

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pozitron Yayınlayıcı Brom-76 Radyoizotopunun
Farklı Üretim Metotlarının İncelenmesi

Aynur GÖKMEN

KASIM 2013

Fizik Anabilim Dalında Aynur GÖKMEN tarafından hazırlanan POZİTRON YAYINLAYICI BROM-76 RADYOİZOTOPUNUN FARKLI ÜRETİM METOTLARININ İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Saffet NEZİR
Anabilim Dalı Başkanı

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

Prof. Dr. Abdullah AYDIN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. M. Hicabi BÖLÜKDEMİR _____

Üye (Danışman) : Prof. Dr. Abdullah AYDIN _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gökhan TÜRECI _____

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

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

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

POZİTRON YAYINLAYICI BROM-76 RADYOİZOTOPUNUN FARKLI ÜRETİM METODLARININ İNCELENMESİ

GÖKMEN, Aynur

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AYDIN

Kasım 2013, (40) sayfa

Bu tez çalışmasında, standart olarak kullanılan pozitron yayınlayıcılara göre çok daha uzun ömürlü olan pozitron yayınlayıcı ^{76}Br ($t_{1/2}=16,2$ saat) radyoizotopunun üretimine ait farklı nükleer reaksiyonlar belirlendi. Bu reaksiyonlara ait tesir kesitleri hesaplandı. Tesir kesitlerini hesaplamak için TALYS bilgisayar programı kullanıldı. Ayrıca reaksiyon modellerinin öngörülerinin sınanması amacıyla, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumunun bünyesinde bulunan Deneysel Nükleer Reaksiyon Veri Bankası'ndaki (Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)) deneysel tesir kesiti verilerinden yararlandı. Hesaplanan sonuçlar ile deneysel veriler birbirleri ile karşılaştırıldı. Sonuç olarak ^{76}Br radyoizotopunun üretimi için en uygun üretim metotları belirlendi.

Anahtar kelimeler: ^{76}Br radyoizotopu, nükleer reaksiyonlar, TALYS kodu

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF DIFFERENT PRODUCTION METHODS OF POSITRON EMITTER BROMINE-76 RADIOISOTOPE

GÖKMEN, Aynur

Kırıkkale University

Department of Physics, M. Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Abdullah AYDIN

November 2013 , (40) pages

In this thesis study, different nuclear reactions related to producing of positron emitting ^{76}Br ($t_{1/2}=16,2$ h) radioisotope, which is much more durable than the ones used more frequently, were determined. The cross sections of these reactions are also calculated. In order to do so, TALYS code was used. Moreover, in order to testify the modeling of the reactions, experimental cross section data of Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), which is in International Atomic Energy Agency (IAEA) database, were used. By doing this, experimental data and calculated data were compared. As a result, the most suitable methods to produce ^{76}Br radioisotope were determined.

Key Words: ^{76}Br radioisotope, nuclear reactions, TALYS code

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında bana rehberlik eden, tez çalışma konusunu öneren, gerekli bilgisayar programlarını sağlayan ve çalışma süresince değerli yardımlarını esirgemeyen tez yöneticisi hocam, Sayın Prof. Dr. Abdullah AYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Esra EROĞLU ve Erdem UYSAL' a; eğitim hayatım boyunca yanımda olan aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	<i>ii</i>
ABSTRACT	<i>iii</i>
TEŞEKKÜR	<i>iv</i>
İÇİNDEKİLER	<i>v</i>
ÇİZELGELER DİZİNİ	<i>vii</i>
ŞEKİLLER DİZİNİ	<i>viii</i>
SİMGELER DİZİNİ	<i>ix</i>
1. GİRİŞ	<i>1</i>
2. NÜKLEER REAKSİYONLAR	<i>3</i>
2.1. Nükleer Reaksiyonlar.....	<i>3</i>
2.1.1. Nükleer Reaksiyon Tesir Kesiti	<i>4</i>
2.2. Radyoizotoplar ve Kullanım Alanları	<i>8</i>
2.2.1. Radyoizotopların Tıpta Kullanımı.....	<i>11</i>
2.3. SPECT(Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayarlı Tomografi).....	<i>14</i>
2.4. PET(Pozitron Emisyon Tomografisi).....	<i>15</i>
3. NÜKLEER MODELLER	<i>17</i>

