



**^{57}Co RADYOİZOTOP ÜRETİM
REAKSİYONLARININ UYARILMA
FOKSİYONLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Asiye GÜROL

Danışman
Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN

İkinci Danışman
Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

FİZİK ANABİLİM DALI

Haziran 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**⁵⁷CO RADYOİZOTOP ÜRETİM REAKSİYONLARININ
UYARILMA FONKSİYONLARININ İNCELENMESİ**

Asiye GÜROL

Danışman

Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN

İkinci Danışman

Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

FİZİK ANABİLİM DALI

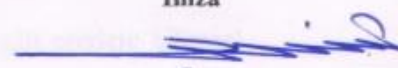
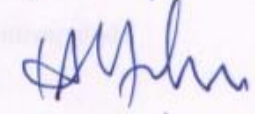
Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Asiye GÜROL tarafından hazırlanan “⁵⁷Co Radyoizotop Üretim Reaksiyonlarının Uyarılma Fonksiyonlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 18/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN

İkinci Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

		İmza
Başkan	: Prof. Dr. Rıdvan ÜNAL Uşak Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO	
Üye	: Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi	
Üye	: Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi	
Üye	: Prof. Dr. Sabri ÇEVİK Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Bekir ORUNCAK Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi	

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

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

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18/06/2019

Asiye GÜROL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

⁵⁷Co RADYOİZOTOP ÜRETİM REAKSİYONLARININ UYARILMA FONKSİYONLARININ İNCELENMESİ

Asiye GÜROL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN

İkinci Danışman: Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Sağlık alanında kullanılan radyoizotoplar genellikle siklotron ve reaktörler ile üretilmektedir. Radyoizotopların hangi reaksiyon ile üretileceğini, üretimde kullanılan parçacıkların enerjisini hedef çekirdek ve reaksiyonun tesir kesitleri belirlemektedir.

⁵⁷Co radyoizotopu B12 vitamini eksikliği için Schilling'in testinde kullanılmaktadır. Gastrointestinal B12 vitamini emilim tayini, nükleer tıp laboratuvarları tarafından sunulan ilk testler arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, alfa uyarımlı ⁵⁵Mn(α,2n), ⁵⁴Fe(α,p), ⁵⁶Fe(α,2n+p), ⁵⁹Co(α,2n+α), ⁵⁹Co(α,x) ve ⁵⁸Ni(α,p+α) reaksiyonları ile ⁵⁷Co radyoizotopunun üretim reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonları incelenmiştir. TALYS 1.8 programı kullanılarak yapılan hesaplamalar, EXFOR kütüphanesinden alınan deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırılarak reaksiyon tesir kesitleri grafikleri sunulmuştur.

2019, xiii + 58 sayfa

Anahtar kelimeler: Alfa Reaksiyonları, Tesir Kesiti, Radyoizotop Üretimi, TALYS 1.8.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF EXCITATION FUNCTIONS OF ^{57}Co RADIOISOTOPE PRODUCTION REACTIONS

Asiye GÜROL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. İsmail Hakkı SARPUN

Co-Supervisor: Prof. Hüseyin Ali YALIM

Radioisotopes used in the field of health are generally produced with cyclotron and nuclear reactors. The target nucleus and the cross-sections of the reaction determine the reaction of radioisotopes and the energy of the particles used in production.

The ^{57}Co radioisotope is used in Schilling's test for vitamin B12 deficiency. Gastrointestinal vitamin B12 absorption assay is among the first tests offered by nuclear medicine laboratories.

In this study, the excitation functions of alpha-induced $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)$, $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)$, $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,x)$ and $^{58}\text{Ni}(\alpha,p+\alpha)$ reactions were investigated as ^{57}Co radioisotope production reactions. The calculations were realized with TALYS 1.8 code, then experimental data obtained from EXFOR library and theoretical calculation results were compared and reaction cross-sectional graphs were presented.

2019, xiii + 58 pages

Keywords: Alpha induced Reaction, Cross section, Radioisotope Production, TALYS 1.8.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilimsel ve akademik tecrübesiyle çalışmama yaptığı katkılarından dolayı ve her konuda bana yardımcı olan değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN ve ikinci danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hiçbir zaman yardımını esirgemeyen değerli arkadaşım Şevki KİREMİTÇİOĞLU' na, değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Bekir ORUNCAK' a ve hayatım boyunca desteklerinden dolayı aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Asiye GÜROL
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
GRAFİKLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yüklü Parçacıklar	3
1.2 Alfa Parçacığı	3
1.2.1 Alfa bozunması mekanizması.....	4
1.2.2 Alfa parçacığının özellikleri ve etkileri	6
1.3 Nükleer Reaksiyonlar	6
1.4 Nükleer Reaksiyonların Sınıflandırılması	7
1.4.1 Ara durum oluşup oluşmamasına göre reaksiyon mekanizması	7
1.4.2 Elastik saçılma.....	8
1.4.3 Doğrudan (Direkt) reaksiyonlar.....	10
1.4.4 Bileşik çekirdek reaksiyonları	12
1.4.5 Rezonans reaksiyonları.....	<u>1615</u>
1.5 Tesir Kesiti	<u>1716</u>
1.5.1 Klasik varsayımlar	<u>1918</u>
1.6 Radyoizotoplar	<u>2221</u>
1.6.1 Radyoizotopun tarihsel gelişimi	<u>2322</u>
1.6.2 Radyoizotop üretimi	<u>2423</u>
1.6.3 Radyoizotopların kullanım alanları	<u>2625</u>
1.6.4 Radyoizotopun nükleer tıpta kullanımı	<u>2827</u>
2. TEZ ÇALIŞMASININ AMACI ve LİTERATÜR İNCELEMESİ	<u>3029</u>
2.1 Tez Çalışmasının Amacı.....	<u>3029</u>
2.2 Literatür İncelemesi	<u>3130</u>

3. MATERYAL ve METOT	3332
3.1 Teorik Hesaplama.....	3332
3.2 Talys Kodu	3433
3.2.1 Talys1.8 bilgisayar kod programında reaksiyon tesir kesiti	3534
3.3 Çalışılan Kısımın Seçimi	3635
4. TEORİK HESAPLAMALAR	3837
4.1 $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu	3837
4.2 $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu	3938
4.3 $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n+p)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu	4140
4.4 $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n+\alpha)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu	4241
4.5 $^{59}\text{Co}(\alpha, x)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu.....	4442
4.6 $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu.....	4544
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	4746
6. KAYNAKLAR.....	5150
ÖZGEÇMİŞ.....	5655
Ek-1 Reaksiyon Mekanizması	5958

SİMGELER DİZİNİ

Simgeler

γ	Gama ışını
e^+	Pozitron
e^-	Elektron
ν_e	Nötrino
α	Alfa parçacığı, (4_2He)
Σ	Sigma, Tesir kesiti
Ω	Omega, Katı aç
$\bar{Be}$	Berilyum
cm	Santimetre
Co	Kobalt
E_{ilk}	Parçacığın İlk Enerjisi
E_{son}	Parçacığın Son Enerjisi
eV	Elektron Volt
fm	Fentometre
D	Döteron
GeV	Giga Elektron Volt
H	Hidrojen
He	Helyum
3He	Helyum-3 izotopu
keV	Kilo elektron Volt
meV	Mili elektron Volt
MeV	Mega elektron Volt
mm	Milimetre
n, n^0	Nötron
nm	Nanometre
($\alpha, *$)	Alfa uyarımlı reaksiyon
Mn	Mangan
Fe	Demir
Ni	Nikel

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1	Alfa parçacığı ve ürün çekirdek için potansiyel enerji ve alfa parçacığının tünelleme ile Coulomb bariyerinden kaçışı.	5
Şekil 1.2	Weisskopf'a göre Reaksiyon Mekanizması.....	8
Şekil 1.3	α gelme enerjisinin bir fonksiyon olarak laboratuvar sisteminde 60° 'lik sabit bir açıda kurşun tarafından α parçacığın elastik saçılması. Kesikli eğri Coulomb saçılmasını gösterir.	10
Şekil 1.4	R yarıçaplı çekirdeğin yüzeyinde meydana gelen direkt reaksiyonun şematik gösterimi.	11
Şekil 1.5	$^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdek oluşumu ve bozunumu için farklı reaksiyonların gösterimi	13
Şekil 1.6	^{64}Zn bileşik çekirdek oluşumu ile sonuçlanan reaksiyonunlar için tesir kesitleri	1413
Şekil 1.7	^{55}Mn (p,p) ^{55}Mn reaksiyonunda bileşik çekirdek ve denge öncesi durumların reaksiyon tesir kesitine katkısı görülmektedir.	1514
Şekil 1.8	Bileşik çekirdek reaksiyonlarında gelen α parçacığın enerjisine göre (α,n), ($\alpha,2n$), ($\alpha,3n$), ($\alpha,4n$) reaksiyon tesir kesitleri ve toplam tesir kesiti	1615
Şekil 1.9	Katı açısı içinde saçılan demetin reaksiyon geometrisi	1817
Şekil 1.10	R_1 ve R_2 etkin etkileşme yarıçaplarına sahip iki çekirdeğin gösterim diyagramı.	2019
Şekil 1.11	Siklotron hızlandırıcısının şematik gösterimi	2625

GRAFİKLER DİZİNİ

Sayfa

Grafik 4.1	^{55}Mn hedef çekirdeği için $(\alpha, 2n)$ reaksiyon tesir kesiti.....	38 <u>37</u>
Grafik 4.2	^{54}Fe hedef çekirdeği için (α, p) reaksiyon tesir kesiti.	40 <u>39</u>
Grafik 4.3	^{56}Fe hedef çekirdeği için $(\alpha, 2n+p)$ reaksiyon tesir kesiti.	41 <u>40</u>
Grafik 4.4	^{59}Co hedef çekirdeği için $(\alpha, 2n+\alpha)$ reaksiyon tesir kesiti.	43 <u>41</u>
Grafik 4.5	^{59}Co hedef çekirdeği için (α, x) reaksiyon tesir kesiti.	44 <u>3</u>
Grafik 4.6	^{58}Ni hedef çekirdeği için $(\alpha, p+\alpha)$ reaksiyon tesir kesiti.....	45 <u>44</u>



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1 Kullanılan reaksiyonların Talys 1.8 programındaki tesir kesiti analizi.....	5049
--	-------------



1. GİRİŞ

Nükleer Fizik, Becquerel'in 1896 yılında Uranyumun radyoaktifliği keşfetmesi veya Rutherford'un 1911'de çekirdeğin varlığını ileri süren hipotezi ile başlar (Krane 2006). Nükleer fizikteki deneysel ve teorik çalışmalar, 20. Yüzyıl fiziğinin gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin nükleer fizik laboratuvarlarındaki deneysel sonuçlar neticesinde;

- Kuarkların etkileşmesinden oluşan çeşitli problemlerin açığa kavuşturulması,
- Büyük patlamadan hemen sonra evrenin ilk oluşumu esnasında meydana gelen işlemlerin anlaşılması,

gibi bir çok inanılmaz problemin çözülmesine katkı sağlamaktadır (Krane 2002).

Radyoaktif ışınlar üzerinde detaylı araştırmalar yapan ve uranyumdan yayılan ışınların başka atomlarda bulunup bulunmadığını incelemeye başlayan M. Curie, toryumdan da bu ışınların yayıldığını keşfetmiştir. Uranyumdan çıkan ışınların izotopunu araştırmaya devam eden Curie çifti, öncelikle az miktarda bizmut ve uranyumun bozulma zincirinden ortaya çıkan, ismini M. Curie'nin vatanı olan Polonya'dan esinlenerek koydukları, polonyum elementini bulmuşlardır. Uranyum zincirinde polonyum elementinin de bozulması ile kalan izotopun daha güçlü olduğunu görmüşlerdir. Çalışmalarının devamında aynı yıl radyum elementini bulduklarını açıklayarak ve açığa çıkan ışınları ise radyoaktif ışınlar olarak adlandırdılar. M. ve P. Curie'nin yirminci yüzyılın başlarında radyoaktiviteyi keşfetmeleri, nükleer teknolojinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Bu keşif birçok yeni alan için öncü olmuştur (Rutherford *et al.* 2019).

Rutherford ve Soddy doğal yollarla oluşan diğer radyoaktivite türleri hakkında radyoaktif uranyum'un keşfinden sonra çalışmalar yapmışlar, radyoaktivitenin bir elementin kütlesini ve kimyasal özelliğini değiştirdiğini göstermişlerdir. Radyoaktif bozulma ile oluşan yeni çekirdeğin de genelde radyoaktif olduğunu gözlemlemişlerdir. Hatta ağır elementlerin dört farklı radyoaktif seri ile peş peşe değişimlerle kütle

kaybettiğini ve atom numaralarının değiştiği görmüşlerdir. Bu serideki her bozulmanın sadece kurşun radyoizotopunda sona erdiğini ve kendiliğinden meydana gelen bu radyoaktif değişimler sırasında alfa, beta ve gama olmak üzere 3 farklı radyasyon tipi bulunduğu belirtilmiştir (Williams 2014).

Nükleer fiziğin ilerlemesi ile ilgili olarak, 1930 yılında yayınlanmış ‘Radyoaktif Maddelerden Radyasyon’ adlı çalışmada elementlerin doğası üzerine yapılan ve temelini anlayabilme olanağı sağlayan çağı başlatan üç önemli keşiften bahsedilir. Bunlar; ilk olarak Röntgen’in 1895’de X ışınlarını keşfetmesi, bir yıl sonra Becquerel’in uranyum’un radyoaktifliğini keşfedilmesi ve son olarak Thomson tarafından 1897 yılında ise elektron keşfinin gerçekleştirilmesidir (Williams 2014).

Radyoizotoplar için bilimsel araştırmalar ve pratik uygulamaların ilerlemesi 1920’den başlar ve 1930’ların başlarına kadar devam eder. İlk büyük ilerleme 1934 yılında meydana gelen siklotron icadı, Kaliforniya’daki Berkeley Üniversitesinde Lawrence tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ile döteronları çok yüksek hızlara hızlandırmak mümkün olmuştur. Bu gelişme ile birlikte Lawrence tarafından hızlı bir döteronun hedef elemente yönlendirilmesinin, bir radyoizotop oluşumu ile sonuçlanan reaksiyona neden olduğunu ve bu reaksiyonda 10 dakika yarı ömrü olan radyoizotop oluştuğunu gözlemlemiştir (Rotherford *et al.* 2019).

Nükleer fizik ve radyoizotop ile ilgili konularda gelişen teknoloji ile ilerlemelerin hızla devam ettiği günümüzde, insanlar farkında olarak ya da olmayarak hep radyoaktif bir ortamda yaşamaya devam etmektedir. Sürekli olarak doğal ya da yapay radyasyon etkisi altında kalmaktadır. Bu nedenle radyasyonun insan yaşamında önemli bir yeri vardır. Her şeyden önce enerji olan radyasyonu, tüm özelliklerini çok iyi bilerek ve doğru anlayarak hem yaşantımızın pek çok alanında hem yararımıza kullanabilmemiz hem de onun zararlarından korunmamız mümkündür. Özellikle, medikal teknolojisinin tıp sektörüne uygulanması ile birçok teşhis ve tedavi amaçlı yöntem geliştirilmiştir. Radyasyon uygulamaları tıp başta olmak üzere diğer pek çok alanda vazgeçilmez yöntemlerden olmuştur (Williams 2014).

Bu tez çalışmasında; ^{57}Co radyoizotopunun üretim reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonları, $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)$, $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)$, $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,x)$, $^{58}\text{Ni}(\alpha,p+\alpha)$ reaksiyonları ile incelendi. Talys 1.8 nükleer reaksiyon kodu kullanılarak yapılan hesaplamalar, Exfor kütüphanesinde mevcut olan deneysel veriler ile reaksiyon tesir kesitleri grafikleri çizilerek karşılaştırılmıştır. Nükleer reaksiyonların uyarma fonksiyonunun dikkatli ve sistematik bir teorik çalışması olarak öngörülen modellerle çalışan Talys 1.8 kodu hesaplamaları deneysel veriler ile karşılaştırılarak, ^{57}Co radyoizotopunun α ile uyarılmasından üretiminin incelenmesi yapıldı.

1.1 Yüklü Parçacıklar

Yüklü parçacıkların enerjileri, madde tarafından soğurulmasının ölçülmesiyle tayin edilmektedir. Genel olarak, yüklü parçacıklar madde içerisinden geçerken enerji kaybı ve geliş doğrultularından sapmaları gibi iki ana özellikle karakterize edilmektedir. Bu etkiler, öncelikle maddenin atomik elektronları ile inelastik çarpışması ve çekirdekten elastik saçılmasının sonucudur. Bu reaksiyonlar madde de birim uzunluk başına birçok defa meydana gelmektedir. Bunların dışında Cherenkov radyasyon yayınlanması, nükleer reaksiyonlar, transfer radyasyonu ve Bremsstrahlung gibi meydana gelen reaksiyonlar da vardır. Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi incelenirken, yüklü parçacıklar hafif yüklü parçacıklar (e , e^+) ve ağır yüklü parçacıklar (muon, mion, proton, alfa ve diğer ağır çekirdekler) diye iki gruba ayrılmaktadır (Ramo 1939).

1.2 Alfa Parçacığı

Radyoaktif kaynaklardan yayınlanan alfa parçacıkların saçılması, atomların pozitif yüklerinin çok küçük bir çekirdek içinde bir araya gelmesinin ilk ipuçlarını vermiştir. Alfa parçacıklarının, çekirdekler ile etkileşimleri ve dönüşümleri sonucu, ağır elementlerin parçalanması (filyon) ve hafif elementlerin kaynaşması (füzyon) ile yeni atomlar meydana gelmiştir (Berrett *et al.* 1995).

Radyasyon, enerjinin yayılımı halidir. Bu yayılım elektromanyetik dalga veya parçacık halinde olabilmektedir. Bu enerji yayılımı ışınlamaların aktarılması üzerine kuruludur. Bu

ışınlar alfa, beta ve gamadır. Diğer ışınlarda söz konusudur lakin bu üç ışın fonksiyoneldir. Radyasyon, iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Alfa parçacığı iyonlaştırıcı radyasyon kategorisinde yer almaktadır ve iyonlaştırıcı radyasyonlar da parçacık ve dalga tipi olmak üzere iki şekildedir. Alfa parçacığı, iyonlaştırıcı radyasyonun parçacık formudur.

Alfa parçacıkları, nötron-proton oranı düşük olduğu zaman radyoaktif izotopun çekirdeğinden yayınlanan helyum çekirdeğidir. İki nötron ve iki protondan meydana gelir ve yükleri pozitifdir. Alfa parçalanması sonunda radyoaktif izotopun atom numarası iki, kütle numarası dört azalır. Radyoaktif bozulmada; X ; radyoaktif çekirdek, Z ; atom numarası ve A ; kütle numarası olarak ifade edilir.

