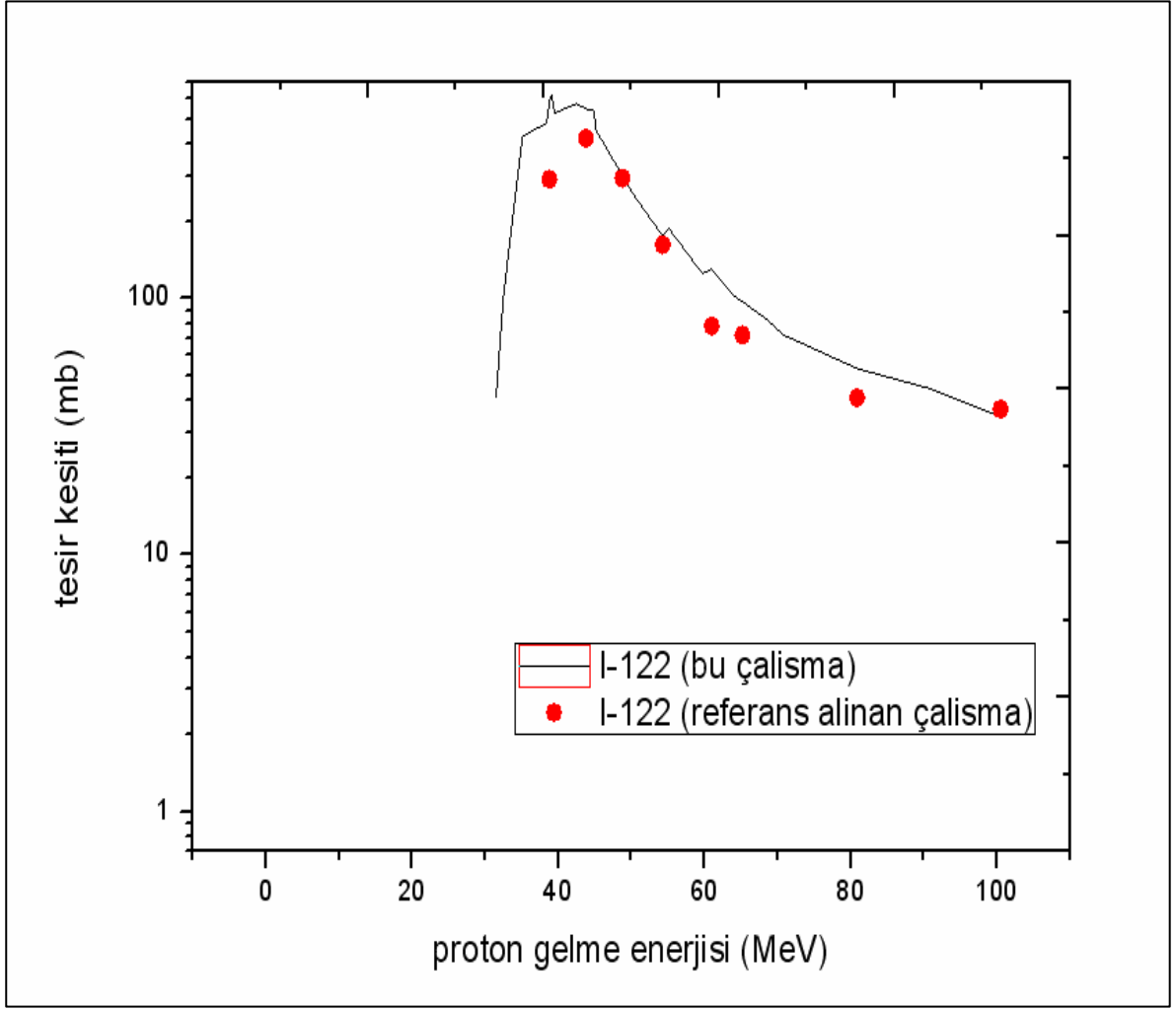
Şekil 4. 3 “10 – 100 MeV” enerji aralığında I-124’ün tesir kesiti

10-100 MeV enerji aralığında gelen protonların ^{124}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri, yaklaşık 20 MeV de 1000 mb da başlamış, 25 MeV de 100 mb a kadar azalmış ve 100 MeV de yaklaşık 20-30 mb aralığında azalmıştır.