3.1. Bileşik-Çekirdek Reaksiyonları	17
3.2. Doğrudan (Direk) Reaksiyonlar.....	19
3.3. Denge Öncesi Reaksiyonlar	20
4. YÖNTEM VE MATERYALLER	21
4.1. TALYS Programı	21
4.2. Yarı Deneysel Tesir Kesiti Elde Etme İşlemi (Evaluation İşlemi).....	22
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	24
5.1. $^{77}\text{Se}(p, n)^{77}\text{Br}$ Reaksiyonu	24
5.2. $^{77}\text{Se}(p, 2n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu	26
5.3. $^{77}\text{Se}(p, 3n)^{75}\text{Br}$ Reaksiyonu	27
5.4. $^{78}\text{Se}(p, 2n)^{77}\text{Br}$ Reaksiyonu	28
5.5. $^{78}\text{Se}(p, 3n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu	30
5.6. $^{78}\text{Se}(p, 4n)^{75}\text{Br}$ Reaksiyonu	31
5.7. $^{75}\text{As}(^3\text{He}, 2n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu.....	32
5.8. $^{75}\text{As}(\alpha, 3n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu	34
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	36
KAYNAKÇA	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bazı radyoizotoplar ve tıptaki kullanım alanları.....	12
5.1. $p + {}^{77}\text{Se}$ reaksiyonları.....	28
5.2. $p + {}^{78}\text{Se}$ reaksiyonları.....	32
5.3. ${}^{75}\text{As}({}^3\text{He}, 2n){}^{76}\text{Br}$ ve ${}^{75}\text{As}(\alpha, 3n){}^{76}\text{Br}$ reaksiyonları.....	35
6.1. ${}^{76}\text{Br}$ radyoizotopunun elde edildiği reaksiyonlar.....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bir saçılma deneyine ait deneysel düzenek.....	5
2.2. İnce metal tabaka üzerine gelen parçacık demetinin etkinleştirilmesi	6
2.3. Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayar Tomografisi	14
2.4. Pozitron Emisyon Tomografisi	16
3.1. $^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdeği için farklı oluşum ve bozunum durumları	18
3.2. Çekirdek yüzeyinde meydana gelen doğrudan tepkimelerin geometrisi	19
5.1 $^{77}\text{Se}(p, n)^{77}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması	25
5.2. $^{77}\text{Se}(p, 2n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması	26
5.3. $^{77}\text{Se}(p, 3n)^{75}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması	27
5.4. $^{78}\text{Se}(p, 2n)^{77}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması	29
5.5. $^{78}\text{Se}(p, 3n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması	30
5.6. $^{78}\text{Se}(p, 4n)^{75}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması	31
5.7. $^{75}\text{As}(3\text{He}, 2n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması.....	33
5.8. $^{75}\text{Se}(\alpha, 3n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması	34

SİMGELER DİZİNİ

F	Etkin alan kesri
$t_{1/2}$	Yarı ömür
$D\omega$	Katı açısı
A	Yüzey alanı
I	Parçacık demetinin şiddeti
N	Hedef çekirdek sayısı
σ_T	Toplam etkin alan
N_0	Hedefe gelen parçacık sayısı
N	Hedeften geçen parçacık sayısı
Σ	Makroskobik tesir kesiti
$f(E)$	Normalizasyon katsayısı
E	Uyarılma enerjisi
σ_R	Reaksiyon tesir kesiti
λ_c	Yayınlanma hızı

1. GİRİŞ

Günümüzde, yüklü parçacıklarla oluşturulan nükleer reaksiyonların tesir kesitlerine ait bilgiler, birçok uygulama alanı için ilgi çekmektedir. Bu bilgilerin uygulama alanı bulunduğu birkaç alan;

- Daha çok tıbbi uygulamalar için radyoizotop üretimi
- Siklotronlar ve lineer hızlandırıcılarda elde edilen hafif yüklü parçacıkların (p, d, ^3He , vb.) izlenmesi
- Endüstriyel uygulamalarda yüzey analizi
- Astrofizik uygulamaları

olarak özetlenebilir.