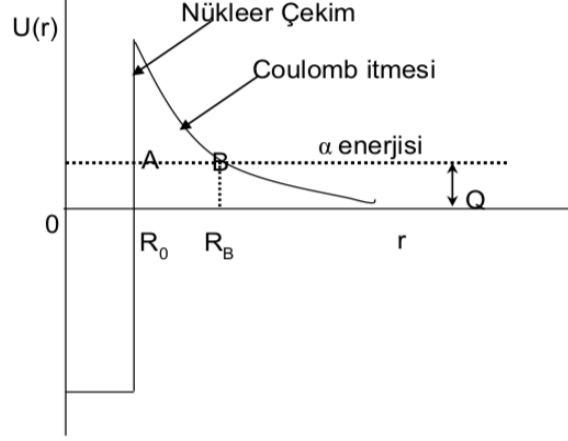


Alfa parçacık teorisine göre; iki nötron ve iki proton yan yana gelerek alfalar halinde bulunmaktadır. Kütle numarası beşten büyük atomlarda çekirdek içerisinde alfa grupları mevcuttur. Bu nötronlar ve protonlar diğer nükleonlarla enerji alışverişi yapmaktadır. Yüklü tanecikler arasında Coulomb itme kuvveti vardır. Fakat bu kuvvetleri çekirdek kuvvetlerinin yanında çok küçüktür. Çekirdek kuvvetleri yakın erişimli kuvvetlerdir. Alfalar çekirdek içinde belli bir E_0 enerji düzeyinde bulunur ve çekirdeğin U potansiyel engeli ile çevrili bir bölgede hareket eder. $E_0 < U$ olduğunda, klasik olarak parçacık potansiyel engeli aşacak enerjiye sahip değildir. Kuantum mekaniğine göre parçacığa ilişkin dalganın, sanki bir delik varmış gibi engeli aşma olasılığı vardır ve buna tünel olayı adı verilir. Parçacığın birim zamanda çekirdekten kaçma olasılığına ise parçalanma sabiti denir ve λ ile gösterilir (Rotherford *et al.* 2019).

1.2.1 Alfa bozunması mekanizması

Evrenin ilk oluşmasından hemen sonra oluşan radyoaktif çekirdekler çok önceden bozunmuş olduğundan ana çekirdeği bulmamız mümkün değildir. Bozulmayı, içinde belli bir süre, α -parçacığının var olduğu ve etrafında elektronların hareket ettiği düşünülen bir çekirdek modeli ile anlamamız mümkündür. Alfa parçacığı tarafından

görülen potansiyel enerji, Şekil 1.1’de gösterildiği gibidir. Potansiyel enerji kuyusu (yaklaşan kare kuyu) kısa menzilli nükleer kuvveti temsil etmektedir.



Şekil 1.1 Alfa parçacığı ve ürün çekirdek için potansiyel enerji ve alfa parçacığının tünelleme ile Coulomb bariyerinden kaçışı.

Nükleer yarıçap R_0 ötesinde, Coulomb itmesi baskındır (çünkü nükleer kuvvet sıfıra düşer) ve Coulomb potansiyelinin karakteristik $1/r$ bağımlılığını görülmektedir. Çekirdek içinde tuzaklanan α -parçacığının potansiyel kuyusu duvarları arasında ileri geri gidip geldiği düşünülebilir. Eğer parçacık klasik fizik tarafından yönetiliyorsa çekirdekten çıkması mümkün değildir (Şekil 1.1’de noktalı çizgi). Fakat kuantum fiziğine göre, α -parçacığının Coulomb bariyerini A’dan B’ye tünelleme olasılığı vardır. Bariyerin yükseklik ve genişliği çekirdeğin bozulma hızını etkilemektedir. Bu bariyerden dolayı kararsız çekirdeğin yarı-ömrü mikro saniyeden 10^{10} yılına kadar çıkabilir. Şekil 1.1’de Q değeri, α -parçacığı çekirdekten çok uzak olduğu zamanki toplam kinetik enerjiyi temsil etmektedir. Çekirdeklerin neden bu dört bileşenli α -parçacığını yaydığı ve neden dört ayrı bileşeni yaymadığı ise α -parçacığının çok sıkı bağlı olması ve bunun için de kütesinin dört ayrı parçacığın kütleleri toplamından küçük olması olarak açıklamak mümkündür (L’Annunziata 2003).

1.2.2 Alfa parçacığının özellikleri ve etkileri

Alfa parçacığı doğrudan alfa ışınlarıyla ilişkilidir ve özelliklerine bakıldığında penetrasyon özelliklerinin pek olmadığı ve enerjilerini madde içinde çok kısa mesafelerde kaybettiği görülmektedir. Yükleri pozitifdir, elektrik ve manyetik alanla karşılaştığında negatif kutba doğru yönelirler, molekül yapısından elektron koptuğunda iyonlaşma süreci başlatır. Alfa parçacığı ise bu ışınların rol aldığı parçacık radyasyonunda yer almaktadır. Parçacık radyasyonu, kütleli enerji ile çok hızlı devinim yapan küçük parçalardır (İnt. Kyn. 2). Alfa parçacıklarının özellikleri ise;

- * Helyum çekirdekleridir ve enerjileri yüksektir.
- * Kalınlıkları oldukça küçük ve bir kağıt ile kolaylıkla durdurulabilirler.
- * Elektrik yükü büyük ve iyonlaşma oluşturmaktadır. Bu da enerjilerinin azalmasına yol açmaktadır.
- * Erişme mesafeleri azdır.
- * Dış radyasyon riski oluşturmazlar.
- * Uranyum ya da Radyum tarafından yayılırken fazla çıkan enerji ise gama ışını olarak yayılmaktadır.
- * Alfa parçacığı ısıtıldığında çekirdekten dört nükleon ayrılır ve atom kütlesi değişime uğramaktadır. Atom kütlesindeki değişim 4,0015 amu'dur.
- * Berilyum ile reaksiyonu nötron oluşumuna yol açmaktadır.

1.3 Nükleer Reaksiyonlar

Reaktör veya hızlandırıcıdan çıkan parçacıklar madde üzerine düşürüldüğünde nükleer reaksiyon olma olasılığı vardır. İlk nükleer reaksiyonlar, alfa parçacıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ilk deneyde, bazı alfa parçacıklarının hedef çekirdekten elastik olarak geri saçıldığı gözlemlendi ve atom çekirdeğinin varlığı ile ilgili ilk kanıt olan bu olay Rutherford saçılması olarak adlandırıldı (Krane 2002).

Nükleer reaksiyonlarda temel olarak a ; hızlandırılan parçacık, X ; hedef (genel olarak laboratuvar ortamında hareketsiz) çekirdek, Y ; ürün çekirdek ve b ; ürün parçacık olarak

gösterilir. Genel olarak Y hedefte duran ve doğrudan gözlemlenmeyen ağır bir ürün ve b tespit edilebilen ve ölçülebilen hafif bir parçacıktır. Burada, a ve b 'nin hafif nükleon veya hafif çekirdekler olması mümkün iken bazen b , bir γ ışını olabilir. Genel olarak bir nükleer reaksiyon denklemi;

$$a + X \rightarrow Y + b \quad (1.2)$$

olarak gösterilir. Bir başka gösterim şekli ise;

$$X(a, b)Y \quad (1.3)$$

dir (Krane 2002).

1.4 Nükleer Reaksiyonların Sınıflandırılması

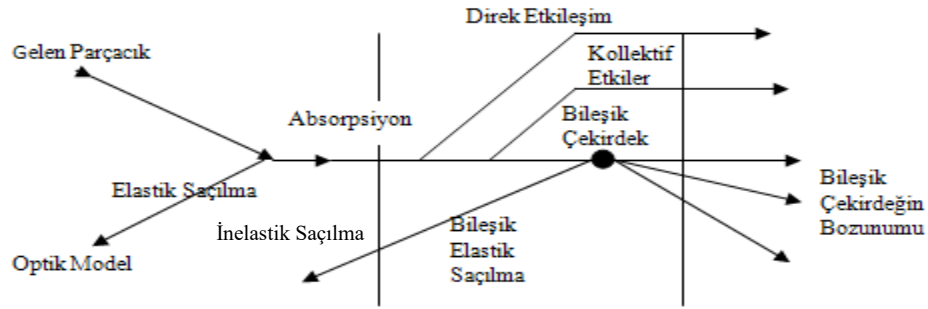
Nükleer yapı hakkındaki bilgilerin önemli bir bölümü elektron, proton gibi parçacıkların hedeften saçılmasıyla oluşan saçılma deneyleriyle ele alınır. Saçılma teorisi, nükleer reaksiyon fiziğinde önemli bir yere sahiptir ve dolayısıyla birçok fiziksel problemin uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Parçalanma, fisyon, füzyon, bileşik çekirdek, rezonans ve doğrudan reaksiyonlar gibi var olan sınıflandırmalar içinde, bu çalışmadaki tepkime türlerinin içine dahil olduğu doğrudan reaksiyonlar ve bileşik çekirdek reaksiyonları incelenecektir.

1.4.1 Ara durum oluşup oluşmamasına göre reaksiyon mekanizması

Nükleer reaksiyon mekanizmaları ele alındığında tepkimeler ara durum oluşup oluşmamasına göre de sınıflandırılabilir. Bu durumu daha iyi anlayabilmek için öncelikle, ara durumun oluştuğu ve oluşmadığı reaksiyon tanımlamalarını yapmak gerekmektedir.

Düşük enerjilerde gelen bir parçacık, öncelikle çekirdeğin Coulomb alanı ile etkileşir ve enerjisi Coulomb bariyerini aşmaya yeterli değil ise Rutherford yasasına göre saçılır.

Enerjisi Coulomb bariyerini aşacak yeterlilikte ise, çekirdeğin nükleer alanı ile etkileşerek ya nükleer saçılmaya uğrar ya da absorbe edilerek bileşik çekirdek oluşturur. Bu oluşan bileşik çekirdek uyarılmış durumdadır ve sonrasında parçacık yayınlayarak taban seviyeye geri döner. Bu ara durumun olduğu reaksiyonlar bileşik çekirdek reaksiyonları, ara durumun oluşmadığı reaksiyonlar da doğrudan reaksiyonlar olarak bilinir. Bu ara durumun oluşup oluşmamasına göre nükleer reaksiyon mekanizması Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Şekil 1.2’e göre birinci bölge, tek parçacık durumu olup, bir $V(r)$ potansiyeli ile etkileşen parçacığın elastik saçılmasını göstermektedir. İkinci bölge ise, gelen parçacığın bir kısmının absorbe edilmesi ile bileşik sistem oluşturulan bölgedir.



Şekil 1.2 Weisskopf'a göre Reaksiyon Mekanizması

Tarihsel olarak, reaksiyon mekanizmalarına yönelik teorik yöntemlerin çoğu ikili reaksiyonlar için geliştirilmiştir. Bu teorik yöntemlerin geliştirilmesi ve araştırmalar neticesinde, bu reaksiyonların mekanizma sonuçları daha da temizlenmiştir (Hilaire *et al.* 2009).

1.4.2 Elastik saçılma

Elastik saçılmalar, gelen parçacık ve hedef parçacığın çarpışması sonucunda kinetik enerjinin korunduğu, yüklü parçacıkların noktasal yükler gibi davrandığı Coulomb ve Rutherford türü saçılmalardır. Coulomb saçılması, çekirdek ve temel parçacıkların çoğunun yüklü olması sebebi ile sık görülmektedir. Coulomb saçılması diferansiyel tesir

kesitinin doğru hesaplandığı birkaç reaksiyon süreçlerinden bir tanesidir. Eğer, hedef sonsuz kütleli ve durgun olarak kabul edilirse;

$$\frac{d\delta_{Ruth}}{d\Omega} = \delta_{Ruth}(\theta) = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{16\pi\epsilon_0 E} \right)^2 \csc^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.4)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada; Z_1 ve Z_2 çarpışan çekirdeklerin atom numarasını, θ saçılma açısını ve E merminin başlangıç kinetik enerjisini ifade etmektedir. Eğer, kuvvetler çekici ise (yüklerden biri negatif ise) mermi parçacık saçılma merkezine doğru sapmaktadır. Bu sapma diferansiyel tesir kesitini etkilememektedir (Lilley 2018).

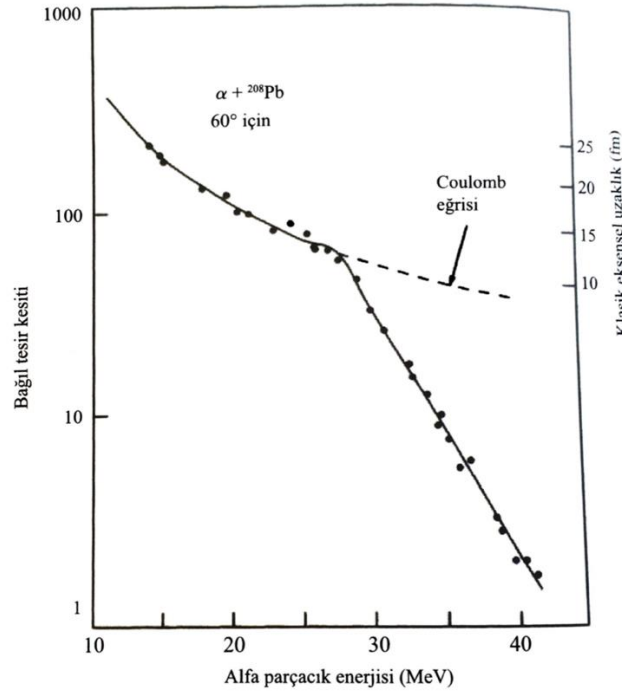
Rutherford, deneylerinde ağır hedef çekirdeklerin bombardımanı için α parçacığı kullanmıştır. α parçacıkları nükleer kuvvetlerden etkilenir ve enerjileri hedef çekirdeğin yüzeyine ulaşmak için yetersizdir. Enerji adım adım artırılırsa, α parçacıklarının nükleer bölgeyle temas etmeye başlayabilecekleri bir noktadan itibaren, yörüngelerde bozulma olur. α parçacıklarının kurşun hedef tarafından saçılması, saçılma merkeziyle Coulomb eğrisinin en yakın yaklaşım uzaklığı kolaylıkla hesaplanabilir ve böyle olunca bilinen açı ve enerji ile $\sigma_{Ruth}(\theta)$ 'dan $\sigma(\theta)$ elde edilebilir. Nükleer kuvvetlerin etkisi R etkileşme yarıçaplarında bir değer elde edilebilir. Pek çok farklı hedef için deneysel saçılma verilerinin bir analizi şu sonucu vermiştir:

$$R = 1,41A^{1/3} + 2,11 \text{ fm}. \quad (1.5)$$

Burada, A kütle numarasıdır ve hedef çekirdek ile alfa parçacığının etkin yarıçapları sırasıyla; $A^{1/3}1,41 \text{ fm}$ ve $2,11 \text{ fm}$ 'dir. Bu sonuç, çekirdeğin yarıçapının $A^{1/3}$ ile değiştiğini göstermektedir. Hacim ile orantılı olduğundan, çekirdeğin yoğunluğu tıpkı bir sıvı damlası gibi davranmaktadır (Lilley 2018).

Çekirdeğin nükleonlarının uzayda dağılımını temsil eden $\rho(r)$, dik sınıra sahip olmadığından etkileşme yarıçapı nükleer kuvvetin sınırlı alanını içermektedir. Madde yoğunluğunun merkez değerinin yarısına karşılık gelen bir $R_{1/2}$ 'den daha büyük ve nükleer madde yoğunluğunun oldukça düşük olduğu uzaklıkta hedefin nükleer

kuvvetine maruz kalır. Uyarılma enerjisi, Coulomb engeli kadar olduğunda, elastik açılmanın açılma dağılımı kırınım benzeri özellikler gösterdiği Şekil 1.3 görülmektedir (Lilley 2018).



Şekil 1.3 α gelme enerjisinin bir fonksiyon olarak laboratuvar sisteminde 60°'lik sabit bir saçıda kurşun tarafından α parçacığının elastik saçılması. Kesikli eğri Coulomb saçılmasını gösterir.

İnelastik saçılma, çekirdeğin iç yapısı hakkında önemli bilgiler veren uyarılmış nükleer durumların özelliklerinin belirlenmesi açısından önemli bir reaksiyondur. İnelastik saçılma da (elastik saçılmada ki gibi) başlangıç ve son ürünler aynıdır. Başlangıç kinetik enerjisinin bir kısmı, γ emisyonu ile bozularak mevcut parçacıkların her ikisini veya birisini uyarılmış duruma getirmek için kullanılmıştır (Lilley 2018).

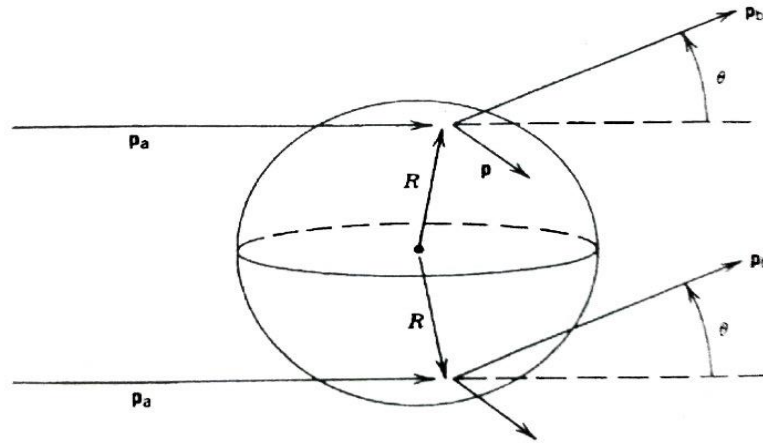
1.4.3 Doğrudan (Direkt) reaksiyonlar

Herhangi bir nükleer reaksiyonda, mermi parçacığının, hedef çekirdeğin öncelikle yüzeyi ile etkinleştiği durumlara direkt reaksiyon denir. Enerji ve madde transferi küçük olan bu reaksiyonlarda, çıkan ürünlerin kütle enerjisi, giriş kanalındaki parçacıkların

durumuna bağlıdır. Reaksiyonun zaman skalası diğer reaksiyonlara göre hızlıdır (yaklaşık olarak 10^{-22} s) ve bu süre merminin nükleer çapı geçmesi veya hedef çekirdeğin yüzeyi ile etkileşmesi için harcanan zamandır. Mermi parçacığı ile çıkan parçacık benzer, ilk kanal olan $(a+A)$ 'nın momentumunun çoğunu taşıyıcılığı için, bu parçacığın açısal dağılımı genellikle ileri yönde pik yapmaktadır. Bu reaksiyon türünde transfer reaksiyon oluşmaktadır.

Transfer reaksiyon, bir veya daha fazla nükleon hedef ve merminin birbirine geçmesi olarak tanımlanmaktadır. Son çekirdek, uyarılmış durumda kalabilir veya bozulabilir. Eğer transfer, mermiden hedefe olursa Stripping (Soyma) reaksiyon olarak adlandırılır. Pickup (Kapma) reaksiyonu ise transferin hedeften mermiye olması durumudur. Stripping reaksiyonlara örnekler olarak; (d,p) , (α,d) ve $(^{16}\text{O},^{12}\text{C})$ verilir. Pickup reaksiyonlara örnek ise (p,d) , (p,t) ve $(^{16}\text{O},^{17}\text{C})$ olarak verilebilir (Lilley 2018).

Direkt reaksiyonlarda ilk ve son durumlar arasında, parçacık ve hedef arasında açısal momentum transferi gerçekleşir. Bu açısal momentum, temas noktasındaki momentum aktarımından gelir ve çıkan parçacığın açısal dağılımını etkilemektedir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 R yarıçaplı çekirdeğin yüzeyinde meydana gelen direkt reaksiyonun şematik gösterimi.