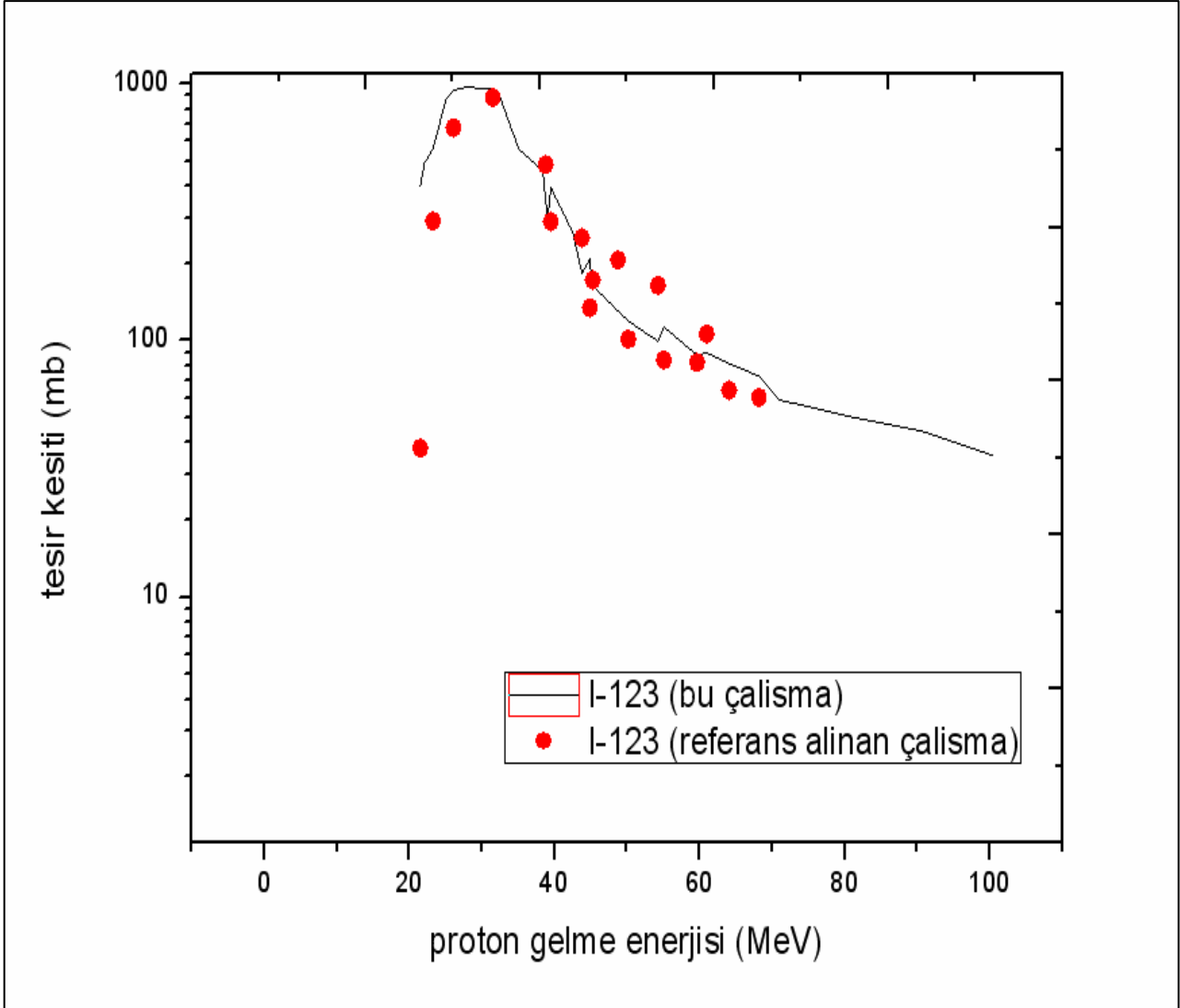
Şekil 4. 4 “10 – 100 MeV” enerji aralığında I-125’in tesir kesiti

10-100 MeV enerji aralığında gelen protonların ^{125}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri, yaklaşık 15 MeV de 500 mb ile başlamış, 20 MeV de 50 mb a kadar düşmüş ve 30 MeV de yaklaşık 0-50 mb aralığında azalmıştır.



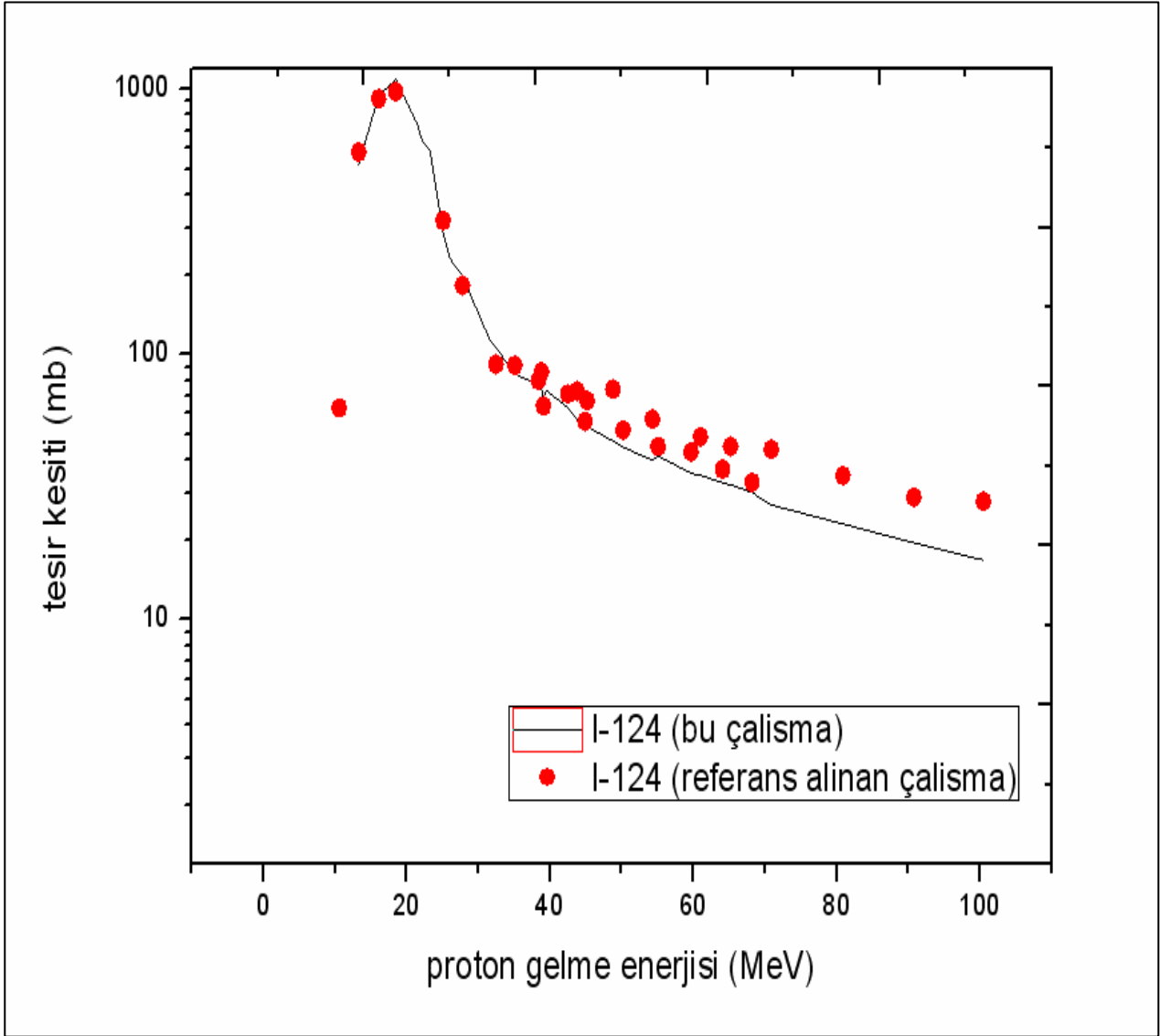
Şekil 4. 5 Proton gelme enerjisi “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-122 fonksiyonu.