Herhangi bir radyoizotop üretim programında, üretim metotlarının optimizasyonu için ağırlıklı olarak nükleer verilere ihtiyaç duyulur. Bu veriler, üretilecek ürünün verimini en üst düzeye çıkaracak, radyoaktif kirliliği ise en az düzeye indirecek bir enerji aralığının belirlenmesini içerir.

İzotopik olmayan kirlilikler kimyasal işlemlerle uzaklaştırılabilirken, izotopik kirlilikler ancak zenginleştirilmiş hedef materyallerinin seçilmesi ve hedefteki parçacık enerji aralığının dikkatlice belirlenmesi ile uzaklaştırılabilir.

Tıbbi uygulamalarda kullanılan radyoaktif çekirdeklerin kullanıldığı Pozitron Yayınlayıcı Tomografi (Positron Emission Tomography (PET)), günümüzde nükleer tıptaki en modern ve en ileri teşhis tekniklerinden birisidir. Standart PET çalışmalarında en çok organik pozitron yayınlayıcılar olarak adlandırılan ^{11}C ($t_{1/2} = 20,3$ dk), ^{13}N ($t_{1/2} = 10$ dk), ^{15}O ($t_{1/2} = 2$ dk) ve ^{18}F ($t_{1/2} = 110$ dk) gibi

radyoaktif çekirdekler kullanılmaktadır (Stöcklin vd., 1995).

Hem tedavi hem de görüntüleme amacıyla, nükleer tıpta radyoaktif halojenler dene oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. ^{75}Br ($t_{1/2} = 1,6$ saat) ve ^{77}Br ($t_{1/2} = 57,04$ saat) radyoaktif çekirdekleri PET ve SPECT çalışmalarında 1980' lerin ortalarına kadar kullanılmıştır (Qaim, 2008; Nayak and Brechbiel, 2009). Nispeten yüksek dozlarından dolayı, her iki radyoaktif çekirdeğe de duyulan ilgi azalmıştır. Sonraki yıllarda, ^{77}Br radyoaktif çekirdeği, Auger Elektron Tedavisi Yöntemi için potansiyel bir radyoaktif çekirdek olmuştur. ^{76}Br ($t_{1/2} = 16,2$ saat) ise medikal alanda tümörlü hücrelerin yok edilmesinde önemli bir radyoaktif çekirdek haline gelmiştir. Bu radyoaktif çekirdeğin tedavide kullanılması ilk olarak, 1980-1990 yılları arasında Orsay Grubu tarafından gösterilmiştir (Maziere vd. , 1986, 1995).

Bu tez çalışmasında, son yıllarda önemi gittikçe artan ^{76}Br radyoizotopunun farklı üretim reaksiyonları incelendi. Her bir reaksiyona ait üretim tesir kesitleri ve en uygun enerji aralıkları TALYS 1.2. bilgisayar programı (Köning, 2009) kullanılarak hesaplandı. Sonuçlar EXFOR'dan alınan deneysel verilerle karşılaştırıldı. Bu arada, deneysel verilerle en iyi uyumu sağlamak amacıyla yarı-deneysel tesir kesitleri de hesaplandı (evaluation işlemi) ve tüm sonuçlar grafikler üzerinde gösterildi.

Tezin ikinci bölümünde, nükleer reaksiyonlar ve radyoizotopların kullanım alanlarından; üçüncü bölümünde, nükleer modellerden; dördüncü bölümünde yöntem ve materyallerden; beşinci bölümde araştırma bulgularından bahsedildi ve altıncı bölümde ise tartışma ve sonuçlar ele alındı.

2. NÜKLEER REAKSİYONLAR

2.1.Nükleer Reaksiyonlar

Nükleer reaksiyonlar genel anlamıyla, bir atomun başka bir atoma dönüştüğü olaylardır. Hızlandırıcılardan, reaktörlerden veya radyoaktif bir kaynaktan çıkan, belli enerjiye sahip parçacıklar, belirli bir hedef üzerine gönderildiği takdirde, nükleer bir reaksiyon meydana gelebilmektedir. Bu bombardıman sonucu atom çekirdeğinin niteliği ya da özellikleri değişmektedir. Bombardıman eden parçacık, alfa parçacığı, gama ışını fotonu, nötron, proton, döteron ya da hafif bir iyon olabilir. Bu parçacığın, nükleer reaksiyonu başlatabilmesi için yeterli enerjiye sahip olması gereklidir (Krane, 2002).