Şekil 1.4'de şematik olarak bir direkt etkileşiminin basit, klasik resmi kullanılarak nasıl meydana gelebileceğini geleceği görülebilir. Şekil 1.4'de, yarıçapı R olan yüzeyinde

etkileşme yapan, p_i ilk momentumu ile bir θ açısıyla p_{0son} momentumuyla çıkan parçacığı gösterir. Hedefin, momentum transferini $p_t = p_i - p_0$ formülü verir ve kosinüs teoremi;

$$p_t^2 = p_i^2 p_0^2 - 2p_i p_0 \cos\theta = (p_i - p_0)^2 + 4p_i p_0 \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1.6)$$

ile ifade edilir. Transfer edilen momentumun büyüklüğü L ile verilir. Çıkan parçacık doğrultusu θ, p_i' ye bağlı olduğundan Ayrıca, L' ye de bağlıdır. Basit, açıklayıcı olarak enerji aktarımı ile kıyaslandığında, parçacığın enerjisinin büyük olduğu inelastik saçılma ele alınabilir. Bu durumda $p_t \approx p_i = p_0$ alabiliriz. Buradan;

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{p_t}{2p} \geq \frac{\sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar c}{2pcR} \quad (1.7)$$

çıkar (Lilley 2018).

1.4.4 Bileşik çekirdek reaksiyonları

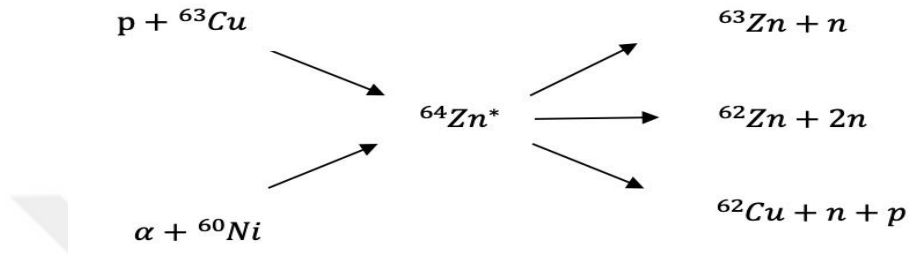
Gelen parçacık, çekirdek yarıçapına göre küçük bir çarpışma parametresi ile çekirdeğe girdiğinde, nükleonlardan biri ile etkileşerek saçılma meydana getirir. Geri tepen nükleonlar ve parçacığın diğer nükleonlarla ardışık çarpışması sonunda gelen parçacığın enerjisi, çekirdeğin nükleonları tarafından paylaşılır. Herhangi bir nükleonun enerji artışı atomu terk edecek kadar büyük değildir. Fakat bu rastgele çarpışma meydana gelirken istatistiksel bir dağılım söz konusudur. Tek bir nükleonun çekirdekten kaçma ihtimali vardır. Böyle reaksiyonlar, gelen parçacığın soğurulmasından sonra giden parçacığın (veya parçacıkların) yayınlamadan önce belirli bir ara durumuna sahiptir. Bu duruma bileşik çekirdek denir. Sembolik olarak;

$$a + X \rightarrow C^* \rightarrow Y + b \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada C^* bileşik çekirdeğin gösterimidir. Böyle reaksiyonlar, bileşik çekirdek oluşması ve sonra bozulumu olarak iki basamaklı bir işlem olarak göz önüne alınmaktadır. Belirli bir bileşik çekirdek farklı yollarla bozulabilir. Bileşik

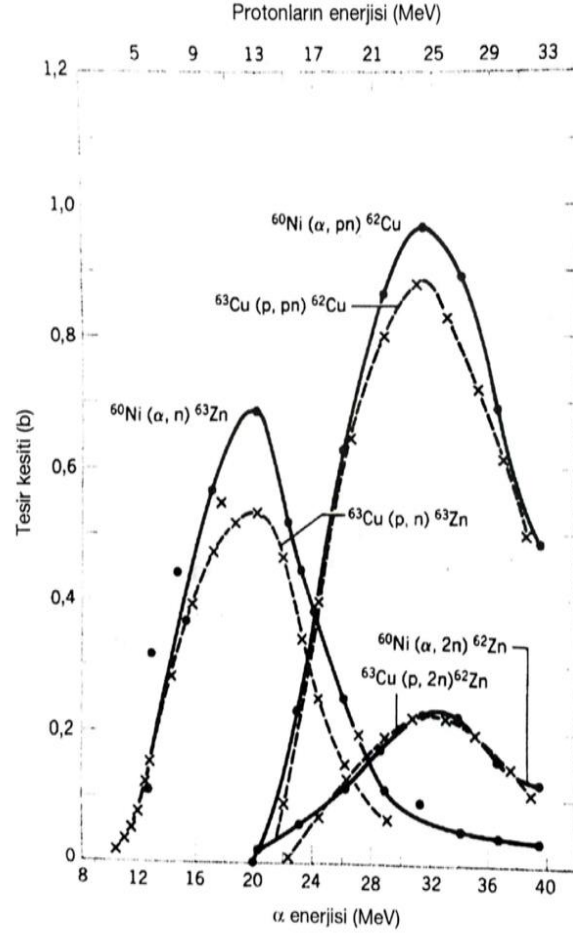
çekirdeğin bozulması oluşumuyla değil sisteme giren enerjiye bağlıdır. Etkin olarak bileşik çekirdeğin nasıl oluştuğunu unutur ve öncelikle istatistiksel kurallara göre bozulurlar (Krane 2002).

$^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdeği birden çok reaksiyonla oluşabilir ve değişik yollarla bozulabilirler. Bunlar;

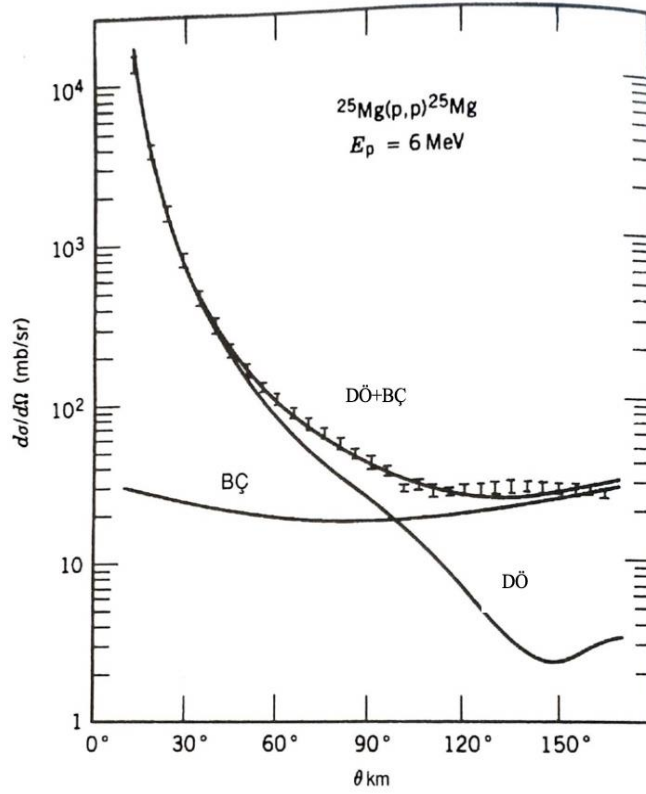


Şekil 1.5 $^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdek oluşumu ve bozunumu için farklı reaksiyonların gösterimi

şeklinde gösterilebilir. Şekil 1.5’de ise ^{64}Zn bileşik çekirdek oluşumu ile sonuçlanan reaksiyonunlar için tesir kesitleri grafiği verilmiştir.

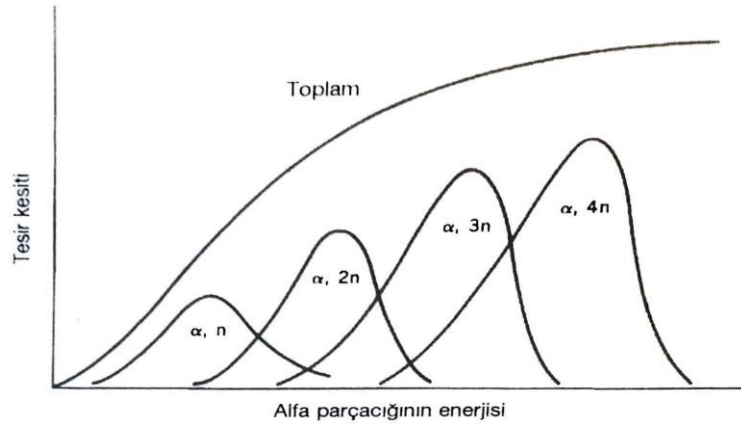


Şekil 1.6 ^{64}Zn bileşik çekirdek oluşumu ile sonuçlanan reaksiyonunlar için tesisir kesitleri $^{63}\text{Cu}(p, n)^{63}\text{Zn}$ ve $^{60}\text{Ni}(\alpha, n)^{63}\text{Zn}$ bağıl tesisir kesitinin, $^{64}\text{Zn}^*$ 'e aynı uyarılma enerjisi ile gelen için aynı olmasını beklenmektedir. Şekil 1.6, son üç durum için gelen proton ve α 'lar için tesisir kesitini göstermektedir. Üç tesisir kesiti arasındaki $^{64}\text{Zn}^*$ 'ün herhangi bir son bozulumunun başlangıçtan bağımsız olduğu gözlenmiştir (Krane 2002).



Şekil 1.7 $^{25}\text{Mg}(p,p)^{25}\text{Mg}$ reaksiyonunda bileşik çekirdek ve denge öncesi durumların reaksiyon tesir kesitine katkısı görülmektedir.

Şekil 1.7’da bileşik çekirdek reaksiyonlarının diğer karakteristik özelliği açısal dağılımları tesir kesitine etkisi verilmiştir. Nükleonların rastgele etkileşimden dolayı, çıkan parçacıklar izotropik (tüm doğrultularda aynı) açısal dağılımı ile yayılmaktadır. Gelen parçacık bir iyon ise açısal momentumun büyük bir kısmı, bileşik çekirdeğe aktarılmaktadır. İyonların açısal momentumları 0° ve 180° ’de yayınlama eğilimindedir. Hafif çekirdekler için bu etki ihmal edilir (Krane 2002).



Şekil 1.8 Bileşik çekirdek reaksiyonlarında gelen α parçacığının enerjisine göre (α, n) , $(\alpha, 2n)$, $(\alpha, 3n)$, $(\alpha, 4n)$ reaksiyon tesir kesitleri ve toplam tesir kesiti

Bileşik çekirdeğe ne kadar enerji verilirse o kadar parçacık açığa çıkar. Her son durum için tesir kesiti Gauss eğrisine benzer bir şekle sahiptir. Şekil 1.8’de görüldüğü gibi her reaksiyon için tesir kesiti, bir maksimuma kadar artar ve sonra ilave bir nötron yayınlamasını mümkün kılacak daha yüksek bir enerjiye kadar azalır (Krane 2002).

1.4.5 Rezonans reaksiyonları

Reaksiyonlarda rezonans durumu her enerjide olmayıp, belli enerji durumlarında mümkündür. Rezonans durumlarında etkileşim potansiyelinin oluşturduğu dalgaların fazı ve genliği, bariyer içinde ve bariyer dışında yaklaşık olarak birbirine eşittir. Devamlı spektrumların yüksek enerji parçası, genel olarak denge öncesi modeller ile tanımlamakta olup esasen tek parçacığın doğasıdır. Devamlı spektrumun tetkiki sonucunda gözlenmiştir ve tek parçacık denge öncesi modelin geçmiş deneyimleri ile izah edilememektedir. Örnek olarak, 14 MeV’deki esnek olmayan nötron spektrumunun çoğu 6–10 MeV uyarılma enerjisi civarında küçük kambur (hump) gösterir. Bu yapı, çekirdeklerin ortaklaşa uyarılmaları sebebiyle dev rezonanslar (giant resonance, GR) olarak bilinmektedir (Koning *et al.* 2017)

Rezonans reaksiyonları genellikle, Dev Dipol Rezonansı (GDR) absorpsiyonu kapsamında incelenmektedir. GDR, çekirdekler açısından elektriksel dipol radyasyonunun absorpsiyonu için temel durum frekansına karşılık gelir (IAEA 2000). Bu bölge, GDR

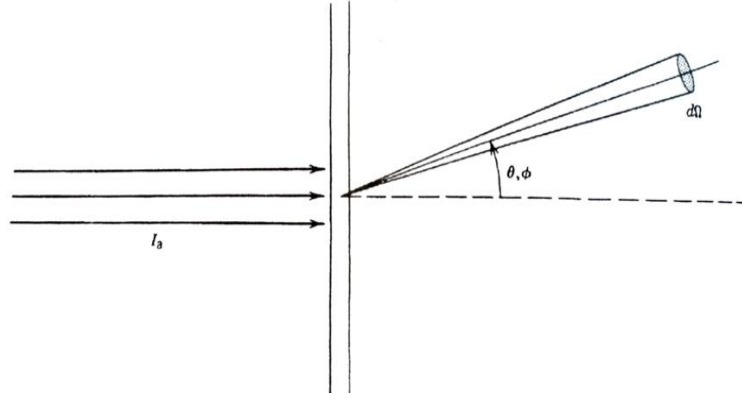
rejiminde fotonükleer reaksiyonlarda yayımlanan ikincil parçacığın açısal dağılım tanımlamasında nükleer veri değerlendiriciler için genel olmayan bir önergede mevcuttur. Kolektif uyarılmalardan yayımlanan çekirdekler için deneysel açısal dağılımlar sık sık dipol biçimi gösterir (90 derecede pikleşme) ama nükleer yapı etkileri, ayrıntılı açısal dağılımlar belirlemede önemlidir. GDR enerji bölgesinde (E_γ , yaklaşık 8–30 MeV) ağır çekirdeklerin fotoabsorbsiyon sürecinden elde edilen en olası sonuç, bir veya daha fazla nötron emisyonu olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Dietrich and Berman 1993).

1.5 Tesir Kesiti

Tesir kesiti, reaksiyon oluşumunun bağıl olasılığının bir ölçüsüdür. Demet doğrultusuna göre (θ, ϕ) doğrultusunda yayınlanan b parçacığını kaydetmek için bir dedektör yerleştirirsek; dedektör, hedef çekirdekte küçük bir $d\Omega$ katı açısı tanımlamaktadır. Şekil 1.9’da birim zamanda gelen parçacıkların akısı I_a olsun ve birim alandaki hedef çekirdek sayısı N ile gösterilir. Çıkan parçacık sayısı R_b ise, reaksiyon tesir kesiti;

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a N} \quad (1.10)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yolla tanımlanan σ , çekirdek başına alan boyutuna sahiptir, ancak gelen ışınlarda demetin gördüğü alan, hedef çekirdekleri kesitlerinin geometrik alanından daha büyük ya da daha küçük olabilmektedir. Reaksiyonlar için tesir kesiti milibarn veya mikrobarn olarak ölçülmektedir. σ alan boyutuna sahip, reaksiyon olasılığı ile orantılı bir niceliktir (Krane 2002).



Şekil 1.9 Katı açısı içinde saçılan demetin reaksiyon geometrisi

Parçacıklar genel olarak tüm doğruları eş yönlü yayınlanmazlar; θ 'ya ve ϕ 'ye bağlı olan bir açısal dağılım ile saçılmaktadır. Dağılım fonksiyonu ise $r(\theta, \phi)$ ile gösterilir ve $dR_b = r(\theta, \phi)d\Omega/4\pi$ olur (bir kürenin yüzeyi, merkezinde 4π radyanlık bir katı açı meydana getirir, burada 4π , saf bir $d\Omega/4\pi$ elde etmek için ilave edildi). O halde;

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_a N} \quad (1.11)$$

olur. $d\sigma/d\Omega$ niceliğine diferansiyel tesir kesiti denir. Diferansiyel tesir kesitinin ölçülmesi reaksiyon ürünlerinin açısal dağılımı ile ilgili önemli bilgiler vermektedir. Katı açının steradyan cinsinden ölçüldüğünde diferansiyel tesir kesitinin birimi barn/steradyan'dır. $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ olmak üzere;

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} \phi \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (1.12)$$

elde edilir. Eğer $d\sigma/d\Omega$ sabit (açıdan bağımsız) ise integral;

$$\sigma = 4\pi(d\sigma/d\Omega) \quad (1.13)$$

denklemini vermektedir. σ_t toplam tesir kesiti burada belirli bir gelen parçacık için, doğrultu veya enerjinin, birçok olasılıkla giden parçacıklar için σ reaksiyon tesir kesitine, doğrultu veya yönlerini hesaba katmaksızın toplanmaktadır. Böylece bir

hesaplama bir gelen parçacığın hedefle herhangi bir reaksiyona girme ve gelen parçacıklar demetinden kaldırılma olasılığından bahsedilmektedir. Bu, belirli kalınlıktaki hedef içinden geçen bir demetin şiddetindeki kayıp ölçülerek doğrudan elde edebilmektedir (Lilley 2018).

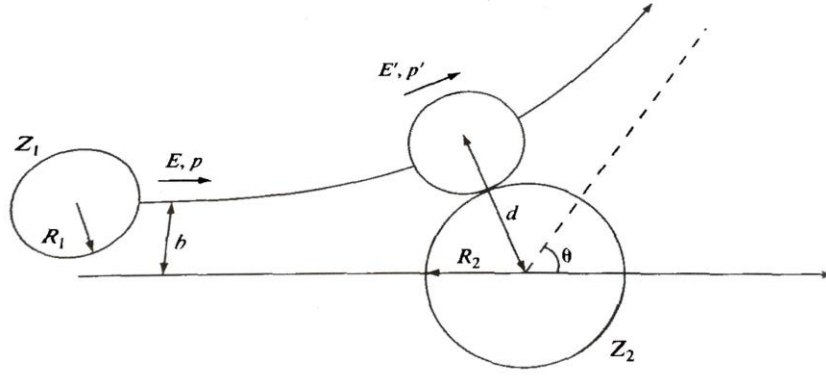
Bir nükleer çarpışmanın farklı son durumlarının her biri, kendine özgü meydana gelme olasılığına veya tesir kesitine sahiptir. Genellikle başlangıç kurallarından faydalanan özel bir tesir kesiti hesaplamak zordur. Burada nükleer modellerden yararlanarak yaklaşık hesaplamalar yapılır. Klasik veya kuantum hesaplamalar makul bir sonuç vermektedir. Genel kuantum etkileri özellikle gelen parçacığın dalga boyunun nükleer boyuttan daha büyük olduğu düşük enerjilerde klasik düşünceyi değiştirir (Lilley 2018).