5.5-100.5 MeV enerji aralığında gelen protonların teorik ve deneysel ^{122}I fonksiyonunun belirtmektedir. Reaksiyon tesir kesiti, teorik ^{122}I fonksiyonunda 20-40 MeV arasında yaklaşık 30-40mb aralığında başlarken; deneysel ^{122}I fonksiyonu da 30-40 MeV arasında 100 mb üzerindeki bir değerde başlamıştır. Reaksiyonun teorik ve deneysel ^{122}I fonksiyonunun birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



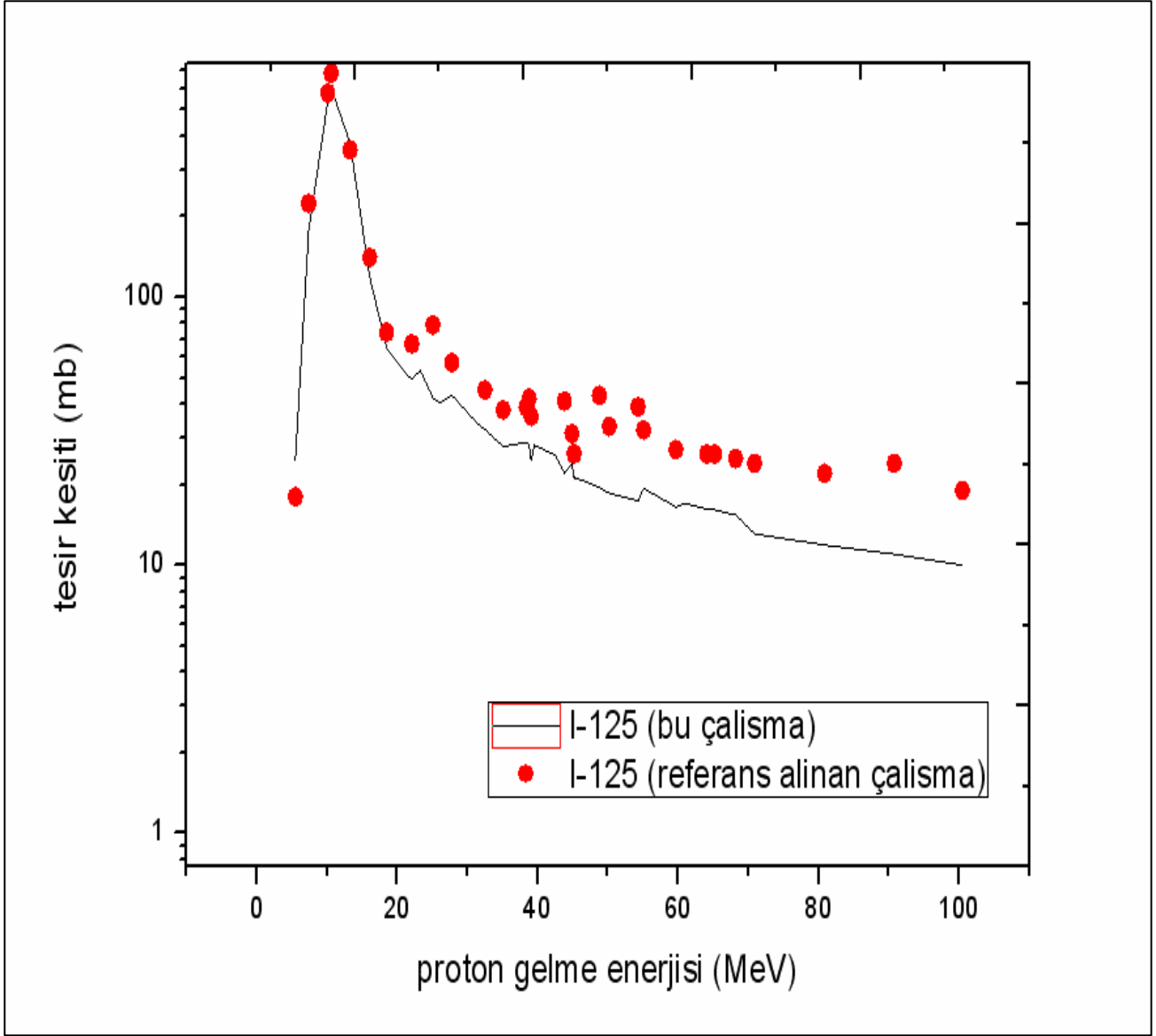
Şekil 4. 6 Proton gelme enerjisi “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-123 fonksiyonu.