Nükleer bir reaksiyon genel olarak; a hızlandırılmış parçacık, X hedef çekirdek, Y çarpışma sonrası ortaya çıkan ürün çekirdek, b, çarpışma sonrası ortaya çıkan ürün parçacık ve Q ise reaksiyon enerjisi olmak üzere;



biçiminde ya da kısaca X(a, b)Y şeklinde gösterilebilir. Buradaki Q-değeri, M_X hedef çekirdeğin kütlesi, m_a gelen parçacığın kütlesi, M_Y ürün çekirdeğin kütlesi, m_b ise yayınlanan parçacığın kütlesi olmak üzere,

$$Q = (M_X + m_a - M_Y - m_b)c^2 = K_Y + k_b - K_X - k_a \quad (2.2)$$

olarak verilir. Bu denklemde, K_Y ürün çekirdeğin, k_b yayınlanan parçacığın, K_X hedef çekirdeğin ve k_a gelen parçacığın kinetik enerjisidir. Reaksiyon; $Q > 0$ ise ekzotermik, $Q < 0$ ise endotermiktir. $Q = 0$ durumunda ise esnek saçılmalar gerçekleşir.

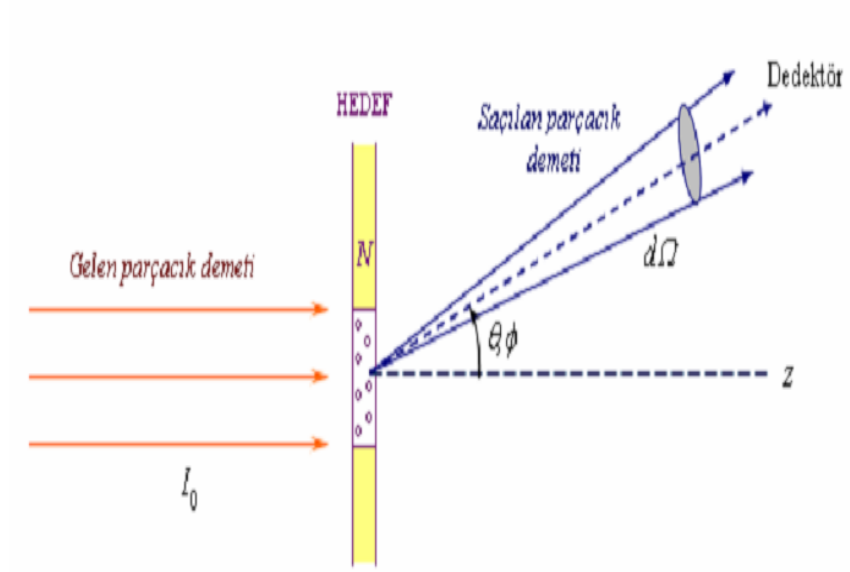
2.1.1.Nükleer reaksiyon tesir kesiti

Tesir kesiti, gelen parçacık akışındaki azalmayı hesaplamak amacıyla ortaya atılmış bir kavramdır. Bir nükleer reaksiyonun tesir kesiti, sözü edilen nükleer reaksiyonun meydana gelme ihtimalinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir.

Tesir kesiti birimi barn (b)'dır ve $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$ dir. Yani tesir kesiti alan boyutunda bir büyüklüktür. Genel olarak baktığımızda, gelen parçacık tesir kesiti ile belirtilen büyüklükteki bir alanın içine düşerse hedef ile etkileşmeye girmektedir. Etkileşmenin çeşidine ve hedefin büyüklüğüne göre etkileşmenin olduğu alan değişeceğinden, her element ve çekirdeğin her etkileşme türü için ayrı bir “tesir kesiti” vardır.

Gelen parçacıklar hedef çekirdekleriyle etkileştiklerinde, her zaman sadece bir tür nükleer reaksiyon meydana getirmesi gerekmez. Birden fazla türde reaksiyon gerçekleşmişse bir tür tesir kesiti genellikle farklı olacaktır. Ortaya çıkan bu özel tesir kesitlerine *kısmi tesir kesiti* denir. Toplam tesir kesiti bunların toplamına eşittir.