1.5.1 Klasik varsayımlar

Toplam tesir kesiti; elastik saçılma tesir kesiti ve inelastik veya reaksiyon tesir kesiti olarak iki kısma ayrılmaktadır. Çarpışmaya giren çekirdekler kısa mesafeli nükleer kuvvet menzilleri içerisinde ise (σ_r), nükleer reaksiyonu ulaşabilme olasılığı yüksektir. Buna göre, R etkileşime yarıçapı olmak üzere çekirdeklerin birbirine merkezleri arasındaki mesafe, $r \leq R$ yaklaşıyorlarsa bir nükleer reaksiyon gerçekleşebilir, ancak $r > R$ 'de yaklaşırsa nükleer reaksiyon oluşmayacağı söylenebilir. Etkileşme yarıçapı, etkileşen çekirdeklere bağlıdır. Şekil 1.9'da gösterildiği gibi iki çekirdeğin etkin yarıçaplarının toplama olarak $R_1 + R_2$ gösterilmektedir. Etkileşme yarıçapı ve etkinlik yarıçapları, çekirdeğin geometrik boyutuna bağlıdır. Çekirdek içerisinde nükleer maddenin bir yüzey ile temas etmesi ve nükleer kuvvetlerin menzili nedeniyle kesin değerlere sahip değildir. Toplam tesir kesitini;

$$\sigma_t = \sigma_{sc} + \sigma_r \quad (1.14)$$

olarak tanımlayabiliriz (Lilley 2018).



Şekil 1.10 R_1 ve R_2 etkin etkileşme yarıçaplarına sahip iki çekirdeğin gösterim diyagramı.

Çarpışma parçacıklarının yüksüz olması durumunda geometrik tesir kesiti, R etkinleşme yarıçapı olmak üzere $\sigma = \pi R^2$ dir. Ancak çarpışan çekirdekler genellikle yüklüdür ve var olan itici Coulomb kuvvetinden dolayı enerji engeli ile karşılaştıkları için tesir kesiti değişecektir. Şekil 1.10'da çekirdeğin merkezinden geçen yüklü bir parçacığın b mesafesi ile yaklaştığı gösterilmektedir. Bu uzaklık sıfırdan farklı olduğu durumda ise Coulomb kuvveti yörüngeyi saptırmaktadır. Parçacıklar arasında uzaklık arttıkça, kinetik enerjinin azaldığı görülmektedir. Bunu sadeleştirmek için hedefin ağır ve durgun olduğu varsayılarak hesaplama yapılmaktadır. Çarpışma tesir kesiti, πb^2 ile gösterilmektedir. Burada b , R 'ye en yakın uzaklıktaki çarpma parametresidir. En yakın yaklaşma uzaklığında Coulomb enerjisi;

$$B = Z_1 Z_2 e^2 / (4\pi\epsilon_0) R \quad (1.15)$$

ile verilir. Z_1 ve Z_2 iki çekirdeğin atom numaralarıdır. Çarpma parametresi b , korunum yasaları kullanılarak bulunmaktadır. En yakın yaklaşma uzaklığında, başlangıçtaki E kinetik enerjinin bir kısmı indirgenmiş kinetik enerji E' bir kısmı da Coulomb potansiyel enerjisi B olarak ortaya çıkar. Bundan dolayı;

$$E = E' + B \quad (1.16)$$

olur. Açısal momentumun korunumu ise;

$$L = pb = p^l R \quad (1.17)$$

şeklinde verilmektedir. Burada p ve p^l mermi çekirdeğinin ilk momentumunu ve en yakın yaklaşma uzaklığındaki momentumunu gösterir ve tesir kesiti;

$$\frac{E^l}{E} = \left(\frac{p^l}{p}\right)^2 = \left(\frac{b}{R}\right)^2 \quad (1.18)$$

$$\sigma = \pi R^2 \frac{E^l}{E} = \pi R^2 \left(1 - \frac{B}{E}\right) \quad E \geq B \quad (1.19)$$

olur. Hedefin geri tepme durumu için, E yerine kütle merkezli denklem yazılmaktadır. Burada E , m kütleli merminin enerjisi, M ise ilk anda durgun olan hedefin kütlesidir. $B=0$ olduğu zaman yüksüz parçacıklar için πR^2 değerini elde edilmektedir. Coulomb kuvvetinin etkisini küçük olduğu yüksek enerjilerde bu limite yaklaşmaktadır. Tesir kesiti, $\sigma = \pi b^2$ merminin dalga sayısı ($k = p/\hbar$) ve açısal momentum kuantum sayısı ℓ ;

$$\sigma = \pi \left(\frac{L}{p}\right)^2 = \frac{\pi \ell(\ell+1)\hbar^2}{(\hbar k)^2} = \frac{\pi \ell^2}{k^2} \quad (1.20)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, klasik limit $\ell \gg 1$ varsayılmaktadır. Eğer, $r \leq R$ ise bir reaksiyon oluşma olasılığı kesin sayıldığı için toplam reaksiyon tesir kesiti üst limiti göstermektedir. Çarpışma sürecinde oluşan etkileşimler sonucunda farklı ürünler ortaya çıkmaktadır. Her biri oluşma olasılığı ile orantılı bir tesir kesitine sahiptir (Lilley 2018).

$E = B$ ise tesir kesiti sıfıra gider, çekirdekler kafa kafaya çarpıştıkları ve temas ettikleri için daha düşük enerjide kalmaktadır. Ancak $E < B$ durumunda sonlu bir değer alır, çünkü klasik olarak parçacıklar enerji olarak etkileşim aralığının dışında olmasına rağmen Coulomb engelini aşılabilme olasılığı vardır ve reaksiyon meydana gelebilmektedir (Lilley 2018).

1.6 Radyoizotoplar

Radyoizotoplar, bir elementin, radyoaktif bozunmaya uğrayan kararsız izotoplarıdır. Birden fazla alfa ve beta parçacıkları veya gama ışınları yayınlamaktadır. Radyum ve Uranyum gibi doğal radyoaktif izotopu olan elementler doğada oldukça az bulunmaktadır. Bilimsel çalışmalarda ve sanayideki yararlarından ötürü birçok radyoizotop yapay olarak hazırlanmaktadır. Bunlar, kararlı izotopların fotonlarla ya da bir hızlandırıcıda veya nükleer reaktörde elde edilen nötron gibi hızlandırılmış parçacıklarla bombardımanı yoluyla üretilir. Böylece yarılanma süreleri çok geniş bir dağılım gösteren çok sayıda radyoizotop elde edilebilmektedir. Radyoizotoplar kimyasal ve biyolojik bakımlardan kararlı izotoplarına çok benzer biçimde davrandığından ve miktarı ne kadar az olsa da yaydıkları radyasyon gözlenebildiğinden, kimyasal bir tepkimenin nasıl yürüdüğü ya da fizyolojik bir sürecin nasıl geliştiği yolunda, bıraktıkları radyoaktif izle yardımcı olabilirler (Knoll 1989).

Radyoizotopların dünyanın neredeyse tüm ülkelerinde uygulama alanları mevcuttur. Sağlık, endüstriyel ve güvenlik sistemlerinin gelişmesine önemli ölçüde katkıları vardır. Radyoizotopların gerekliliği ve izotop kullanımları çok çeşitli olmakla birlikte, sektörlerde onların göreceli önemi farklıdır. Genel olarak verimli alternatifte izotoplara ihtiyaç duyulmaktadır. Küresel olarak, özellikle radyoizotopların tıbbi kullanımı sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Radyoizotopların yaydığı radyasyon, vücudun belli bir dokusundaki hastalığın giderilmesine, besinlerin sterilize edilmesi ve birçok alanda yararlanılmaktadır (Knoll 1989).

Reaktörde üretilen radyoizotoplar netleştikçe, onlara bu nedenle artan talebi karşılamak giderek zorlaşmaya başlamıştır. Hızlandırıcılar kullanılarak yeni radyoizotoplar üretmek için sanayi ve tıpta yeni yollar keşfedilmiştir. IAEA'de yayınlanan radyoizotop sanayi uygulamaları, çeşitli kullanımlar ile ilgili araştırma bir rehber, yeni bir bakış ve uygulama alanı başlatmıştır. Bu uygulamaların çoğu, bazı süreç ve olguları araştırmak için izleyici konsantrasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Sektörde, doğrudan sisteme radyoaktiviteyi uyaran yüklü parçacık veya nötron aktivasyon izlenmesi ile meydana getirilmesi ile başlamıştır. Tıpta kullanmak için teknik olarak radyofarmasötikler daha

sofistike olmuştur. Radyonüklitlerin başlıca kullanımı ilaç ya da nükleer tıp olarak bilinen haline gelmiştir.

1.6.1 Radyoizotopun tarihsel gelişimi

Radyoizotopların gelişimi ve kullanımının yaygınlaşması parçacık hızlandırıcılarının icadı ile başlamıştır. Parçacık hızlandırıcıları ve özellikle de siklotron 1935 yıllarında dünya savaşı sırasında keşfedilmiştir. Dünya savaşından sonra, hızlandırıcılar ve reaktörlerde radyoizotop üretmek için kullanılan atomların kullanımı yaygınlaşmıştır.

1950'lerde Amerikan mühendis Anger tarafından gama sintilasyonu icat edilmiştir. Kameraya önemli ilerlemeler getiren bu icat, nükleer tıp görüntülemeyi ve radyoizotopların kullanımı arttırmıştır. Gerçekleşen bu gelişmeler radyonüklitlerin tıbbi kullanımları, görüntüleme ve radyoterapi ikiye bölüme ayırdı. Görüntüleme ise tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi (SPECT) ve pozitron emisyon tomografisi (PET) olarak iki bölüme ayrılmıştır (L'Annunziata 2003).

IAEA, gelişmekte olan üye devletlere üretim, radyokimlik işleme, güvenli ulaşım ve radyoizotop teknolojileri uygulamaları için gerekli bilgileri sunmuştur. Radyoizotop üretim ve kalite kontrol gibi yayınlar ile 1971 yılında gelişmekte olan üye devletler tarafından radyoizotop kullanımı yaygın hale gelmiştir. 1998 yılında siklotronlarda üretilen ve revize edilmiş olan izotoplar listesini 2002 yılında yayınlanarak üye devletlere sunmuştur. Radyoizotop üretimini, 48 önemli reaktörle üretilen radyoizotop ve radyokimyasal izotop için kullanılan siklotronlar üzerine yayınlar 2003 yılında Manual yayını ile anlatmıştır.

Son 20 yılda izotoplar için yeni siklotronlar sürekli artmaktadır ve bunların çoğu tek bir izotop üretimi için veya izotopların küçük bir grubunu elde etmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bunların çoğunluğunda yedek kapasitesine sahip birçok başka yararlı izotop üretimi için gereken araştırmalar yapılmıştır. IAEA üyeleri, radyoizotop üretimi için sahip oldukları teknolojiyi kullanarak, izotopların farklı yönlerini kapsayan

raporların yayınlanması ve siklotronlar kullanarak radyoizotop üretimini arttırmıştır (Knoll 2012).

2004 yılında bir grup danışman reaktör ve üretilen izotoplar hakkında kılavuz eşdeğeri bir yayın yapmışlardır. İlgili makalede 49 izotop elde edilmiş ve tespit edilen 20'den fazla izotop gruplandırılarak, gerekli tüm bilgileri barındıran bir rapor hazırlanmıştır. Bu rapor, yarı-ömür ve nükleer bozulma özellikleriyle ilgili bilgileri de kapsamaktadır. Rapor, IAEA ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarı veri tabanında bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan izotoplar için, hedef ile ilgili ek veriler hazırlama, radyo kimyasal işleme, zenginleştirilmiş hedefleri ve radyo kimyasal özellikleri ile ilgili bilgiler de sunulmuştur (Knoll 2012).

1.6.2 Radyoizotop üretimi

Radyoizotoplar, nükleer reaktörlerde veya hızlandırıcılarda, yüklü parçacık uyarılması ile (p, d, ^3He ve α çekirdekleri) elde edilmektedir. Bir hızlandırıcı ile radyonüklitlerin üretimi için gerekli şartlar, parçacıkların ve ışınların iki spesifik özelliği ile tespit edilmektedir. Nükleer reaksiyonlar meydana getirmek için yeterli demet akımı ve ürünün dışında ışınların olması gerekmektedir (Das and Ferbel 2003).

Reaktörlerde genellikle enerji üretimi sırasında nükleer reaksiyonla fisyon ürünleri oluşur bunun yanında hedef malzemeler kaynak nötronları oluşturan nükleer reaksiyon ürünü nötronlarla bombardıman edilerek yeni nötron girişli nükleer reaksiyon oluşturulur. Nükleer reaktörlerde üretim, fisyon (bölünme), füzyon (birleşme), nötron yakalanması veya aktivasyonu ve transmutasyon yöntemleriyle radyoizotop üretilmektedir.

Tıpta kullanılan radyoizotopların bir kısmı üretim, taşıma ve depolama gibi bazı problemleri nedeniyle direkt üretimleri hızlandırıcılarda ya da reaktörlerde değildir, radyoizotop jeneratörleri ile üretilmektedir. Radyoizotop jeneratörleri az masraflı ve ana radyonüklit üretilerek sistem oluşturulmuştur. Bu sistemde oluşan yavru nüklit birkaç

defa kendini yenileyebilmektedir. Radyoizotop üretiminde kısa ömürlü radyoizotoplar için kullanılmaktadır.

Radyoizotopların hangi yöntem ile üretileceği gönderilen parçacık ve hedef ürün belirlemektedir.

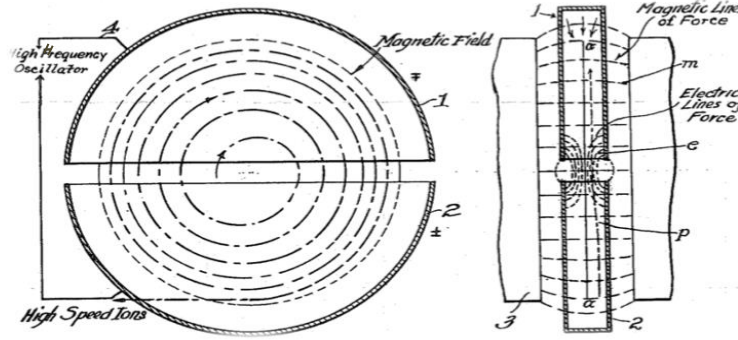
Radyoizotoplar günümüzde;

- Siklotron ürünleri;
Pozitron saçan izotoplar: C-11, N-13, O-15, F-18
Gama saçan izotoplar: Co-57, Ga-67, In-111, I-123, Tl-201
- Jeneratör ürünleri: Ga-68, Krirton 81m, Rn-82, Tc-99m, In-113m
- Nükleer reaktör ürünleri: Xe-133, Mo-99, I-131

Radyoizotoplar günümüzde daha çok pozitif ve negatif yüklü parçacık hızlandıran siklotronlar ile üretilmektedir. Radyoizotop üretiminde kullanılan tıbbi uygulamalara adanmış siklotronlar vardır. 1941 yılında St. Louis Washington Üniversitesinde fosfor, demir, arsenik ve kükürt üretilmiştir. Dünya Savaşı sırasında, bir Boston siklotronu ayrıca tıbbi radyonüklitlerin sabit bir kaynağı olarak üretilmiştir. 1950'li yıllarda Londra Hammersmith Hastanesine bir grup radyoizotop üreten bir siklotron yerleştirilmiştir ve yapılan çalışmalar sırasında 1960'larda meydana gelen sıcak atom kimyanın temelini atan pozitron yayıcılar ile etiketli organik bileşikler de sentezlenmiştir. 1966 yılında Ter-Pogossian ve Wagner tarafından ^{11}C kullanımı üzerinde durulan çalışma yayınlanmıştır. Radyonüklitler üzerine devam eden çalışmalar; nükleer tıp alanında ilerlemiş, parçacıkların mevcut türlerinin sayısı radyonüklit üretimine özelleşen ve değişen özelliklere sahip hızlandırıcılar, nükleer tıp için geliştirilmeye devam edilmiştir. Hızlandırıcılar zamanla pozitif ve negatif iyon siklotron olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmışlardır. Hızlandırıcı ve parçacık fiziği üzerine oluşan gelişmeler neticesinde ilerleme, süperiletken mıknatıs siklotronlar, tandem kademeli hızlandırıcıları ve düşük enerji elektron ışın demet hızlandırıcıların geliştirilmesini sağlamıştır (Rachel *et al.* 2008).

Siklotron tipi hızlandırıcılarda p, d, t, α gibi yüklü parçacıklar bir demet haline getirildikten sonra, taşıyıcı demet hattı vasıtasıyla bir hedef malzeme üzerine gönderilir. Hedef malzeme atomları ile etkileşen hızlandırılmış iyonlar enerjilerini hedef atomuna aktarırlar. Böylece kararlı durumdaki hedef atomu çekirdekleri uyarılarak radyoizotoplar elde edilir.

Siklotronun iç yapısında (Şekil 1.11), iyon odası, iyonlarının üretmek için bir kaynak, bunları hızlandırmak için bir hızlandırma odası, dairesel bir yol üzerinde iyonları içeren bir mıknatıs vardır. Temel özellikleri aynı olan siklotronlar, işlevlerine bağlı olarak çeşitli boyutlarda getirilmiştir (Leo 1994)



Şekil 1.11 Siklotron hızlandırıcısının şematik gösterimi

1.6.3 Radyoizotopların kullanım alanları

Nükleer fiziğin en yaygın uygulaması, nükleer radyasyonun ölçülebilir olması sayesinde yüksek duyarlılıkta radyoaktif izlemedir. Çok küçük miktarlarda radyoaktif çekirdek; izlenilebilen radyoaktif olmayan maddelere eklenerek, maddenin karmaşık bir sistem içerisinde farklı bölgelerinde görüldükçe izledikleri yol ile radyoaktivite ölçülerek takip edilmektedir. Uygun bir radyoaktif izotopun seçildiği radyoaktif izleme yöntemi kimyasal yöntemlere göre büyük avantaj sağlamaktadır. Kimyasal yöntemler, genelde atom numarası büyük bazı atomlar kullanır ve büyük atomların bozulmaları daha kolay olduğundan bu daha zararlıdır. İzleme; tıp, kimya, mühendislik, ziraat, meteoroloji, zirai, zooloji, jeoloji ve kronoloji gibi çok çeşitli alanlarda araştırma amacıyla kullanılmaktadır. İzlemenin en eski uygulaması olan nükleer tıpta, fizyolojik

fonksiyonların çok az etkilendiği 500 inceleme ile önemli bir başarıya imza atılmıştır (Martin 2013).

Doğrudan radyoaktif izotop verilerek bir hastanın ne kadar radyasyon alacağı, iyot izotopunun insan vücuduna verilmesi ile tiroitte oluşan radyasyonun doz hesabı belirlenmiştir. Bu çalışma, radyoaktif izlemenin tıpta gelişmiş bir ölçme aracı olmasına öncülük etmiştir. Radyoaktif kaynak ve ışınların beraber kullanımı, materyallerin boyunu ve özelliklerini ölçmek ve değerlendirmek için bir yöntemdir. Nükleer radyasyon madde ile etkileştiğinde yavaşlar ve zayıflar. Parçacığın veya ışınının zayıflama miktarı, metalin içinden geçerken kaybettiği enerji miktarı ile ilişkilidir ve zayıflama miktarı ölçülerek materyalin kalınlığı belirlenmektedir. Geçilen materyal boyutu, radyasyonun bilinen etkileşimleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Alternatif olarak, kalınlıkları bilinen metalin içindeki etkiler ölçülerek sistem kalibre edilebilir. Kalınlıklar, kağıdın üzerindeki mürekkep veya kalın kömür tabakası aralığına kadar ölçülebilmektedir (Lilley 2018).