5.5-100.5 MeV enerji aralığında gelen protonların teorik ve deneysel ^{123}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti, teorik ^{123}I fonksiyonu için 20 MeV de yaklaşık 400mb değerinde başlarken; deneysel ^{123}I fonksiyonu da 20 MeV de 40 mb değerinde başlamıştır. Reaksiyon için teorik ve deneysel ^{123}I fonksiyonunun birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 7 Proton gelme enerjisi “5.5 - 100.5” MeV enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-124 fonksiyonu.

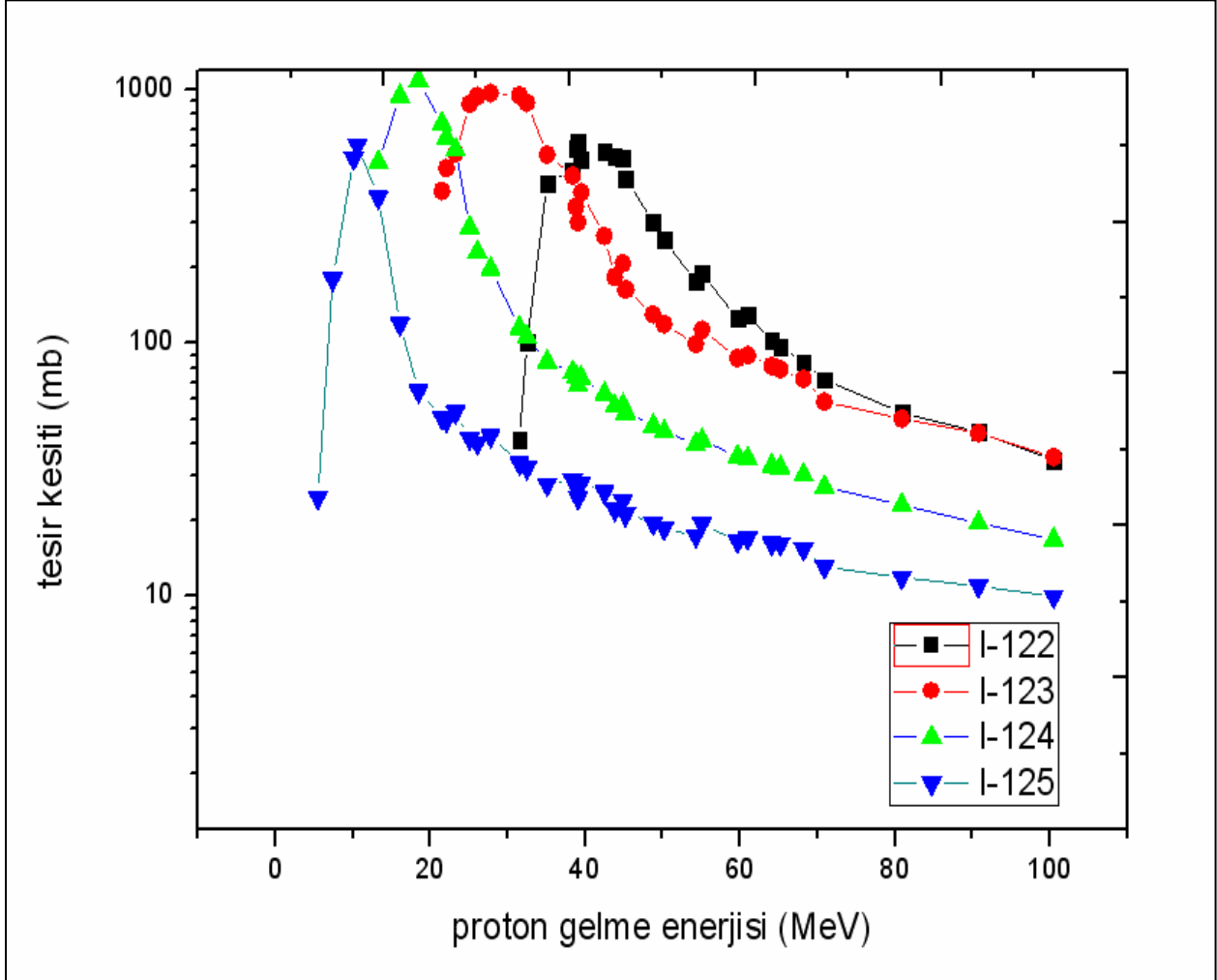
5.5-100.5 MeV enerji aralığında gelen protonların teorik ve deneysel ^{124}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti, teorik ^{124}I fonksiyonu için 10 MeV de yaklaşık 500 mb değerinde; deneysel ^{124}I fonksiyonu için 10 MeV de 60 mb değerinde başlamıştır. Reaksiyon için teorik ve deneysel ^{124}I fonksiyonunun birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 8 Proton gelme enerjisi “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-125 fonksiyonu.