Nükleer reaksiyon veya saçılma meydana geldikten sonra yayınlanan parçacıklar çoğu kez anizotropik dağılım göstermektedirler. Aynı zamanda farklı açılarda farklı enerjilere sahip olurlar. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, geliş istikametiyle θ açısı yaparak saniyede $d\Omega$ katı açısı içine düşen parçacıkların sayısının bilinmesi önemlidir. Bunun hesabının yapılabilmesi için açıya bağımlı bir tesir kesiti türü taktim edilir ve buna diferansiyel tesir kesiti adı verilir. Diferansiyel tesir kesiti, birim katı başına düşen tesir kesiti olarak ifade edilir.



Şekil 2.1. Bir saçılma deneyine ait deneysel düzenek (Kürkçüoğlu, 2006)

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (2.3)$$

$$\sigma_T = \int_T \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.4)$$

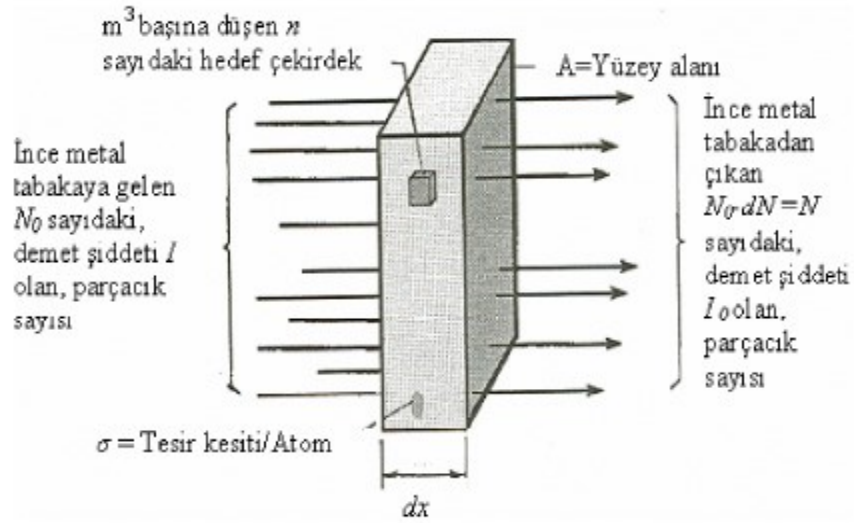
$$d\Omega = \frac{\text{alan}}{\text{mesafe}^2} = \frac{dA}{r^2} = \frac{(rd\theta)(r\sin\theta d\phi)}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.5)$$

$$\Omega = 4\pi \quad (2.6)$$

$$\frac{d\Omega}{\Omega} = \frac{A}{r^2} \frac{1}{4\pi} = \frac{A}{4\pi r^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma_T = 2\pi \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin\theta d\theta \quad (2.8)$$

$$\frac{d\theta}{d\Omega} = \sigma(\theta) \quad \text{diferansiyel tesir kesiti} \quad (2.9)$$



Şekil 2.2. İnce metal tabaka üzerine gelen parçacık demetinin etkinleştirilmesi

A: yüzey alanı

I: kalınlığı dx olan ince metal tabaka üzerine gelen N_0 sayıdaki parçacık demetinin şiddeti

N: ince metal tabakanın birim hacmi başına düşen hedef çekirdeğin sayısı

Ndx : Birim yüzey başına düşen çekirdek sayısı

$Andx$: A Yüzey alanındaki toplam çekirdek sayısı

olarak kabul edelim. İnce metal tabakaya gelen parçacık demetinin σ etkin alanına düşmesi ile oluşan nükleer reaksiyon için toplam etkin alan σ_T ifadesi;

$$\sigma_T = An\sigma dx \quad (2.10)$$

şeklindedir. Toplam etkin alan (σ_T) ifadesinin, A yüzey alanına oranı, çekirdeğin etkin alan kesri (f) ifadesini verir:

$$f = n\sigma dx \quad (2.11)$$

Etkin alan kesri, gelen demetin I şiddetindeki dl değişimine bağlı bir büyüklüktür.