Radyasyon, malzemelerin yapısını ve özelliklerini değiştirebilir. Bundan yararlanılarak endüstride ürün maliyetinin azaltıldığı ve ürünlerin kalitesini iyileştirmekte radyasyon uygulamaları kullanılmaktadır. Günümüzde radyasyonun uygulama alanları; bilgisayar diskleri, araç lastikleri, kablolar ve plastikten sıcak su boruları gibi geniş bir alana sahiptir. Malzemeler, elektron veya gama ışını ile düşük enerji altında tutulmaktadır. Bunun sonucunda malzemelerin molekül bağları kopmakta veya yeni kimyasal bağlar oluşmaktadır. Küçük hızlandırıcılarla ince filmlere birkaç saniyelik ışımlarla uygulanan 750 keV'lik elektron demetleri, kaplama veya polimer bağ oluşumu için yeterlidir. Bu uygulamanın avantajı, ısı ile onarımdan daha az zarar vermesi ve hızlı bir şekilde gerçekleşmesidir. Böylece kaplama için süre azalırken verimlilik de artmaktadır. Radyasyon benzer olarak metal, kağıt veya plastik üzerindeki mürekkep veya özel kaplamaları düzeltmek için kullanılmaktadır (Lilley 2018).

Günümüzde, radyasyonun kullanım alanlarından biri de sterilizasyon işlemidir. Radyasyon uygulayarak deri altı iğneler, lastik eldivenler ve cerrahi paketlerin, pansumanlar, ameliyat dikiş iplikleri ve diğer medikal ürünlerin sterilizasyonu

yapılabilmektedir. Sterilizasyon spesifik bir uygulama değildir, kısaca, taşıyıcı bir bant üzerine yerleştirilmiş olan yalıtılmış paketler, istenilen bir sterilizasyon derecesine ulaşacak şekilde ayarlanmış bir hızda elektron demetine maruz bırakılarak taşınmaktadır. Bu işlem sırasında soğrulma enerjisi, sıcaklığı 10°C'den fazla arttırmaktadır. Yüklü parçacıklar, özellikle nötronlar, radyoaktif ürün oluşturan nükleer reaksiyonlara sebep olabilir bu nedenle ışınlanan malzemelerin radyoaktif olmamasına dikkat edilmelidir. Bu sebeple sterilizasyonda düşük enerjili elektronlar ve gama ışınları kullanılmaktadır (Lilley 2018).

Hücre bölünmesini engelleyen radyasyon, filizlenmeyi engelleyerek bakteri ve mikroorganizmaların sayısını azaltarak, böcekleri ve larvalarını öldürerek çok çeşitli gıda ürününün raf ömrünü büyük ölçüde uzatabilmektedir. Radyasyon yolu ile enzim aktivitelerinin yavaşlaması meyve ve sebzelerin büyüme ve olgunlaşmasını geciktirmektedir. Işınlama; konserve, derin dondurucu, tütüleme gibi geleneksel gıda işleme süreçlerine, kimyasal koruyuculara ve böcek ilaçlarına etkili bir alternatiftir. Bu uygulama tehlikeli değildir. Ancak pek çok ülkede gıdaların ışınlanması ile ilgili uygulamaların önündeki engel tüketicilerin kaygı ve endişesidir (Lilley 2018).

1.6.4 Radyoizotopun nükleer tıpta kullanımı

Nükleer aletlerdeki gelişmeler medikal alandaki gelişmelere paralel olarak ilerlemiştir. Bu çalışmalara özellikle, kanser ve girişimsel olmayan (inventör) görüntülemeye çalışan bilim adamları tarafından öncülük edilmiştir. Reaktörler ve hızlandırıcılar kullanılarak üretilen radyoizotoplar, bileşiklere ve farmasötik maddelere bağlanırlar ve kalpteki kan akışını, böbreklerin renal atımının ve son olarak tiroit aktivitesinin fonksiyon görüntüsünü elde etmek için izleyici olarak kullanılır. İlk X ışını görüntüleri film veya ekran üzerinde iz düşüm görüntüleri idi, fakat bilgisayarlı tomografideki (CT) gelişmeler ve bilgisayar kullanımı ile vücudun herhangi bir kısmının iki veya üç boyutlu detaylı görüntülerinin elde edilmesi mümkün kılınmıştır. Pozitron yayıcı radyonüklitlerin ve CT kombinasyonunun kullanımı (PET) görüntüleme tekniklerinin gelişmesini sağlamıştır. Vücudun detaylı bir görüntüsünü oluşturmak için kullanılan diğer önemli bir metot, manyetik rezonans görüntüleme (MRI), bir dış manyetik

alanında nükleer manyetik momentlerden dolayı vücudun manyetik düzeyindeki değişimleri tespit etmektedir. PET ve MRI'nın her ikisi de fonksiyonel davranışların yeteri kadar hızlı görüntülenmesi ve dinamik işlevlerin gerçek zamanlı kayıt edebilmesi için geliştirilmiştir. Kanserin radyasyon kullanılarak tedavi edilmesinde, yıllardır çeşitli enerjilerdeki fotonlar kullanılmaktadır. En son gelişmelerden bazıları yüklü parçacık demetleri kullanılarak olmuştur ve nötronları kullanan yeni metotların potansiyel avantajları da araştırılmaktadır (Lilley 2018).

Medikal çalışmalarda X ışını radyografisi genellikle iskelet sistemindeki detayları ortaya çıkarmak için çok iyi bir yöntemdir. Yumuşak dokular arasındaki farkları ortaya çıkarmak için çok iyi değildir. Özellikle kemik kütlesi tarafından saklanan ve korunan kafatası içerisindeki beyin tümörlerine benzer tümörlerin tanınmasında başarılı değildir. Bu tür tümörlerde daha fazla ve detaylı görüntüler dokunun ya da organın kendisi tarafından üretilen radyasyonun dedeksiyonu ile elde edilebilir. Radyoaktif bir izotop vücuda verildiğinde, vücuttaki dağılımı onun nasıl verildiğine, alınma formuna ve vücudun ona nasıl tepki vereceğini bağlıdır. Bu yöntem; lokal olarak yerleşmiş küçük boyutlu ölçümler için uygun olmasına rağmen geniş bölgelerin görüntülenmesi için uygun değildir. Bu geniş bölgeler için, eş zamanlı 2 boyutlu görüntüler oluşturmak üzere, özel bir geniş alan dedektörler düzeneği veya gama kameralar geliştirilmiştir (Lilley 2018).

Dünyadaki gelişmelerin izlenmekte olduğu ülkemizde, teşhis ve tedavi amaçlı yüksek kalitede hizmet verilen 272 Nükleer Tıp Merkezi faaliyet göstermektedir. Her geçen gün sayılarının arttığı bu merkezlerde toplam 350 civarında SPECT ve gama kamera ile 33 adet PET görüntüleme sistemi mevcuttur. Cihazlarda kullanılan radyoizotopların tümünün ithalat yoluyla temin edilmesinden ve radyoizotopun yarı ömrünün kısa olması dolayı bu hizmetin verilmesinde gecikmeler ya da hizmetin verilememesi durumları mevcuttur. Bu durum, tanı ve tedavi süreçlerinde çok önemli yer tutması sebebi ile insan sağlığı yönünden önemli sıkıntılara neden olmaktadır. İthal edilen radyoizotop miktarı yılda 40000 adetın üzerindedir. İzotop için radyasyon güvenliği yönünden uygulanması gerekli ithalat prosedürleri önemli ölçüde bir iş yükü getirmektedir. İthal edilen radyoizotopların maliyeti çok yüksektir ve yarı ömrü kısa olan izotopların ithal

edilememesi nedeniyle verilemeyen sağlık hizmetlerinin parasal bedelinin tayini ise mümkün değildir. Yaşamsal öneme sahip bu hizmetlerin sunumunda yaşanan sıkıntıların çözülmesi ancak kullanılacak radyoizotopların ülkemizde üretimini gerçekleştirmekle çözülecektir. Bunun için ise orta enerjili, siklotron tipi bir hızlandırıcının kurulması gereklidir (Lilley 2018).

2. TEZ ÇALIŞMASININ AMACI ve LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Tez Çalışmasının Amacı

Bu tez çalışmasında, Talys 1.8 nükleer reaksiyon kodu kullanılarak alfa gelişli uyarılma fonksiyonlarının oluşturduğu farklı reaksiyonlarla ^{57}Co radyoizotopunun elde edilmesi incelendi. Bu reaksiyonlar, $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)$, $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)$, $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n+p)$, $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n+\alpha)$, $^{59}\text{Co}(\alpha, x)$, $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)$ 'dir. Talys simülasyon programı ile yapılan çalışmada deneysel verilerle karşılaştırarak uyumluluğun araştırılmıştır.

Radyoizotoplar; sağlık, endüstri ve güvenlik sistemlerinin uygulamalarının gelişmesinde önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Küresel olarak, radyoizotopların tıbbi kullanım sayısı ve alanı gün geçtikçe artmaktadır ve bu işlemler günümüzde bir gereklilik haline gelmiştir. Ayrıca çeşitli sektörlerde radyoizotoplara olan göreceli önem değişmektedir. Talys 1.8 kodu kullanılarak $(\alpha, *)$ reaksiyonu ile özellikle nükleer tıp uygulamalarında önemli yer tutan ^{57}Co radyoizotopunun üretimi için yapılan teorik çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılarak, reaksiyon tesir kesitinin gözlemlenmesi ve veriler arası uyumun gösterilmesi amaçlanmıştır. Uyumun gözlenmesiyle, deneysel verileri olmayan ve yüksek maliyetler sebebi ile kontrol edilemeyen bölgelerde kullanılarak literatüre veri kazandırmayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda ^{57}Co izotopu üretimi için alfa gelişli reaksiyonlarda, hangi elementten daha verimli ve düşük enerji kullanılarak elde edilmesi, maliyeti düşük hale getirilebilmek için bunun analizini yapmaktır.

2.2 Literatür İncelemesi

Nükleer reaksiyonların veri değerlendirmesinde bazı sistematik adımlar bulunmaktadır. Bunlar, bibliyografik derleme ve deneysel veri derleme aşamalarıdır. Bu adımlar, teorik nükleer modelleme tabanında değerlendirilmeli ve birlikte takip edilmelidir.

Çalışmada ($\alpha, *$) reaksiyonları ile değişik hedef çekirdekler kullanılarak elde edilen ^{57}Co radyoizotopunun deneysel olarak ilk çalışmayı 1960 yılında S.Tanaka, ^{55}Mn , ^{54}Fe , ^{56}Fe ve ^{58}Ni izotoplarına alfa parçacığı göndererek reaksiyon oluşturmuştur (Tanaka 1960). Bu çalışmada kullanılan reaksiyonlardan, $^{58}\text{Ni}(\alpha, p + \alpha)$ incelenmesi, 1961 yılında Houck ve 1964 yılında da Blann tarafından yapılmıştır (Houck 1961, Blann 1964). $^{59}\text{Co}(\alpha, x)$ reaksiyonunun incelenmesi, 1977 yılında Homma ile başlamış ve son olarak 1998’de Mukherjee tarafından yapılmıştır (Homma 1977, Mukherjee 1998). $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n + \alpha)$ reaksiyonunun incelenmesi, 1962’de Sterns, 1972’de Zhukova ve 2004’de ise Ansari tarafından yapılmıştır (Sterns 1962, Zhukova 1972, Ansari 2004). $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)$ reaksiyonunun incelenmesi, 1960 yılında Tanaka ile başlamış ve son olarak 1991’de Levkovski tarafından yapılmıştır (Tanaka 1960, Levkovski 1991). $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n + p)$ reaksiyonunun incelenmesi, 1960’da Tanaka, 1962’de Iwata ve 1965’de ise Ewart tarafından yapılmıştır (Tanaka 1960, Iwata 1962, Ewart 1965). $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)$ reaksiyonunun incelenmesi ise 1960 yılında Tanaka ile başlamış ve son olarak 1994’de Sudar tarafından yapılmıştır (Tanaka 1960, Sudar 1994). Çalışmada, alfanın enerjisine göre ^{57}Co izotopunu reaksiyon tesir kesiti incelenmiştir.

Bu veriler, EXFOR kütüphanesinde derlenmiş ve uluslararası olarak bilgisayarla işlenmektedir. Veri derleme ve işleme süreci henüz tamamlanmamış ve yapılan çalışmalar ışığında derlemeler devam etmektedir. Literatür olarak EXFOR dışında ENDF, JENDL, OECD, JEFF, TENDL vb. pek çok bilgisayar tabanlı kütüphane bulunmaktadır (İnt. Kyn. 7, İnt. Kyn. 8, İnt. Kyn. 9, İnt. Kyn. 10, İnt. Kyn. 11). Bunlardan EXFOR, OECD vb. kütüphaneler, hem deneysel veri hem de kendi bünyelerinde teorik hesaplanmış verileri depolayan diğer kütüphanelerin bağlantılarını da bulundurmaktadır (İnt. Kyn. 7, İnt. Kyn. 10). JENDL, ENDF, TENDL gibi kütüphaneler sadece teorik olarak hesaplanmış sonuçları bulundurmaktadır (İnt. Kyn. 8,

İnt. Kyn. 9, İnt. Kyn. 12). JENDL, JEFF, ENDF kütüphanelerinin, sürümleri mevcuttur (JENDL 3.2, JENDL 4.0, JEFF 3.1/A, JEFF 3.1/RDD, ENDF B/VI, ENDF B/VII vb.). Bunlar arasında özellikle TENDL kütüphanesi, Talys nükleer reaksiyon kod programının teorik hesaplamalarının depolandığı lokal bir kütüphanedir ve 2008 itibari ile hesaplanan veriler mevcuttur.

Nükleer reaksiyon verilerinin güncelliği ele alındığında deneysel veriler alanında en sık kullanılan ve sürekli güncelleme çalışmaları yapılan EXFOR ve benzer olarak teorik hesaplama verileri alanında da ENDF sürümleri öne çıkmaktadır. Elde edilen verilerin depolandığı bu kütüphaneler dışında çekirdeklere göre hesaplanmamış reaksiyonları da bünyesinde barındıran XUNDL kütüphanesi de mevcuttur. (İnt. Kyn. 5). EXFOR (McLane 1997), dünya çapındaki Nükleer Reaksiyon Veri Merkezleri tarafından sürdürülen deneysel nükleer reaksiyon verisinin bilgisayarla işlenmiş kütüphanesidir. Nükleer Reaksiyon Veri Merkezlerinden kullanıcılara kadar, ağ üyeleri arasında genel olarak okunabilir bilgisayar formatında aktarıma imkan verir. Kaynakça bilgisi ve açıklamalar ile birlikte, nükleer reaksiyon veri tablolarında büyük bir sayısal çeşitlilik için tasarlanmıştır. ^2H 'den ^{237}Np 'ye kütle numarası bölgesindeki çekirdeklerde reaksiyon tesir kesitleri için 1500'e yakın veri dizisi mevcuttur (IAEA 2000).

3. MATERYAL ve METOT

Bilgisayar kod sistemleri (TALYS, ALICE, GNASH, EMPIRE vb.) bağlamında nükleer reaksiyonlar değerlendirildiğinde, hedef çekirdek üzerine gelen bir parçacığın birden çok reaksiyona yol açması mümkündür. Bu durum, doğrudan ya da bileşik çekirdek reaksiyonları (süreçleri) gibi kompleks reaksiyon mekanizmaları tarafından açıklanmıştır.

Yüklü parçacıklarla oluşturulan uyarılma reaksiyonları; nükleer modellerin test edilmesi ve özellikle radyoizotopların siklotronlarla üretiminde, pratik uygulamalar için büyük öneme sahiptir. Özellikle çeşitli yüklü parçacıklar (protonlar, döteryum vb.) tarafından indüklenen ancak aynı ürün çekirdeklerine neden olan net reaksiyonlar üzerinde yapılan araştırmalar vardır. Bu şekilde nükleer yapı etkilerinin rolü azalır ve giriş nükleer model parametrelerinin etkisi araştırılır. Reaksiyon eşik değerlerine yakın olan çeşitli uyarma fonksiyonlarının bilgisi, küçük siklotronlardaki üretim işlemlerinin optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte asıl amaç; nükleer model ve tesir kesiti hesaplamalarının belirli enerji aralığında uygulanabilirliğini test etmektir.

Bu bölümde, çalışmada kullanılan nükleer reaksiyon fonksiyonları Talys 1.8 kod programı bünyesinde çalıştırıldı ve elde edilen sonuçlar grafikleştirildi. Grafiklerde merkezlerden alınan deneysel verilerin, çalışmada elde edilen teorik hesaplama sonuçlarıyla uyumu incelendi. Talys1.8 de kullanılan reaksiyonlarının tesir kesiti analiz tablo halinde (Tablo 1) sunuldu. Çalışmada hesaplanan sonuçlara göre kullanılan reaksiyonların hangilerinin öne çıktığı incelendi.

3.1 Teorik Hesaplama

Çalışmada alfa uyarılması ile $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)$, $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)$, $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,x)$, $^{58}\text{Ni}(\alpha,p+\alpha)$ reaksiyonlarıyla ^{57}Co radyoizotopunun üretilmesi incelendi. ^{57}Co radyoizotop üretimi için $(\alpha,*)$ reaksiyonları ile Talys 1.8 kodu kullanılarak teorik çalışması yapıldı. Bulgular literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılarak, reaksiyon tesir kesitinin gözlemlenmesi ve uyumun durumunun incelenmesi amaçlanmıştır.

3.2 Talys Kodu

Talys, Linux işletim sisteminde çalışan ve fortran programlama diline sahip, nükleer reaksiyonların analizi ve tahmini için oluşturulmuş bir bilgisayar kod programıdır. Simülasyon reaksiyonlarda, nötron, proton, döteryum, trityum, 3-He, α parçacıkları ve γ ışınımları 1 keV–1 GeV enerji bölgesinde çalışılabilir. Hedef çekirdek kütleleri için 12 veya daha ağır kütleli olması şarttır. Çalışmada kullanılan Talys 1.8 sürümü ise $5 < A \leq 339$ durumuna geliştirilmiştir. Nükleer model ve süreçlerin veri tabanı ile kombinasyonlarda, optik model, birleşik çekirdek istatistiksel teori, doğrudan reaksiyonlar (elastik ve elastik olmayan saçılmalar) ve denge öncesi süreçler teorik analiz tabanında yapılabilmektedir (Koning and Duijvestijn 2015).

Talys'in birbirine bağlı olan iki ana amacı bulunmaktadır. İlki, nükleer reaksiyon deneylerinin analizi için kullanılabilecek bir nükleer fizik aracıdır. Deney ve teori arasındaki etkileşim, parçacıklar ve çekirdekler arasındaki temel etkileşime dair bize fikir verir ve kesin ölçümleri modellerimizi, sınırlamamızı sağlamaktadır. Buna karşılık, ortaya çıkan nükleer modellerin yeterli tahmin gücüne sahip olduğuna inanıldığında, ölçümlerin güvenilirliğinin bir göstergesi olmaktadır (Koning and Duijvestijn 2015).