5.5-100.5 MeV enerji aralığında gelen protonların teorik ve deneysel ^{125}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti, teorik ^{125}I fonksiyonu için 0-10 MeV aralığında 20-30 mb değerinde başlarken; deneysel ^{125}I fonksiyonu için 0-10 MeV aralığında 10-20 mb değerinde başlamıştır. Reaksiyon için teorik ve deneysel ^{125}I fonksiyonunun birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

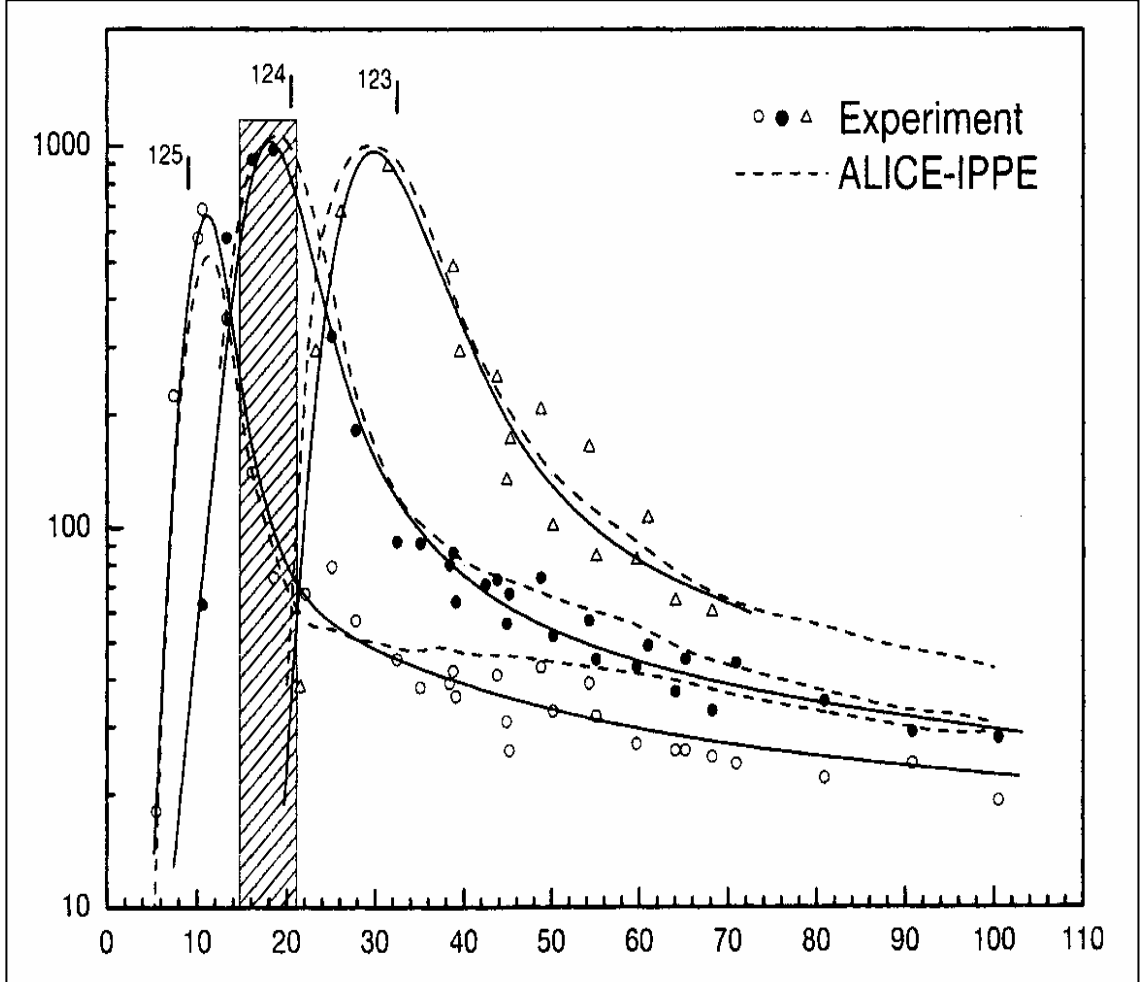
Bu çalışmadaki $^{125}\text{Te}(p, xn)^{122,123,124,125}\text{I}$ reaksiyonlarının teorik uyarılma fonksiyonları.



Şekil 4. 9 “5.5 – 100.5 MeV” enerji aralığında teorik I-122, I-123, I-124, I-125 fonksiyonları.

5.5 - 100.5 MeV enerji aralığında gelen protonların teoriksel ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I fonksiyonlarını ifade etmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi tüm fonksiyonlar için reaksiyon tesir kesiti, yaklaşık olarak 0 - 30 MeV arasında 30 - 1000 mb değerindedir. En yüksek pik değerini ^{123}I , ^{124}I değeri vermiştir.