Aralarındaki ilişki;

$$dl = -fl \quad (2.12)$$

ifadesi ile gösterilebilir. Eşitlik 2.11'deki Etkin alan kesri, eşitlik 12' de yerine yazılır ise;

$$-\frac{dl}{l} = n\sigma dx \quad (2.13)$$

denklemini elde edilir. Eşitlik 2.13' deki negatif işaret, tabakanın dx kalınlığı ile gelen parçacık demetinin I şiddetinin ters orantılı olmasından ötürüdür. Bu denklemin integrali alınır ise;

$$I = I_0 e^{-n\sigma x} \quad (2.14)$$

denklemini elde edilir.

Gelen parçacık demetinin şiddeti I , metal tabakaya gelen parçacık sayısı N_0 ince metal tabakadan geçen parçacık demetinin şiddeti I_0 , metal tabakadan geçen parçacık sayısı N ile orantılı olduğundan eşitlik 2.14;

$$N = N_0 e^{-n\sigma x} \quad (2.15)$$

olarak yazılabilir (A. P. Arya, 1966).

2.2.Radyoizotoplar ve Kullanım Alanları

Radyoizotop, bir elementin radyoaktif izotopudur. Bütün elementlerin bir veya daha fazla radyoizotopu vardır. Örneğin; hidrojenin ^1H (hidrojen), ^2H (döteron) ve ^3H (triton) olan üç radyoizotopundan ^3H radyoaktiftir. Günümüzde bilinen radyoizotopların sayısı 1000'in üzerindedir. İzotopların kimyasal özellikleri aynıdır. Tek farkları; fazla nötronu olan izotopun atomlarının diğerlerinden biraz daha ağır olmasıdır.

Bilimsel çalışmalarda ve sanayideki yararlarından dolayı birçok radyoizotop yapay olarak hazırlanmaktadır. Bunlar, kararlı izotopların nükleer reaksiyonlar yoluyla hızlandırılmış parçacıklar tarafından bombardıman edilmesiyle elde edilir. Böylece, yarılanma süreleri çok geniş bir dağılım gösteren, çok sayıda radyoizotop elde edilebilmektedir.

Radyoizotoplar bilimde, teknikte, tıpta, tarımda, bütün hizmet dallarında çok yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Kemoterapide kanser tedavisinden arkeolojide yaş tayinine, üretilen malzemedeki kusurların tespitinden radyoizotop yol lambalarına kadar birçok alanda radyoizotoplar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uydularda da radyoaktif enerji kaynakları kullanılmaktadır. Uydulara ve diğer uzay araçlarına yerleştirilen çok sayıda cihazın gerektirdiği ortam ısısını ve elektriği üretmek üzere farklı fiziksel temellere dayanan başlıca üç tür enerji kaynağı geliştirilmiş durumdadır. Bunlardan biri küçük tip nükleer reaktörlerdir. Diğer ikisi güneş enerjisi ve radyoizotop enerjisi ile çalışan üreteçlerdir. ABD (Amerika Birleşik Devletleri) 1978 yılına kadar uzaya göndermiş olduğu uydularda yalnız bir kez nükleer reaktör, 20 kez radyoizotop enerji paketi ve çoğunluğunda ise güneş enerjisi hücresi kullanmıştır. Uzaya ilk radyoizotop üretici 1961 yılının sonbaharında fırlatılmış olan Amerikan Transit uydusuyla gönderilmiştir. Uydularda radyoizotop enerjisi kullanılması, diğer enerji kaynaklarından daha avantajlıdır.

Kutup istasyonlarında da radyoizotop enerji üreteçleri kullanılmaktadır. Kutupların çevresinde, yılın ancak belli aylarında ulaşılabilen bölgelerde insansız çalışmak üzere kurulmuş bulunan hava tahmin istasyonlarında cihazlar için gerekli ortam ısısı ve elektrik en güvenilir şekilde radyoizotoplar sayesinde sağlanabilmektedir. Bu tür kaynaklardan ilki 1961 yazında, kuzey kutbuna sadece 1300 km uzakta bulunan Axel Heiber adasındaki hava tahmin istasyonuna kurulmuştur. Kullanılan izotop Stronsyum-90 olup yarı ömrü 28,5 yıldır.