Nükleer fizik aşamasından sonra, Talys ikinci işlevi olan nükleer bir veri aracı olarak kullanılmasıdır. Varsayılan mod da hiçbir ölçüm yapılamadığında ya da mevcut deneysel verileri kullanarak çeşitli reaksiyon modellerinin ayarlanabilir parametrelerinin ince ayarını yaptıktan sonra Talys, rezonans bölgesinin ötesinde, kullanıcı tanımlı bir enerji ve açı bağımlığı üzerindeki tüm açık reaksiyon kanalları için nükleer veri üretebilir. Bu hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla oluşturulan nükleer veri kütüphaneleri, mevcut ve yeni nükleer teknolojiler için temel bilgiler sunmaktadır. Talys gibi nükleer reaksiyon simülasyonu kodları tarafından üretilen verilere doğrudan veya dolaylı olarak, geleneksel ve yenilikçi nükleer güç reaktörleri, radyoaktif atıkların transformasyonu, füzyon reaktörleri, hızlandırıcı uygulamaları, yurt güvenliği, tıbbi izotop üretimi, radyoterapi, mikro işlemcilerde, petrol kuyusu açma, jeofizik ve astrofizik kullanılmaktadır (Koning and Duijvestijn 2015).

Talys çıktı dosyalarında,

- Esnek, esnek olmayan ve toplam tesir kesiti,
- Elastik saçılma açısal dağılımlar,
- Kesikli seviyelerde açısal dağılımlar,
- İzomerik ve taban durum tesir kesiti,
- Toplam parçacık (n,xn), (n,xp) vb. enerji ve çift katlı diferansiyel tesir kesitleri,
- Tekli ya da Çoklu emisyon tesir kesitleri,
- Ürün çekirdeklerin oluşum tesir kesiti sonuçları

elde edilebilir (Koning and Duijvestijn 2015).

Talys'de tüm açık kanallar için reaksiyon tesir kesitleri hesaplanır. Bunları elde etmek için ihtiyaç duyulan özel nükleer modellerle açıklanmıştır. Bu nedenle, daha temel niceliklerin kesit değerleri tanımını veremeyiz. Aksi belirtilmediği sürece, nötronları örnek olarak kullanır.

3.2.1 Talys1.8 bilgisayar kod programında reaksiyon tesir kesiti

En temel nükleer reaksiyon hesaplaması optik model ile yapılmaktadır. Talys programında, Optik modelde, nötr elementler için σ_r reaksiyon kesitini ve elastik saçılmanın toplam tesir kesit σ_t vermektedir. Bu şu şekilde ifade edebiliriz;

$$\sigma_t = \sigma_{\text{shape-el}} + \sigma_r \quad (3.1)$$

Reaksiyon elastik saçılımın yanı sıra, bileşik nükleer bozunumu ile beslenirse, son bileşen reaksiyon kesitinin bir parçası bileşik elastik kesiti $\sigma_{\text{comp-el}}$ olarak tanımlanmaktadır. Toplam elastik tesir kesiti σ_{el} ;

$$\sigma_{\text{el}} = \sigma_{\text{shape-el}} + \sigma_{\text{comp-el}} \quad (3.2)$$

Ve elastik olmayan tesir kesiti $\sigma_{\text{non-el}}$;

$$\sigma_{\text{non-el}} = \sigma_r + \sigma_{\text{comp-el}} \quad (3.3)$$

Olarak tanımlanır. Denklemleri birleştirebiliriz;

$$\sigma_t = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{non-el}} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4), bir deneyde gerçekten ölçülebilen miktarları içermektedir. Ayrıca birçok bileşik çekirdek bozulma kanalı arasındaki rekabetin, $\sigma_{\text{comp-el}}$ 'in birkaç MeV üzerindeki çarpışmalarda nötron enerjileri için hızla azalmasını sağladığı ve bu durumda $\sigma_{\text{non-el}}$ 'in pratik olarak σ_r 'ye eşit olduğu görülmektedir.

3.3 Çalışılan Kısımın Seçimi

Talys'ın birbirine bağlı olan amaçları, nükleer reaksiyon deneylerinin analizi ve nükleer bir veri aracı olarak kullanılmasıdır. Bunların deneysel değerleri olmayan reaksiyonlar için ve teorik hesaplamalarla deneysel değerlere destek verilmesi açısından oldukça önemlidir. Bununla birlikte, ortaya çıkan nükleer modellerin yeterli tahmin gücüne sahip olduğuna inanıldığında, ölçümlerin güvenilirliğinin bir göstergesi olmaktadır. Bu hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla oluşturulan nükleer veri kütüphaneleri, mevcut ve yeni nükleer teknolojiler için temel bilgileri de bize sunmaktadır. Bu nedenle yaptığımız teorik çalışmaların önemi artmaktadır.

Bu çalışmamızda tesir kesiti hesaplamasında kullanılan parametrelerin dahil olduğu modeller ve süreçler üzerinde durulurdu. Bu tanımlama ve açıklamalarda aydınlatıcı olması açısından, çalışmanın yapıldığı Talys 1.8 nükleer reaksiyon kod programına dair reaksiyon mekanizmaları şematığı Ek-1 olarak sunuldu.

⁵⁷Co radyoizotopu B12 vitamini eksikliği için Schilling'in testinde kullanılmaktadır. Gastrointestinal B12 vitamini emilim tayini, nükleer tıp laboratuvarları tarafından kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı kütlelere sahip ($25 \leq A \leq 28$) bazı çekirdeklerin ⁵⁷Co radyoizotopun elde edilmesi için ($\alpha, *$) reaksiyon fonksiyonlarının tesir kesitleri

incelemesi Talys programı ile yapıldı. Etkisinin gözlenmesi için $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)$, $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)$, $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n+p)$, $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n+\alpha)$, $^{59}\text{Co}(\alpha, x)$, $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)$ seçilmiş reaksiyonların tesir kesitinin geniş bir enerji aralığında sistematik olarak incelemesi için uygun görüldü. Bu çalışmada deneysel verilerin çeşitliliği, teorik hesaplamaların mevcut olmaması, geniş bir enerji aralığında çalışmalara sahip olması, bu kütle ve enerji bölgesinin seçiminde önemli etkenlerdir.

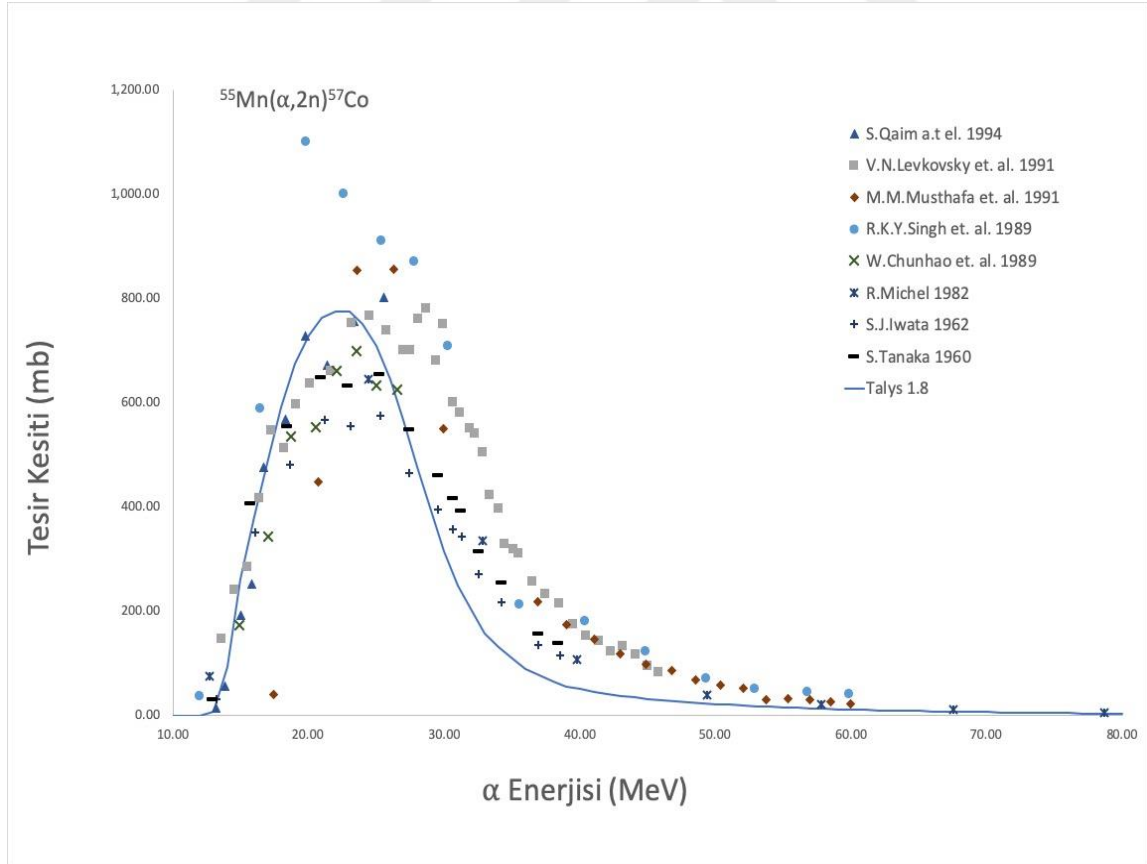


4. TEORİK HESAPLAMALAR

Bu çalışmada; $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)$, $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)$, $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,x)$, $^{58}\text{Ni}(\alpha,p+\alpha)$ reaksiyonları için Talys 1.8 programı kullanılarak hesaplanan reaksiyon tesir kesitleri ile ^{57}Co radyoizotop üretim reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonları incelenmiştir. Hesaplama sonucu elde edilen veriler, Exfor kütüphanesinde mevcut olan deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Grafik 4.1-4.6'da verilmiştir.

4.1 $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

^{55}Mn hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 10-80 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodları kullanılarak hesaplanan $(\alpha,2n)$ reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden (İnt. Kyn. 7) alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Grafik 4.1'de gösterilmiştir.

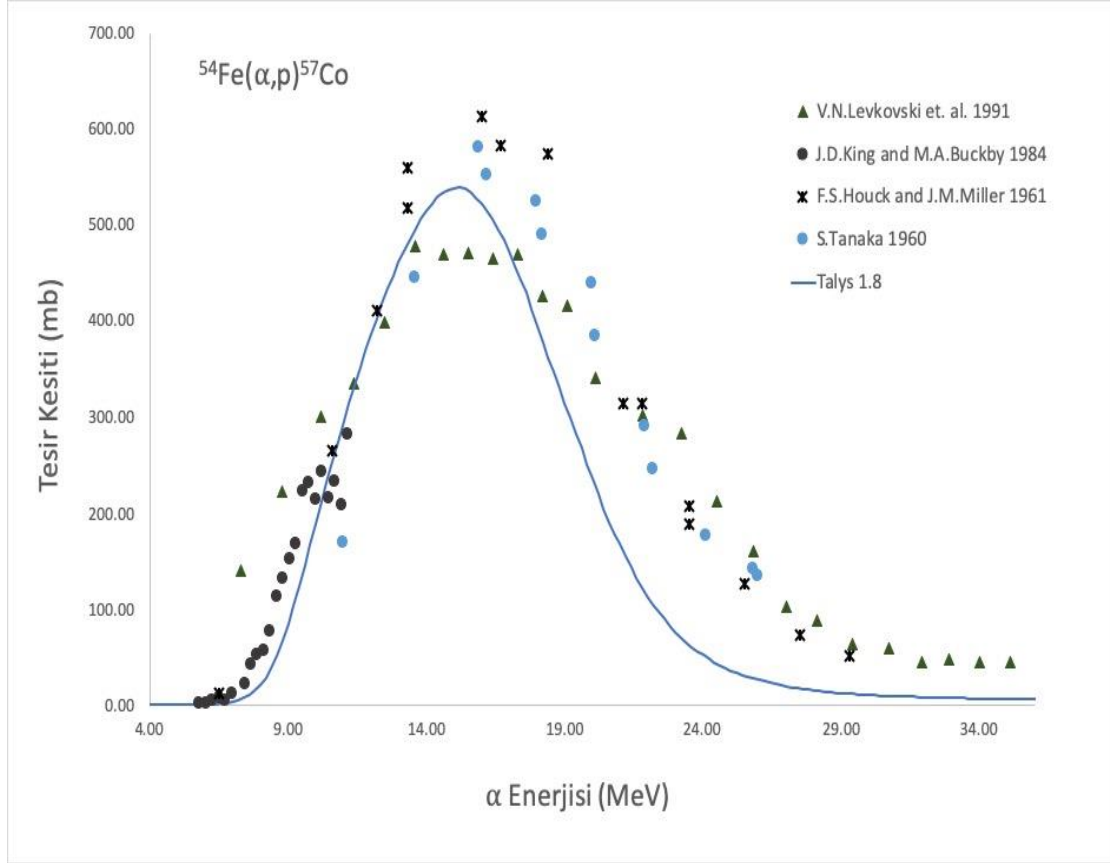


Grafik 4.1 ^{55}Mn hedef çekirdeği için $(\alpha,2n)$ reaksiyon tesir kesiti.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 13 MeV’de başladığı ve yaklaşık 24 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 20 MeV’e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının Qaim vd. (1994), Levkovsky vd. (1991), Chunhao vd. (1989), Iwata (1962) ve Tanaka (1960) tarafından rapor edilmiş bulunan deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Singh vd. (1989) tarafından elde edilmiş olan deneysel veriler hariç, burada değerlendirme amaçlı kullanılan deneysel sonuçların reaksiyon tesir kesiti değerlerinin 25 MeV ile 30 MeV arasında maksimuma ulaştığı görülmektedir. Michel (1982) tarafından rapor edilmiş olan deneysel verilerin yaklaşık olarak belirtilen bu aralıkta başlarken, Musthafa vd. (1991) tarafından ortaya konulmuş deneysel sonuçların özellikle reaksiyonun başladığı ve reaksiyon olasılığın maksimuma ulaştığı enerji aralığında hem teorik olarak hesaplanan hem de deneysel olarak rapor edilmiş olan sonuçlara göre yaklaşık 5 MeV’lik bir kayma olduğu görülmektedir. Reaksiyon olasılığının maksimum olduğu noktadan sonrasında ise 60 MeV’e kadar olan enerji aralığında teorik hesaplamalardan ve deneysel sonuçlardan elde edilen grafiklerin eğilimi uyum içindedir. Teorik sonuçlarla deneysel veriler arasında uyumu biçim olarak yakalanmıştır.

4.2 $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

^{54}Fe hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 4-36 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodları kullanılarak hesaplanan (α, p) reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden (İnt. Kyn. 7) alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Grafik 4.2’de gösterilmiştir.



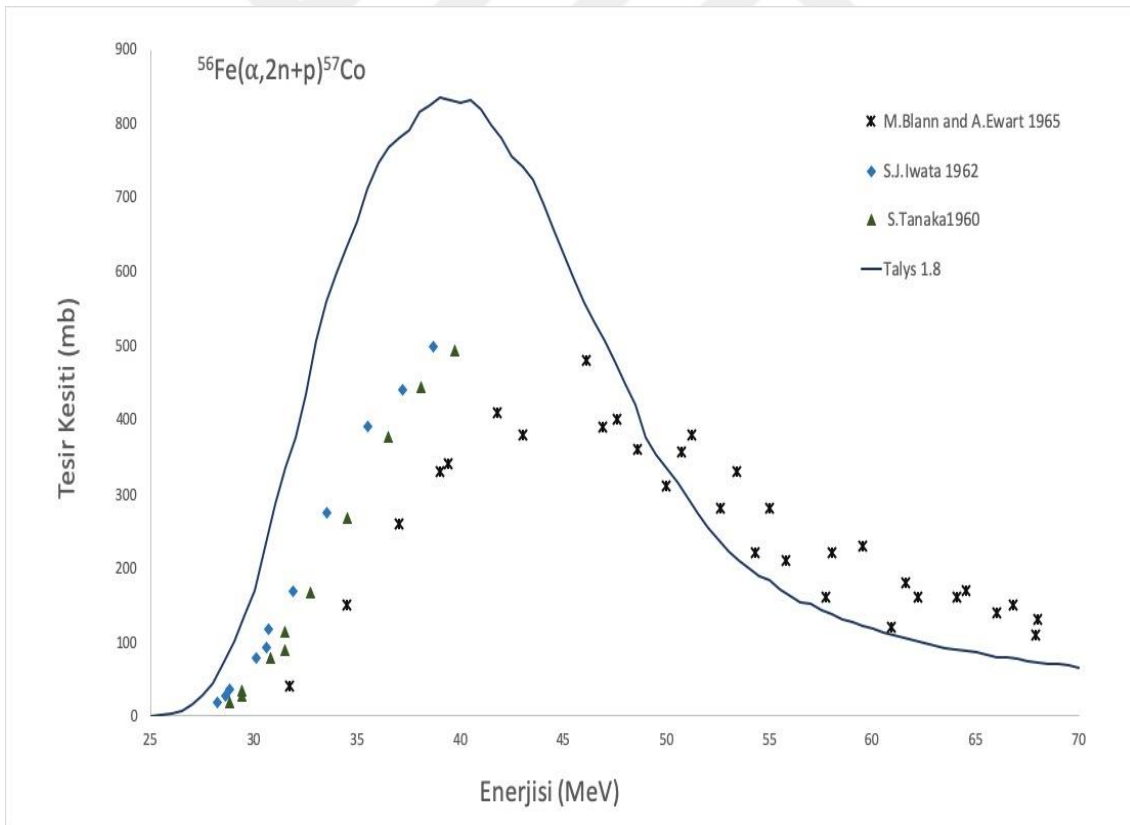
Grafik 4.2 ^{54}Fe hedef çekirdeği için (α, p) reaksiyon tesir kesiti.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 4.4 MeV’de başladığı ve yaklaşık 15,2 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar ile Levkovski (1991)’nin tarafından rapor edilmiş olan deneysel veriler 11,40 MeV, 11,60 MeV ve 17,30 MeV’lerde ve King (1984)’nin tarafından rapor edilmiş olan deneysel veriler ile 6,75 MeV’de ve Houck (1961)’nin tarafından rapor edilmiş olan deneysel verilerin ise 12,20 MeV’de çakıştığı görülmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, 5–18 MeV enerji bölgesinde rapor edilmiş deneysel verilerle neredeyse çakışık olduğu gözlemlenmiştir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 12,5 MeV’e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının Levkovsky vd. (1991), King ve Buckby (1984) ve Hunck ve Miller (1961) tarafından rapor edilmiş bulunan deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Tanaka (1960) tarafından rapor edilmiş verilerin teorik verilerle uyumu sadece biçim olarak yakalanmıştır. Değerlendirme amaçlı kullanılan deneysel sonuçların reaksiyon tesir kesiti değerlerinin 13 MeV ile 17

MeV arasında maksimuma ulaştığı çalışmada ise 16 MeV olduğu görülmektedir. Olasılığının maksimum olduğu 15,2 MeV'e kadar olan enerji aralığında teorik hesaplamalardan ve deneysel sonuçlardan elde edilen grafiklerin eğilimi uyum içindedir. 16 MeV'den sonra uyumlu bir eğri zlenmesi rağmen tesir kesitlerinde bir kayma vardır. Teorik alışma ile tarafından rapor edilmiş veriler arasında uyumu biçim olarak yakalanmıştır.

4.3 $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

^{56}Fe hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 25-70 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodları kullanılarak hesaplanan $(\alpha,2n+p)$ reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden (İnt. Kyn. 7) alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Grafik 4.3'de gösterilmiştir.