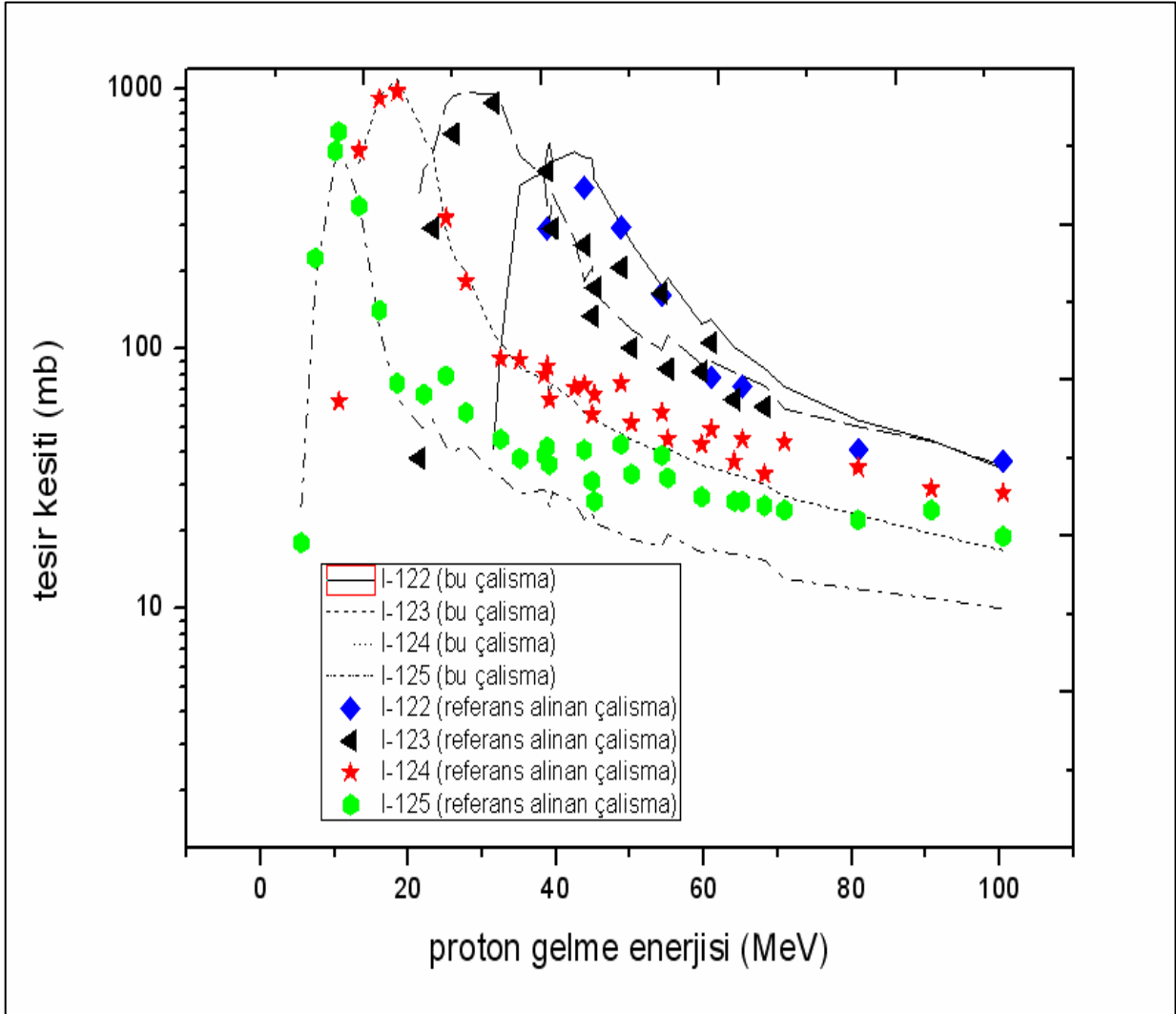
Bu çalışmada referans olarak kullanılan ‘‘Hohn A., Nortier F.M., Scholten B., Van der Walt T.N., Coenen H.H., Qaim S.M., 2000, Excitations of $^{125}\text{Te}(p, xn)$ -reactions from their respective thresholds up to 100 MeV with special reference to the production of ^{124}I , 55, 149-156’’ makalesine ait $^{125}\text{Te}(p, xn)^{122,123,124,125}\text{I}$ reaksiyonlarının deneysel uyarılma fonksiyonları.



Şekil 4. 10 ‘‘5.5 – 100.5 MeV’’ enerji aralığında deneysel I-123, I-124, I-125 fonksiyonları.

5.5-100.5 MeV enerji aralığında gelen protonların deneysel ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I fonksiyonlarını belirtmektedir. Bu fonksiyonlar için reaksiyon tesir kesiti yaklaşık olarak 0-20 MeV arasında yaklaşık 20-1000 mb değerindedir. En yüksek pik değerlerini

^{124}I ve ^{123}I değeri vermektedir. Düz çizgiler Hohn ve arkadaşlarının 2001 yılında yaptığı deneysel çalışmanın sonuçlarını, kesikli çizgiler ise ALICE-IPPE kullanılmasıyla gerçekleşen nükleer model hesaplamalarının sonuçlarını göstermektedir. Taralı alan ^{124}I nin üretimi için uygun olan enerji aralığını göstermektedir.



Şekil 4. 11 “5.5 – 100.5 MeV” enerji aralığında deneysel ve teoriksel I-122, I-123, I-124, I-125 fonksiyonları.

5.5-100.5 MeV enerji aralığında gelen protonların deneysel ve teoriksel ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I fonksiyonlarını belirtmektedir. En yüksek pik değerlerini deneysel olarak ta teorik olarak ta ^{124}I ve ^{123}I değeri vermektedir. En yüksek pik değeri ^{124}I nin üretimi için

uygun olan enerji aralığını göstermektedir. Bu çalışmada hesaplanan ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I fonksiyonlarına ait teorik tesir kesiti değerleri ile referans alınan çalışmada hesaplanan ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I deneysel tesir kesiti verileri grafikten de görüldüğü gibi birbirleriyle uyum içindedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında teorik olarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlardan, ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I hedef çekirdekler için 5.5 - 100.5 MeV arası proton gelme enerjisine bağlı olarak tesir kesiti değerleri elde edilmiştir.

Çalışmada ayrıca “10 - 100 MeV” enerji aralığı için teoriksel tesir kesiti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler proton gelme enerjisiyle bağlantılı tesir kesiti grafiğine aktarılmıştır. Şekil 4.1 “10 - 100 MeV” enerji aralığında gelen protonların ^{122}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri yaklaşık 25 MeV de başlamış, 55 MeV de maksimum vermiş ve 100 MeV de azalmıştır. Şekil 4.2 “10 - 100 MeV” enerji aralığında gelen fotonların ^{123}I fonksiyonunu belirtmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri yaklaşık 20 MeV de başlamış, 40 MeV de maksimum vermiş ve 100 MeV de azalmıştır. Şekil 4.3 “10 - 100 MeV” enerji aralığında gelen fotonların ^{124}I fonksiyonunu ifade etmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri yaklaşık 20 MeV de başlamış, 25 MeV’ e kadar azalmaya başlamış ve 100 MeV ‘de azalmıştır. Şekil 4.4 “10 - 100 MeV” enerji aralığında gelen fotonların ^{125}I reaksiyonunu belirtmektedir. Reaksiyon tesir kesiti değeri yaklaşık 15 MeV de başlamış, 20 MeV e kadar azalmaya başlamış ve 30 MeV de azalmıştır. Şekil 4.3 ve şekil 4.4 birbirleriyle uyum içindeyken; şekil 4.1 ve şekil 4.2 ile çok farklı durumdadırlar.