Trityum radyoizotopundan enerji alan trafik lambaları da yapılmıştır. Bu trafik lambaları elektrikli olanlar kadar parlak değildir. Verdikleri ışık gece ancak 50-60 m uzaklıktan görülebilir. Ancak elektriğin götürülmesinin pahalı olduğu تنها köy yollarında kullanımı oldukça avantajlıdır.

Sineklerle mücadelede de radyoizotoplardan yararlanılmaktadır. Afrika'da uyku hastalığı taşıyan sineğin dişisinin ömür boyu sadece bir kez çiftleştiği, fakat bundan sayılamayacak kadar çok yumurta meydana getirdiği saptanmıştır. Radyasyonla canlıların kısırlaştırılabildiği bilinmektedir. Bu bilgi doğrultusunda hareket ederek, uyku hastalığı sineğinin erkekleri kısırlaştırılarak araziye salınmaktadır. Kısır erkekle çiftleşen dişi sinek üreme yapamadığından sinek nesli zamanla azalır.

Radyoizotoplarla yaş tayininde Karbon-14 radyoizotopu kullanılmaktadır. Bu radyoizotop hem kısa sürede kendiliğinden oluşabilmekte hem de yapay olarak üretilmektedir. Willard Frank Libby, paleontolojik devirlerden veya tarihin derinliklerinden arda kalan kalıntıların yaşlarının tayininde yeni ve şaşmaz bir yöntem olarak Karbon-14' ün kullanılabilceğini kanıtlamış ve bu buluşuyla 1960 yılında Nobel Ödülü ' nü kazanmıştır. Libby bu yöntemle son yaşanan buzul çağının zannedildiği gibi 25000 yıl önce değil, 10000 yıl önce yaşandığını; Mezopotamya ' da çiftçiliğin 7000 yıl önce başladığını; Teotihuacan (Meksika) güneş piramidinin zannedildiği gibi 15000 yıllık değil, sadece 3000 yıllık olduğunu ve benzeri daha birçok tarihi yanılığın ortaya çıkarmıştır. Yaşayan her türlü canlı yapısında (biyosferde) yer alan karbon içinde, radyoaktif olan ve olmayan izotopların oranı yeryüzünün her yanında ve tarihin bütün dönemlerinde aynı olup 10^{-12} (trilyonda bir)' dir. Buna göre; yaşayan bitki, hayvan ve insan yapısında bulunan her gram karbon içerisinde dakikada 16 radyoaktif bozunum olur. Her bozunumdan bir adet 0,2 MeV maksimum enerjide ve eksi elektrik yüklü beta parçacığı yayınlanır. Canlı ölüp besin çevriminden çekilince, yeni karbon takviyesi kesildiği için, bünyesinde bulunan radyo karbon, bu radyoizotopun 5736 yıl olan yarı ömrü ile azalmaya başlar. Bahsedilen sürenin sonunda fosilin bulunduğu beher gram karbon başına dakikada 8 beta, iki yarı ömür (11.472 yıl) sonra ise 4 beta yayınlayacaktır. Duyarlı teknikler sayesinde 10 yarı ömre kadar azalan radyo karbon aktiviteleri ölçülebilmektedir. Ağaç, kemik, kâğıt vb. kalıntılarla karbonlaşmış kalıntıların (kömür, petrol) arkeolojik ve jeolojik yaş tayinleri bu sayede mümkün olabilmektedir. Sonuç olarak Karbon- 14, geçmişe uzanan bir saat gibidir.

Tıp ve endüstride kullanılan radyoizotoplar reaktör veya hızlandırıcılar kullanılarak üretilmektedir. SPECT ve PET radyoizotoplarının üretiminde siklotronlar hızlandırıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PET ve SPECT radyoizotopları katı, sıvı ve gaz formundaki hedeflerin siklotrondan hızlandırılan parçacık veya iyonlarla (p, d, ^3H , ^3He , ^4He) bombardıman edilmesi sonucu elde edilmektedir.