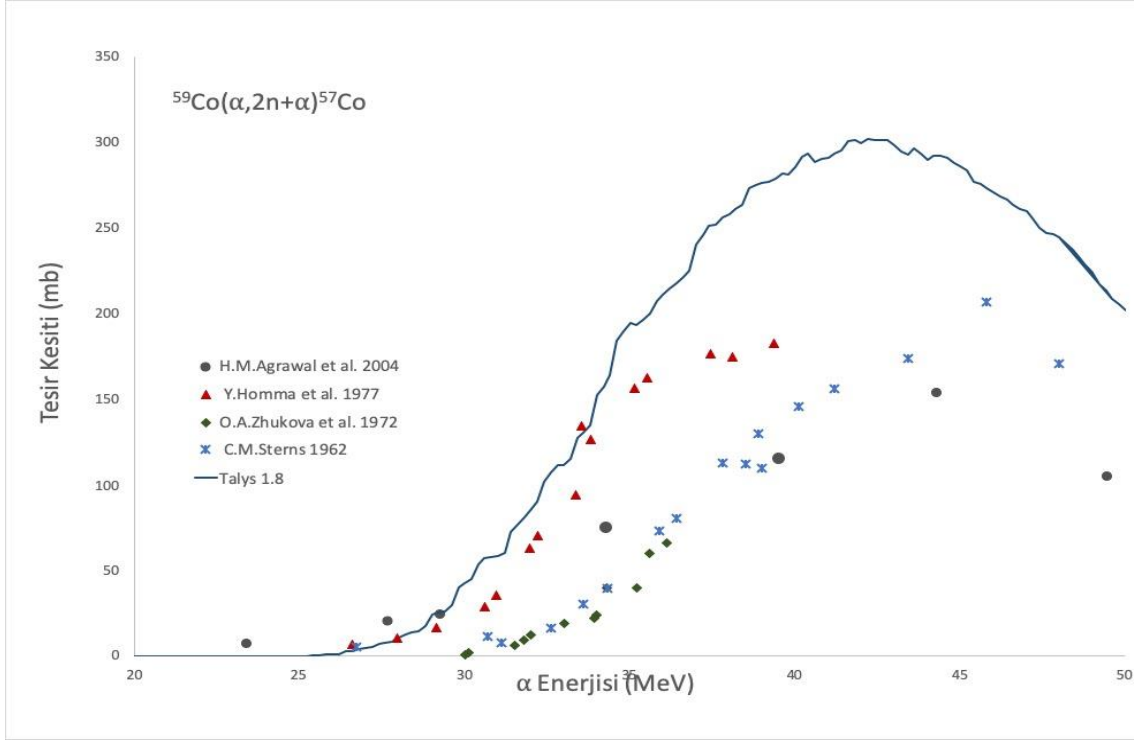


Grafik 4.3 ^{56}Fe hedef çekirdeği için $(\alpha,2n+p)$ reaksiyon tesir kesiti.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 17 MeV’de başladığı ve yaklaşık 40 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının 45 MeV kadar uyumunun biçim olarak olduğu görülmüştür. Blann (1965)’nin tarafından rapor edilmiş veriler ile çalışmamız 48,6 MeV ve 67,9 MeV enerjilerinde çok yakın değerler aldığı ve biçim olarak uyum içinde olduğu görülmektedir. Wata (1962) ve Tanaka (1960) değerlendirme amaçlı kullanılan deneysel sonuçların reaksiyon tesir kesiti değerlerinin 40 MeV’de maksimuma ulaştığı ve çalışma ile biçim olarak uyumlu bir eğri görülmektedir. Reaksiyon olasılığı 45 MeV’den sonrasında ise 70 MeV’e kadar olan enerji aralığında teorik hesaplamalardan ve deneysel sonuçlardan elde edilen grafiklerin eğilimi uyum içindedir. Teorik sonuçlarla deneysel veriler arasında uyumu biçim olarak yakalanmıştır.

4.4 $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

^{59}Co hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 20-50 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodları kullanılarak hesaplanan $(\alpha,2n+\alpha)$ reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden (İnt. Kyn. 7) alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Grafik 4.4’de gösterilmiştir.

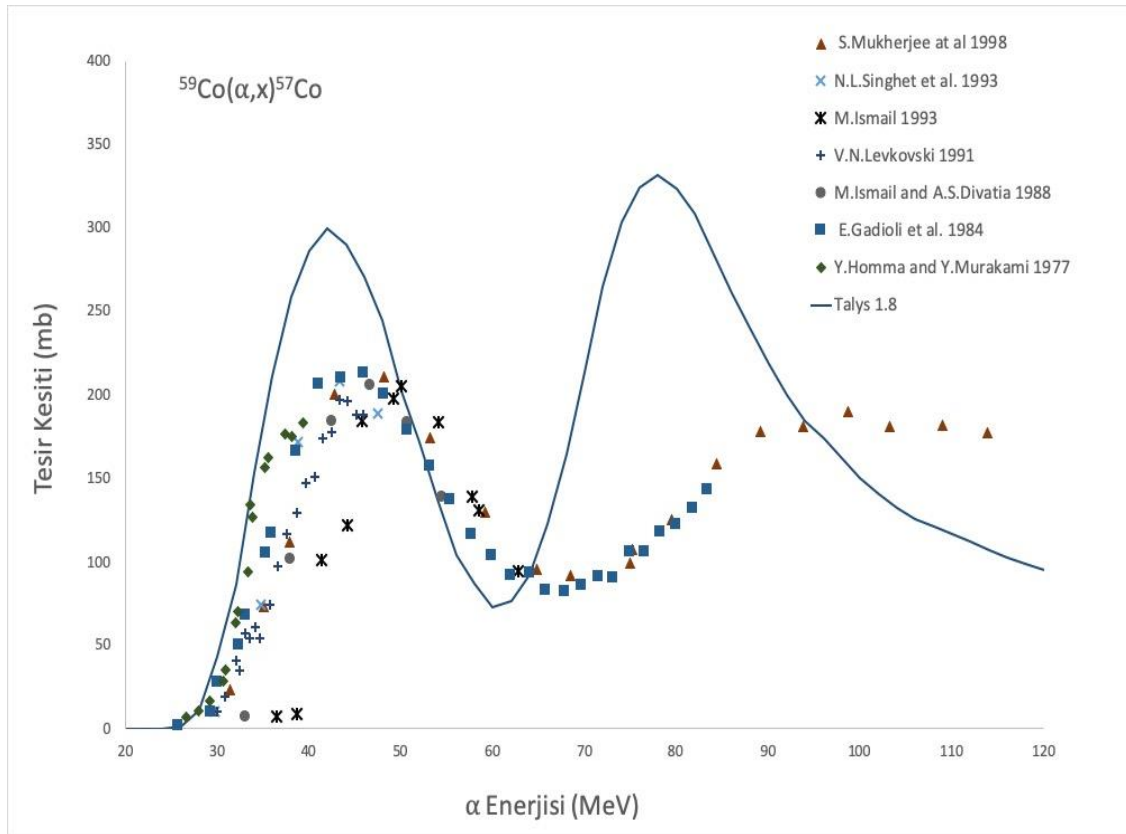


Grafik 4.4 $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)^{57}\text{Co}$ reaksiyon tesir kesiti.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 26 MeV'de başladığı ve yaklaşık 42,6 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 33,52 MeV'e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının Homma vd. (1977) tarafından rapor edilmiş bulunan deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Çalışmamızda elde edilen reaksiyon tesir kesiti ile Homma vd. (1977) rapor edilmiş deneysel verileri ile 26,58 MeV, 27,96 MeV ve 33,52 MeV'de, Sterns (1962)'in rapor edilmiş deneysel verileri 26,7 MeV ve Agrawal (2004)'in rapor edilmiş deneysel verileri ise 29,27 MeV enerjilerinde çakışık olduğu görülmektedir. Homma vd. (1977) rapor edilmiş deneysel verisi ile çalışmamız 33,52 MeV'e kadar ve 23-28 MeV enerji bölgesinde ise Sterns (1962) ve Agrawal (2004) rapor edilmiş deneysel veriler ile neredeyse çakışık olduğu gözlemlendi. Homma vd. (1977), Zhukova (1972) ve Agrawal (2004)'nın rapor edilmiş deneysel verileri teorik verilerle uyumluluğu biçim olarak yakalanmıştır. Rapor edilmiş deneysel verilerin reaksiyon olasılığı maksimum olduğu enerji 46 MeV'dir. Deneysel veriler ile Talys 1.8 biçim olarak uyumlu bir eğri ortaya koyduğu Grafik 4.4'de görülmektedir.

4.5 $^{59}\text{Co}(\alpha, x)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

^{59}Co hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 20-180 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodları kullanılarak hesaplanan (α, x) reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden (İnt. Kyn. 7) alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Grafik 4.5’de gösterilmiştir.



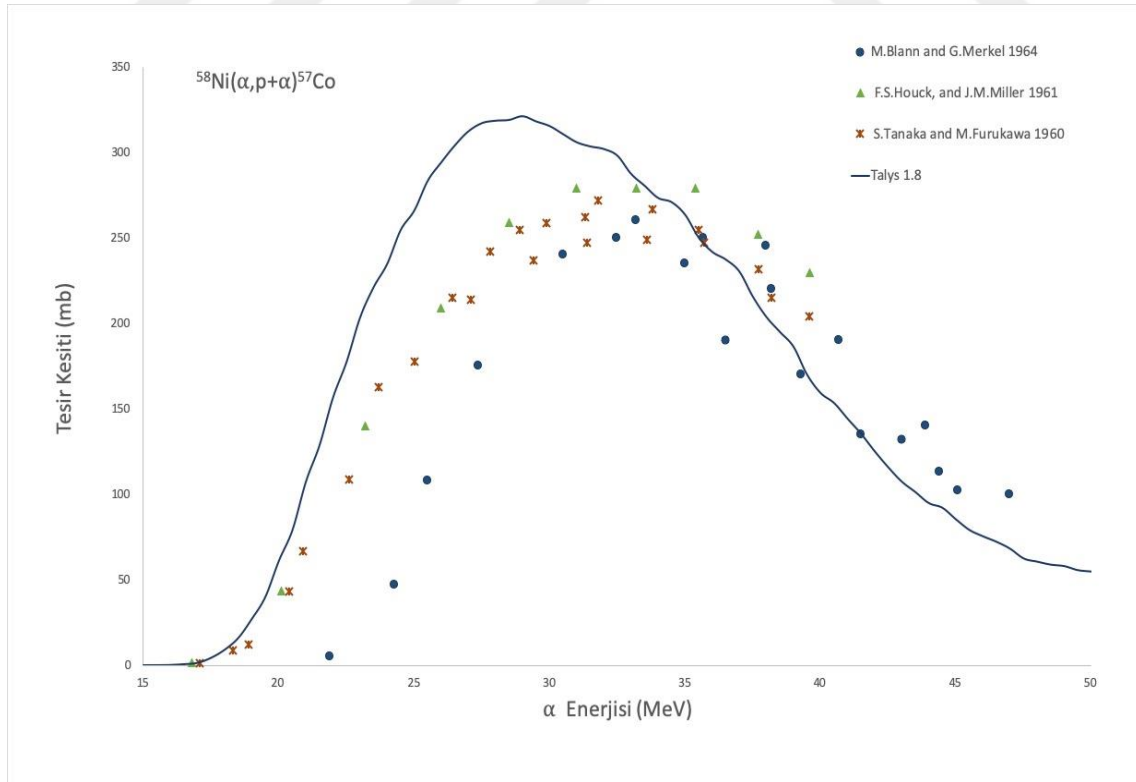
Grafik 4.5 ^{59}Co hedef çekirdeği için (α, x) reaksiyon tesir kesiti.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 25 MeV’de başladığı ve yaklaşık 42 MeV ve 78 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Homma (1977)’nin tarafından rapor edilmiş deneysel veriler ile 27,92 MeV ve 33,52 MeV, Ismail (1988) tarafından rapor edilmiş verilerle ise 50 MeV ve 54,5 MeV enerjilerinde çakışık olduğu görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 35,52 MeV’e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının Homma vd. (1977) tarafından rapor edilmiş bulunan deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu

görülmektedir. Gadioli (1984) tarafından rapor edilmiş deneysel verileri ile elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçları 53,1 MeV ve 64,1 MeV’de, Mukherjee (1998) tarafından rapor edilmiş verilerle ise 64,8 MeV ve 98,8 MeV’de çakışıktır olduğu görülmektedir. Elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçları, 20–35,5 MeV ve 50-54 MeV enerji bölgelerinde deneysel veriler ile neredeyse çakışık olduğu gözlemlenmiştir. Levkovski (1991) ve Singh (1993) tarafından rapor edilmiş deneysel veriler ile elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçları verilerle uyumluluğu biçim olarak yakalanmıştır. 60 MeV kadar biçim olarak uyumlu bir eğri ortaya koyduğu Grafik 4.5’de görülmektedir. 60 MeV’den sonra uyum gözlenememiştir.

4.6 $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

^{58}Ni hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 15-50 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodları kullanılarak hesaplanan $(\alpha, p+\alpha)$ reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden (İnt. Kyn. 7) alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Grafik 4.6’de gösterilmiştir.



Grafik 4.6 ^{58}Ni hedef çekirdeği için $(\alpha, p+\alpha)$ reaksiyon tesir kesiti.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 17 MeV'de başladığı ve yaklaşık 29 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Tanaka (1960) tarafından rapor edilmiş deneysel veriler ile 17,1 MeV, 18,3 MeV, 35,50 MeV ve 35,8 MeV enerjilerinde çakışık olduğu görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 20 MeV'e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının Hunck (1961) ve Tanaka (1960) tarafından rapor edilmiş bulunan deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Blann (1964) tarafından rapor edilmiş deneysel verileri ile elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçları 33,2 MeV, 35,6 MeV, 39,3 MeV, 40,7 MeV ve 43 MeV çakışık olduğu görülmektedir. Elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçları, rapor edilmiş deneysel veriler ile 15-21,9 MeV ve 33,2-42,5 MeV enerji bölgelerinde neredeyse çakışık olduğu gözlemlenmiştir. Rapor edilmiş deneysel veriler ile elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçları uyumlu bir eğri ortaya koyduğu Grafik 4.6'de görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Son yıllarda, parçacıkların denge öncesi (Pre-Equilibrium-PE) salınımı ve ardından denge bozulmasıyla nükleer etkileşim mekanizması incelemeleri artmıştır. PE partikül emisyonu için kanıtlar, α parçacığının çekirdekle etkileşmesi ile bulunmuştur. Bununla birlikte, uyarılmış reaksiyonlarla ilgili durumlar daha az tatmin edici sonuçlar vermiştir. Griffin'in öncü çalışmasından yola çıkarak birçok model ve benzer çekirdeklere yol açan ($\alpha,^*$) reaksiyonları geliştirildi. ^{57}Co bu çekirdeklerden bir tanesidir (Rizvi *et al.* 1989).

Blann tarafından önerilen çok aşamalı hibrid (GDH) modeller gibi karmaşık kuantum-mekanik formaliteler için nispeten basit ve kapalı formülü modeller olarak bulunan melez ve geometriye bağlı deneysel verilerin elde edilmesi çok kolaylaştırıldı (Rizvi *et al.* 1989). Son zamanlarda, bazı doğrudan ve çok aşamalı bileşik modeller önerilmiştir. Bu kuantum-mekanik modeller ilke olarak, PE işlemlerinin yarı küresel belirsizlikleri olmadan tesir kesitlerini hesaplamının bir yolunu sağlar. Şu anda, bu modeller sadece nükleonun indüklediği reaksiyonlara uygulanabilir. Çünkü, α gibi kompleks bir parçacık için, başlangıçtaki mermi-hedef etkileşiminin kuantum-mekanik etkileşimi çok karmaşık hale gelmektedir. Önceden ölçülen uyarma fonksiyonları, yarı-klasik modeller kullanılarak PE emisyonunun dahil olduğu ve bulunmadığı gibi, elektronik olarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu bağlamda, tipik nükleer reaksiyonların uyarma fonksiyonunun dikkatli ve sistematik bir deneysel çalışması ve bu modellerin bazılarının öngörülerıyla karşılaştırılması, PE emisyonunun karmaşık mekanizmasının anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Bu motivasyon ile mevcut çalışma, Talys1.8 ile farklı kütlelere sahip bazı çekirdeklerin ^{57}Co radyoizotopun elde edilmesi için ($\alpha,^*$) reaksiyon fonksiyonlarının tesir kesitleri etkisinin gözlenmesi için $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)$, $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)$, $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)$, $^{59}\text{Co}(\alpha,x)$, $^{58}\text{Ni}(\alpha,p+\alpha)$ seçilmiş reaksiyonların tesir kesitinin geniş bir enerji aralığında sistematik olarak incelemiştir.

Alfa ile uyarılmış fonksiyonların, Talys1.8 kodu ile GDR ($E < 30$) ve QD bölgesinde periyodik cetvelin VII-B ve VIII-B grubunda bulunan hafif çekirdeklerle ($\alpha,2n$), (α,p), ($\alpha,2n+p$), ($\alpha,2n+\alpha$), (α,x), ($\alpha,p+\alpha$) reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamaları CS

hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar IAEA'na ait veri tabanları EXFOR kütüphanesinden alınmış deneysel ve hesaplanmış sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır.

Grafik 4.1'de reaksiyon türlerinden $(\alpha, 2n)$ reaksiyonu için teorik ve deneysel uyarma fonksiyonları gösterildi. Teorik çalışmamız rapor edilmiş deneysel verilerle karşılaştırmak için belirli bir enerji bölgesinde yapılmıştır. Bu aralık, 10–80 MeV enerji bölgesindedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, hesaplanan değerler 13–25 MeV enerji bölgesinde deneysel veriler ile yaklaşık olarak çakışık iken, teorik sonuçlarda maksimum tesir kesitleri 23 MeV'de elde edilirken, deneysel verilerde maksimuma yaklaşık 30 MeV'de ulaşılmıştır. Talys 1.8 verilerinin deneysel veriler ile uyumlu bir eğri ortaya koyduğu görülmektedir. Grafik 4.1'de açıkça görülmekte olan biçim uyumu diğer çekirdeklerde görülecektir.

Grafik 4.2'deki $^{56}\text{Fe}(\alpha, p)^{57}\text{Co}$ reaksiyonu için deneysel değerler ile hesaplanan değerlerin 14 MeV'e kadar neredeyse çakışık olduğu görülmektedir. Maksimum tesir kesitine karşılık gelen enerji değeri Talys 1.8'den elde edilen sonuçlar için 15,4 MeV iken, deneysel veriler için ise 16 MeV olmuştur. Bu fark teorik ve deneysel veriler arasında olabilecek normal bir durumdur. Tesir kesiti maksimum değerinden sonra Talys 1.8 verilerinin deneysel veriler ile uyumlu bir eğri ortaya koyduğu görülmektedir.