$^{125}Te(p, xn)^{122,123,124,125}I$ reaksiyonlarının “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığındaki teoriksel ve deneysel uyarılma fonksiyonları, bu enerji aralığına tekabül eden tesir kesiti değerlerini her bir fonksiyon için daha ayrıntılı görmek amacıyla ayrı ayrı çizilmiştir. Şekil 4.5 proton gelme enerjisi “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-122 fonksiyonunu, şekil 4.6 proton gelme enerjisi “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-123 fonksiyonunu, şekil 4.7 “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-124 fonksiyonunu, şekil 4.8 “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında reaksiyonun teorik ve deneysel I-125

fonksiyonunu belirtmektedir. Reaksiyon tesir kesiti, teorik ^{122}I fonksiyonunda 20-40 MeV arasında yaklaşık 30-40mb aralığında başlarken; deneysel ^{122}I fonksiyonu da 30-40 MeV arasında 100 mb üzerindeki bir değerde başlamıştır. Teorik ^{123}I fonksiyonu için tesir kesiti değeri 20 MeV de yaklaşık 400 mb değerinde başlarken; deneysel ^{123}I fonksiyonu da 20 MeV de 40 mb değerinde başlamıştır. Teorik ^{124}I fonksiyonu için reaksiyonun tesir kesiti 10 MeV de yaklaşık 500 mb değerinde; deneysel ^{124}I fonksiyonu için 10 MeV de 60 mb değerinde başlamıştır. Reaksiyon tesir kesiti, teorik ^{125}I fonksiyonu için 0-10 MeV aralığında 20-30 mb değerinde başlarken; deneysel ^{125}I fonksiyonu için 0-10 MeV aralığında 10-20 mb değerinde başlamıştır. Grafiklerden de görüldüğü gibi teorik ve deneysel fonksiyonların hesaplanan tesir kesiti değerleri birbirleriyle uyumludur. Yalnızca ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I fonksiyonlarının teorik ve deneysel başlangıç noktaları uyuşmamaktadır. Oysaki ^{125}I fonksiyonu teorik ve deneysel olarak birebir örtüşmektedir.

Şekil 4.9 ve 4.10 da “5.5 - 100.5 MeV” enerji aralığında ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I fonksiyonlarının hepsi birlikte olacak şekilde sırasıyla teorik ve deneysel ifadeleri görülmektedir. Şekil 4.9 da teorik olarak ifade edilen tüm fonksiyonlar için reaksiyon tesir kesiti, yaklaşık olarak 0-30 MeV arasında 30-1000 mb değerindedir. En yüksek pik değerini ^{123}I , ^{124}I değeri vermiştir. Şekil 4.10 da deneysel olarak ifade edilen tüm fonksiyonlar için reaksiyon tesir kesiti yaklaşık olarak 0-20 MeV arasında yaklaşık 20-1000 mb değerindedir. En yüksek pik değerlerini ^{124}I ve ^{123}I değeri vermektedir. Düz çizgiler Hohn ve arkadaşlarının 2001 yılında yaptığı deneysel çalışmanın sonuçlarını, kesikli çizgiler ise ALICE-IPPE kullanılmasıyla gerçekleşen nükleer model hesaplamalarının sonuçlarını göstermektedir. Taralı alan ^{124}I nin üretimi için uygun olan enerji aralığını göstermektedir.

Şekil 4.11 de teorik ve deneysel olarak ikisi bir arada olmak koşuluyla tüm fonksiyonlar için reaksiyon tesir kesitini ifade etmektedir. En yüksek pik değerlerini deneysel olarak ta teorik olarak ta ^{124}I ve ^{123}I değeri vermektedir. En yüksek pik değeri ^{124}I nin üretimi için uygun olan enerji aralığını göstermektedir. Bu çalışmada hesaplanan ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I fonksiyonlarına ait teorik tesir kesiti değerleri ile referans alınan çalışmada

hesaplanan ^{122}I , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I deneysel tesir kesiti verileri grafikten de görüldüğü gibi birbirleriyle uyum içindedir.

Bu çalışmada kullanılan ^{125}Te elementi için (p,xn) reaksiyon tesir kesiti değerleri yaklaşık olarak 25 - 40 MeV de maksimum verip, 65 - 100 MeV e kadar azalmaktadır.

Şekiller neticesinde enerji değerinin artmasıyla bağlantılı olarak piklerin daha da keskinleştiğini söylemek mümkündür.

Her deneysel veya teorik çalışmada olabileceği gibi bu çalışma sırasında da sistemden kaynaklanan bazı hatalar oluşmuş olabilir. Bunlardan başlıcaları, bilgisayara girilen verilerin hata payının bulunabilmesi ve bunun sonucunda programının bu verilere göre çalışmasıdır.

Bundan sonra yapılacak olan çalışmalar, nükleer reaksiyon modellerine dayanan nükleer reaksiyon hesapları, radyoizotop üretim programları için gerekli veri tabanının güçlendirilmesi, üretim teknolojisinin geliştirilmesi ve deneysel çalışmalara ışık tutması bakımından önemli olacaktır.

KAYNAKLAR

Acir A., Alkan M., Arasoğlu A., Demirkol İ., Özmen A., Şarer B., Tel E., 2004, Nucl. Sci. And Eng., Vol:147 No:1 83-91.

Acir A., Alkan M., Arasoğlu A., Demirkol İ., Özmen A., Şarer B., Tel E., 2006. Nucl. Sci. And Eng. Vol 147. No 1, 83.

Arya P. Atam, 1999, “Çekirdek Fiziğinin Esasları”. Çeviri Editörü Yusuf Şahin.

Aydın A., Okuducu Ş., Şarer B., Tanır G., Tel E., 2004. Acta Phys Slov. Vol 54. No 2, 191.

Aydın A., Okuducu Ş., Şarer B., Tanır G., Tel E., 2003. J Phys. G. Nucl. Part. Phys. 29, 2169.

Barat J.L., Godart J., Menthe A., 1978, “In beam collection of ^{123}Xe for carrier-free ^{123}I production”. Applied Radiation and Isotopes, 28, 967-969.

Bastian Th., Coenen H.H., Qaim S.M., 2001, “Excitation functions of $^{124}\text{Te}(d, xn)$ $^{124,125}\text{I}$ reactions from threshold up to 14 MeV: comparative evaluation of nuclear routes for the production of ^{124}I ”. Applied Radiation and Isotopes, 55, 303-308.

Bastian T., Blessing G., El-Azoney K.M., Hohn A., Qaim S.M., Spellerberg S., 2003, “Some optimisation studies relevant to the production of high-purity ^{124}I and ^{120g}I at a small-sized cyclotron”. Applied Radiation and Isotopes, 58, 69-78.

Beiser Arthur, 1992, “Modern Fiziğin Kavramları”.

Blann M., Bisplinghoff J., 1982, “Code ALICE/LIVER MORE 82 UCID”. 19614.

Boztosun İsmail, 2005, “Nükleer Fizik Ders Notları”.

Coenen H.H., Hohn A., Nortier F.M., Qaim S.M., Scholten B., Van der Walt T.N., 2001, “Excitation functions of ^{125}Te (p,xn)- reactions from their respective thresholds up to 100MeV with special reference to the production of ^{124}I ”. Applied Radiation and Isotopes, 55, 149-156.

Coenen H.H., Hohn A., Qaim S.M., 1998. “Nuclear data relevant to the production of ^{120g}I via the ^{120}Te (p,n)-process at a small-sized cyclotron”. Applied Radiation and Isotopes, 49, 1493-1496.

Coenen H.H., Hohn A., Qaim S.M., 2000, “Excitation functions of $^{120}\text{Te}(d, xn)$ $^{121,120mg}\text{I}$ reactions from threshold up to 13.5 MeV: comparative studies on the production of ^{120g}I ”. Applied Radiation and Isotopes, 52, 923-925.

Coenen H.H., Hohn A., Qaim S.M., Scholten B., 1998, “Excitaiton functions of (p,xn) reactions on highly enriched ^{122}Te :relevance to the production of ^{120g}I ”. Applied Radiation and Isotopes, 49, 93-98.

Coenen H.H., Herzog H., Kruecker D., Qaim S.M., Spellerberg S., Tellmann L., 2006, “Assessment of the short-lived non-pure positron-emitting nuclide ^{120}I for PET imaging”. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, Vol. 33, No. 11, 1249-1257.

CSISRS, V. MCLANE, 1997, experimental nuclear data file, National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory, <http://www.nndc.bnl.gov>.

Hohn A., Qaim S.M., Sudar S., 2000, “Nuclear model calculations on proton and deuteron induced reactions an ^{122}Te and ^{120}Te with particular reference to the formation of the isomeric states $^{120mg}\text{I}$ ”. Applied Radiation and Isotopes, 52, 937-941.

Kondo K., Lambrect R.M., Wolf A.P., 1977, "Iodine-123 production for radiopharmaceuticals XX^* excitation functions for the $^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ and $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reactions and the effect of target enrichment on radionuclidic purity". Applied Radiation and Isotopes, 28, 395-401.

Konobey A. Yu., Korovin Yu.A., Pereslavl'tsev P.E., 1997, "Code ALICE/ASH for calculation of excitation functions, energy and angular distributions of emitted particles in nuclear reactions". Obnik Institute of Nuclear Power Engineering.

Krane, S. K., 2001, "Nükleer Fizik 1. Cilt Ders Kitabı". Çeviri Editörü Başar Şarer.

Mashnik S.G., 1995, "User manual for the code CEM95 IAEA". Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research: Dubna, Moscow, Russia.

Schlyer David.J., 2001, "Production of Radiactive İodin", Conference.

Şarer B., 2007, "05/2007-14 kodlu" Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi.

Qaim S.M., Scholten B., Stöcklin G., 1989, "Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium and enriched ^{123}Te : Production of ^{123}I via the $^{123}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$ process at a low-energy cyclotron". Applied Radiation and Isotopes, 40, 127.

Qaim S.M., 2000, "Nuclear data relevant to the production and application of diagnostic radionuclides". Applied Radiation and Isotopes, 89, 223-232.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nurdan KARPUZ

Doğum Yeri : AFYONKARAHİSAR

Doğum Tarihi : 10.07.1982

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Lisesi(YDA) / 1996 - 2000

Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik / 2002 - 2006

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü / 2006 - ...

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

- Milli Eğitim Bakanlığına bağlı Çobanlar Atatürk İlköğretim Okulu/ Nisan 2007-
Haziran 2007
- Milli Eğitim Bakanlığına bağlı Final Dergisi Dershanesi/ Ağustos 2007-
Temmuz 2009