Grafik 4.3'deki teorik ve deneysel veriler karşılaştırıldığında, 40,6-70 MeV aralığında birbirine yakın değerdedir ve 40,6 MeV'e kadar ise karakteristik bir uyum gözlenmektedir. Teorik ve deneysel verilerin biçim olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

Grafik 4.4'de verilen $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n)^{57}\text{Co}$ reaksiyonu ile $(\alpha, 2n + \alpha)$ fonksiyonunun teorik ve deneysel verilerinin karşılaştırılması 20-50 MeV aralığına da yapılmıştır. Talys 1.8 kod programının deneysel verilerle 25-29 MeV aralığında çakışık olduğu görülmektedir. Maksimum tesir kesiti değerinin Talys 1.8 verilerinde 42 MeV'de, deneysel olarak ise 45,8 MeV'de olduğu görülmektedir. Grafik 4.4'de tam bir uyum olmamasına rağmen biçim olarak uyumlu olduğu değerlendirilebilir.

Grafik 4.5’de reaksiyon türlerinden (α, x) reaksiyonu için teorik ve deneysel uyarma fonksiyonlarının teorik değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması 20-120 MeV aralığında yapılmıştır. Deneysel verilerle Talys 1.8 kod programının verileri 20-40 MeV ve 50-60 MeV aralığında yaklaşık olarak çakışmıştır. Deneysel verilerin ilk maksimumu 50 MeV’de elde edilirken Talys 1.8 ile yapılan hesaplama sonucunda 45 MeV’de ilk maksimum elde edilmiştir. İkinci maksimum tesir kesitinin elde edildiği enerji değeri Talys 1.8 ile yapılan hesaplamada 80 MeV iken, deneysel olarak bu durumun 100 MeV’de gerçekleştiği görülmektedir. Teorik ve deneysel veriler arasında 60 MeV’e kadar görülen biçim uyumu 60 MeV’den sonra gözlenememiştir.

Grafik 4.6’daki ($\alpha, p + \alpha$) reaksiyonu için teorik ve deneysel uyarma fonksiyonlarının karşılaştırılması 15–50 MeV enerji bölgesinde yapılmıştır. Teorik hesaplama sonuçları ile deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde 16-20 MeV ve 33-55 MeV enerji aralıklarında tesir kesitlerinin değerleri yaklaşık olarak uyumlu iken, 20-35 MeV ve 55-70 MeV enerji aralıklarında yalnızca biçim bakımından uyum görülmektedir.

⁵⁷Co izotopunun elde edilmesi için alfa ile uyarılmış reaksiyonların genellemeler dahilinde reaksiyon tipleri ve uluslararası veri tabanından alınan veri tiplerindeki çeşitlilik göz önüne alındığında, Talys 1.8 nükleer kod programının sonuçlarının farklı değerlerde ve oranlarda bu veriler ile olan uyumu ve GDR bölgesinde ($\alpha, *$) reaksiyonların biçim uyumu gözlenmiştir.

Tablo 1 Kullanılan reaksiyonların Talys 1.8 programındaki tesir kesiti analizi

Reaksiyonlar	Maksimum tesir kesitindeki gönderilen parçacığın enerjisi (MeV)		Tesir kesitinin maksimum değeri (mb)		İlk tesir kesiti için gönderilen parçacığın enerjisi (MeV)	Tesir kesitinin ilk değeri (mb)
$^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)^{57}\text{Co}$	25		709,441		13	8,59404
$^{54}\text{Fe}(\alpha,p)^{57}\text{Co}$	15.2		539,511		4,4	0,00151313
$^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)^{57}\text{Co}$	40,5		830,989		25	0,664297
$^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)^{57}\text{Co}$	42,2		301,969		24,6	0,00337023
$^{59}\text{Co}(\alpha,x)^{57}\text{Co}$	42	78	299,729	331,82	26	1,13041
$^{58}\text{Ni}(\alpha,p+\alpha)^{57}\text{Co}$	29		321,295		15	0,00221779

Bu tezde kullanılan reaksiyonların tesir kesitleri incelendiğinde (Tablo 1) en yüksek tesir kesitine $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)$ reaksiyonunda ulaşıldığı ama bu tesir kesiti için gerekli enerjinin 40,5 MeV gibi yüksek bir enerji olduğu görülmektedir. Bu tesir kesitinden sonraki ikinci en yüksek değere ise $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)$ reaksiyonunda 25 MeV enerjili alfa parçacıkları ile ulaşılabilmektedir. Bu tesir kesitine yakın olan $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)^{57}\text{Co}$ reaksiyonunda maksimum tesir kesitine 15,2 MeV enerjili alfalar ile ulaşılabilmesi bu reaksiyonun ^{57}Co radyoizotopunun üretiminde öne çıkmasını sağlamaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Das, A. and Ferbel, T. (2003). Introduction to Nuclear and Particle Physics. Word Scientific İmprint, 2. Edition. USA.
- Knoll, G.F. (1989). Radiation Detection and Measurement. John Wiley and Sons İmprint, 2. Edition, New York.
- Krane, K.S. (2002). Introductory Nuclear Physics. N kleer Fizik 1. ve 2. Cilt. ( ev: B.  arar), Palme Yayıncılık, 3. Baskı, Ankara.
- Leo, W.R. (1994). Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Berlin Heidelberg İmprint, New York.
- Lilly, J. (2018). Nuclear Physics Principles and Applications. ( ev: A. Aydın, İ. H. Sarp n, E. Tel, A. Kaplan), Nobel Yayıncılık, 1. Baskı, Ankara.
- Martin, J.E. (2013). Physics for Radiation Protection A Handbook Second Edition. ( ev: A. G. Tanır, M. H. B l k Demir, K. Ko ) Palme Yayıncılık, 2. Baskı, Ankara.
- Powsner, R.A. and Powsner, E.R. (2008). Essential Nuclear Medicine Physics. Blackwell Publishing İmprint, 9. edition, USA.
- Satchler, G.R. (1983). Direct Nuclear Reactions. Oxford University Press, 3. edition, New York.
- Williams, W.S.C. (2014). Nuclear and Particle Physics. ( ev: İ. Dumanog lu, S. Ert rk), Nobel Yayıncılık, 1. Baskı, Ankara.
- Rotherford, M.E., Derrick, J.G., Chapman, D.J., Collins, G.S. et al., (2019). Journal of Applied Physics. AIP Publishing İmprint, 125. Edition, USA.
- L'Annunziata, M.F. (2003). Handbook of Radioactivity Analysis 2nd Ed. Working Together to grow libraries in developing countries. Academic Press İmprint, 3. Edition, USA.
- International Atomic Energy Agency (2000). Annual Report. Printed by the IAEA in Austria July 2001.
- Levkovsk, V.N. (1991). Act.Cs.By Protons and Alphas. The Cross sections of medium mass nuclide activation ($A=40-100$) by medium energy protons and alpha-particles ($E=10-50$ MeV), Moscow.
- Hilaire, A.J., Duijvestijn, S. and Koning M. (2015). TALYS 1.8 A Nuclear Reaction

- Program, NRG – Nuclear Research and Consultancy Group, Netherlands.
- Duijvestijn, A. and Koning M. (2007). New Nuclear Data Evaluations for Ca and Sc Isotopes, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **44**(6): 823–837.
- Dietrich, S.S. and Berman, B.L. (1993). Giant Dipole Resonance Parameters for Gamma-Rays, *International Atomic Energy Agency, Nuclear Data Section*, **145**: 21-30.
- Kalbach, M.A. and Kalbach, W.E. (1999). Persistence of Ethnicity and Inequality among Canadian Immigrants, *Canadian Studies Population*, **26**: 83-105.
- Koning, A. J., Duijvestijn, M. C., van der Marck, S. C., Meulekamp, R. K. and Hogenbirk, A. (2007). New Nuclear Data Libraries for Lead and Bismuth and Their Impact on Accelerator-Driven Systems Design, *Nuclear Science and Engineering*, **156**: 357-390.
- Ramo, S. (1939). Currents Induced by Electron Motion, *Proc of the IRE*, **27**: 584-585.
- Berrett, H.H., Eskin, J.D. and Barber, H.B. (1995). Charge Transport in Arrays of Semiconductor Gamma-Ray Detector, *Physical Review Letters*, **75**: 1-3.
- Hilaire, S., Girod, M., Goriely, S. and Koning, A.J. (2012). Temperature dependent combinatorial level densities with the D1M Gogny force, *Physical Review C*, December, **86**: 064317.
- Paiva, E., Terranova, O.A.P. and Tavares, M.L. (2001). Nuclear photofissility in the quasi-deuteron energy region, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, **27**(7): 1435-1458.
- Sudar, S. and Qaim, S.M. (1994). Excitation Functions of Proton and Deuteron Induced Reactions on Iron and Alpha-Particle Induced Reactions on Manganese in the Energy Region Up to 25MeV, *Physical Review*, **50**(5): 2408-2419.
- Singh, B.P., Bhardwaj, H.D. and Prasad, R. (1991). Canada, Exciton Model Analysis of Alpha-Induced Reactions on Manganese, *II Nuovo Cimento A, April*, **104**: 475-486.
- Rizvi, I.A., Bhardwaj, M.K., Ansari, M.A., and Chaubey, A.K. (1989). ^{55}Mn Nucleus Preequilibrium Emission of Multiparticles in α -Induced Reactions with, *Canadian Journal of Physics*, Canada, **67**: 1091-1096.
- Antian, M. L., Xianguan, L., Fuqing, H. and Xiufeng, P. (1989). China Excitation functions for the $^{55}\text{Mn}(\alpha, n)^{58\text{m,g}}\text{Co}$, $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)^{57}\text{Co}$ and $^{55}\text{Mn}(\alpha, \alpha+n)^{54}\text{Mn}$

- reactions, *Institute of Nuclear Science and Technol, Sichuan U. Reports*, China, No: 003.
- Michel, R., Brinkmann, G. and Stück, R. (1982). Belgium, Measurement and Hybrid Model Analysis of Integral Excitation Functions For Alpha-Particle Reactions on Vanadium and Manganese, *Nuclear Data for Science and Technology*, **47**: 599-602.
- Iwata, S.J. (1962). Isomeric Cross Section Ratios in Alpha-Particle Reactions, *Journal of the Physical Society of Japan*, Japan, **17**: 1323-1333.
- Tanaka, S., Furukawa, M., Mikumo, T., Iwata, S., Yagi, M. and Amano, H. (1960). Excitation Functions for Alpha-Induced Reactions on Manganese-55, *Journal of the Physical Society of Japan*, Japan, **15**: 545-550.
- Levkovski, V.N. (1991). Cross sections of medium mass nuclide activation ($A=40-100$) by medium energy protons and alpha-particles ($E=10-50$ MeV), *Protons and Alphas*, Moscow, **69**: 99-102.
- Buckby, M.A. and King, J.D. (1984). Cross Sections and Thermonuclear Reaction Rates for the $^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{31}\text{P}$ and $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)^{57}\text{Co}$ Reactions, *Canadian Journal of Physics*, **62**: 134-140.
- Houck, F.S. and Miller, J.M. (1961). Reactions of Alpha Particles with Iron-54 and Nickel-58, *Physical Review Journals Archive*, Published 1 July, **123**: 231-234.
- Tanaka, S., Furukawa, M., Iwata, S., Yagi, M., Amano, H. and Mikumo, T. (1960). Reactions of Iron-54 with Alpha Particles, *Journal of the Physical Society of Japan*, Japan, **15**: 1547-1551.
- Ewart, A., Valentine, C. and Blann, M. (1965). Nuclear Physics, Excitation Functions and Mean Recoil Ranges Resulting from the Bombardment of ^{56}Fe with 18-68 MeV ^4He Ions, *Nuclear Physics A*, Published July, **69**: 625-636.
- Iwata, S.J. (1962). Isomeric Cross Section Ratios in Alpha-Particle Reactions, *Journal of the Physical Society of Japan*, Japan, **17**: 1323-1333.
- Tanaka, S., Furukawa, M., Iwata, S., Yagi, M., Amano, H. and Mikumo, T. (1960). Excitation Functions for Alpha-Particle Reaction on Fe^{56} and Fe^{57} , *Journal of the Physical Society of Japan*, Japan, **15**: 2125-2128.
- Ansari, M. A., Abd. Alslam, M.A., Sathik, N.P., Ismail, M. and Rashid, M.H. (2004). Excitation functions of α -induced reactions in cobalt and pre-equilibrium effects,

- Internatinal Journal of Modern Physics E*, USA, **13**: 585-595.
- Zhukova, O.A., Kanashevich, V. I., Laptev, S.V. and Chursin, G.P. (1972). Russia, Nuclear Reactions Produced by α Particles on Co^{59} Nuclei, *Yadernaya Fizika*, **16**: 242-246.
- Mukherjee, S., Sharma, A.K., Bakhru, D., Singh, N.L. and Kolev, D. (1998). Sweden, Pre-Equilibrium Alpha and Nucleon Emission in $^{59}\text{Co}(\alpha, \alpha\gamma\text{pxn})$ Reactions, *Physica Scripta*, **58**: 319-325.
- Singh, N.L., Agarwal, S. and Rama Rao, J. (1993). Excitation Function for α -Particle-Induced Reactions in Light-Mass Nuclei, *Canadian Journal of Physics*, Canada, **7**(3-4): 115-121.
- Ismail, M. and Divatia, A.S. (1988). Measurement and Analysis of Alpha-Induced Reactions on Ta, Ag and Co, *Pramana - Journal of Physics*, India, **30**: 193-210.
- Gadioli, E., Gadioli Erba, E., Asher, J. and Parker, D. J. (1984). Analysis of $^{59}\text{Co}(\alpha, x)$ Reactions up to 170 MeV Incident α Energy, *Zeitschrift fuer Physik A Hadrons and Nuclei*, Germany, **317**: 155-168.
- Homma, Y. and Murakami, Y. (1976). Production of ^{61}Cu by alpha and ^3He bombardment on cobalt target, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, Japan, **50**(5): 397-400.
- Blann, M. and Merkel, G. (1964). Evidence of nuclear shell effects in Ni^{58} reactions induced with 0-48 MeV alpha particles, *Nuclear Physics*, **52**: 673-691.
- Houck, F.S. and Miller, J.M. (1961). Reactions of Alpha Particles with Iron-54 and Nickel-58, *Physical Review Journals Archive*, USA, Published 1 July, **123**: 231-234.
- Tanaka, S. (1960). Reactions of Nickel with Alpha-Particles, *Journal of the Physical Society of Japan*, Japan, **15**: 2159-2167.

İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

- 1- <http://geant4.web.cern.ch/geant4> 09.04.2019
- 2- <http://www.kimyakulubu.com/alfa-parcacigi/> 09.04.2019
- 3- http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reaction 14.05.2011
- 4- http://thm.ankara.edu.tr/tac/YAZOKULU/yazokulu4/.../Latife_sahin.doc 19.05.2011
- 5 - <http://www.nndc.bnl.gov/capgam/> 09.04.2019
- 6 - <http://depni.npi.msu.su/cdfe> 07.05.2011
- 7- <http://nds.iaea.org/exfor/> 09.04.2019
- 8- <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> 27.06.2019
- 9- <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html> 27.06.2019
- 10- <https://data.oecd.org/> 27.06.2019
- 11- <https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/> 27.06.2019
- 12- https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html 27.06.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Asiye GÜROL.

Doğum Yeri ve Tarihi: Çubuk / 28.06.1987

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 0 546 561 03 55 / irnur@hotmail.com

Eğitim Durumu:

Lise : Çubuk Lisesi, (2000-2004)

Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fizik Bölümü,
(2005-2011)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Altın Vizyon Özel Eğitim Hizmetleri Tic. Ltd.
Şti. / Fen Bilgisi Öğretmeni / 2011-2012

Yayınları (SCI ve diğer) :

- Gürol, A., Sarpün, İ. H. (2014). ^{57}Co Radyoizotop Üretiminin Teorik Çalışması. Adım Fizik Günleri III, Sözlü sunum, Isparta.
- Gürol, A., Sarpün, İ. H., Oruncak, B. (2014). ^{57}Co Radyoizotopunun (p,*), (n,x) ve (d,x) Reaksiyonları ile Üretilmesinin Teorik Çalışması. Adım Fizik Günleri III, Poster Sunum, Isparta.
- Gürol, A., Sarpün, İ. H., Oruncak, B. (2014). $^{116,117,118,119,120,122}\text{Sn}$ Isotopes (p,n) Reaction Section Calculation. Turkish Physical Society 31st International Physics Congress, Poster sunum, Bodrum.
- Gürol, A., Sarpün, İ. H. (2014). α Bombardment With ^{68}Ga , ^{67}Ga , ^{68}Ge and ^{65}Zn The Oretical Study of Production. Theoretical Study of Production by bombardment. 7th International Workshop on Nuclear Structure Propertion, Sözlü sunum, Sinop.
- Gürol, A., Sarpün, İ. H., Oruncak, B. (2014). Radioisotopes $^{57}\text{Co}(\alpha,*)$ Produced by The Reaction of The Theoretical Calculation. 7th International Workshop on Nuclear Structure Propertion, Poster sunum, Sinop.

- Gürol, A., Sarpün, İ. H., Ünal, R. (2018). Theoretical Calculation of Gamma-Induced Fission Cross Section on Some. 4th International Conference on Theoretical and Experimental Studies for Nuclear Applications and Technology, Poster sunum, Antalya.
- Gürol, A., Sarpün, İ. H., Boskurt, A. (2018). Theoretical Calculation of Neutron Induced Fission Cross Section on Some Actinides. 4th International Conference on Theoretical and Experimental Studies for Nuclear Applications and Technology, Poster sunum, Antalya.
- Gürol, A., Sarpün, İ. H., Tel, E. (2019). Research of The Excitation Functions of $^{58}\text{Ni}(d,n+2p)^{57}\text{Co}$ Reaction by Level Density Model. 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies for Nuclear Applications and Technology, Poster sunum, Amasya.
- Gürol, A., Sarpün, İ. H., Aydın, A. (2019). Research of The Excitation Functions of $^{58}\text{Ni}(n,x)^{57}\text{Co}$ Reaction by Level Density Model. 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies for Nuclear Applications and Technology, Poster sunum, Amasya.

Bilgisayar Bilgisi :

* Microsoft Office Programları	(İyi Seviyede)
* Linux İşletim Sistemi	(İyi Seviyede)
* Teorik Fizik Simülasyon Programları	
Talys 1.6	(İyi Seviyede)
Talys 1.8	(İyi Seviyede)
MCNP	(Başlangıç)

<u>Katıldığı Seminerler ve Kurslar:</u>	<u>Tarih</u>
İzmir Yüksek Enerji Fiziği ve Uygulamaları Çalıştayı	2012
UPHDYO IX. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Detektörleri Yaz Okulu	2013
Medikal Fizikte Hesaplamalı Yöntemler MEFHEY2013	2013
Adım Fizik Günleri III	2014
Turkish Physical Society 31 st International Physics Congress	2014
7 th International Workshop on Nuclear Structure Propertion	2014
Nükleer ve Parçacık Fiziğinde Monte Carlo Uygulamaları Bahar Okulu	2015
Dalga ve Parçacık Tipi Radyasyon Etkileşimleri Monte Carlo Uygulamaları DPAR 2017	2017
4 th International Conference on Theoretical and Experimental Studies for Nuclear Applications and Technology Tesnat 2018	2018
MCNP ile Modelleme Kursu I	2018
MCNP ile Modelleme Kursu II	2018
Rood ve Geant4 Kursu	2018
5 th International Conference on Theoretical and Experimental Studies for Nuclear Applications and Technology Tesnat 2019	2019

Ek-1 Reaksiyon Mekanizması