2.2.1.Radyoizotopların Tıpta Kullanımı

Nükleer tıp, vücut görüntülemesi ve hastalıkların tedavisinde güvenli, acısız ve etkin teknikler kullanan bir uzmanlık alanıdır. Nükleer tıpta hastalığın teşhisi ve tedavisi için radyoaktif maddelerin radyofarmasotik şekli yaygın olarak kullanılmaktadır. Radyofarmasotikler belirli organlara, kemiklere veya dokulara bağlanır. Yayınlanan alfa, beta ve gama ışınları özel dedektörler ile dedekte edilebilir. Bu dedektörler bilgisayarla birlikte çalışarak, vücutta hastalık tanısında kullanılırlar. Nükleer tıptaki cihazların ve süreç sisteminin hızla gelişmesi, bu alana ilgiyi arttırmaktadır. Vücuda verilen radyoaktif maddeler ve vücut derinliklerine nüfus eden radyasyonlar, istenmeyen hücreleri yok edebilirken, sağlıklı hücrelere de zarar verebilirler. Bu durumda radyofarmasitiğin istenilen organ ya da bölgeye temas etmesi gerekir.

Radyoizotop, insanın kan dolaşımına katılabilir. Radyoaktivite atomsal ölçekte bir olay olduğundan kana verilecek radyoaktif madde miligram veya mikrogram ölçeğine kadar azaltılarak, bir yan etki (kan zehirlenmesi) yapması önlenebilir.

Radyoizotopun vücuttaki hareketi dışarıdan, vücuda hiç temas etmeden, elektronik algılayıcı ile izlenebilir. Böylece kan dolaşımının, kalbin, akciğerin, böbreğin, vb. organların çalışmaları kontrol edilebilir. Tiroit bezi kandaki iyodu 24 saatte toplayıp alır ve bir o kadar zaman içinde de yok eder. Hastaya İyot-131 (yarı ömrü 8 gün) izotopu verilirse bu faaliyet dışarıdan izlenebilir. Eğer bu fonksiyon uzun sürüyorsa tiroit bezinin tembel çalıştığı veya aksine çok kısa sürüyorsa hastanın hipertiroidden muzdarip olduğu deneysel olarak kanıtlanır. Fosfor-32 (yarı ömrü 14,3 gün) kanser ameliyatına hazırlanan hastaya enjekte edilir. Normal hücrelerden çok daha aktif olan tümörlü hücreler, daha fazla kan ve dolayısıyla daha fazla radyoaktif fosfor alırlar. Böylece radyoaktif fosforun daha yoğun olduğu tümörlü bölge kolayca belirlenerek, gerekli müdahale yapılmış olur.

Altın-198 (yarı ömrü 2,5 gün) tıpta çok kullanılan bir diğer radyoizotoptur. Kan, bu

radyoizotopu vücudun herhangi bir yerindeki tümöre taşır ve yayınladığı gama ile tümörü içten ışınlar. Başlangıç halindeki tümörlerde bu tedavi yeterlidir, hasta için daha sarsıcı olan radyo kobaltla dıştan ışınlamaya gerek kalmayacaktır.

Ksenon-133 (yarı ömrü 5,3 gün) radyoaktif ve asal bir gazdır. Ciğerlere az bir miktar verilirse bu organın sağlığı ve işleyişi dışarıdan gözlenebilir ve görüntüsü alınabilir.

Çizelge 2.1. Bazı Radyoizotoplar ve tıptaki kullanım alanları

RADYOİZOTOP (yarıömrü)	RADYOFARMASOTİK KİMYASAL ŞEKLİ	TIP UYGULAMALARI
Br-82 (36 saat)	Sodyum Bromür	Hücre dışı miktarı tayini
Ca-47 (4,7 gün)	Kalsiyum Klorür	Kalsiyum metabolizması
Cr-51 (27,8 gün)	Sodyum Kromat Kırmızı yuvarlara etilenmiş, Serum albüminine etilenmiş, EDTA	Kan hacminin tayini, kırmızı yuvarların ömrünün tayini, dalak sintigrafisi, bağırsakta proteik kaybın araştırılması
Cu-64 (12,8 saat)	Bakır Sitrat	Bakır metabolizmasının İncelenmesi
Fe-59 (45 gün) Fe-55 (2,7 yıl)	Demir Sitrat Demir Sitrat	Eritropiyez incelemeleri Eritropiyez incelemeleri (Çok az tercih edilmektedir.)
I-125 (60 gün) I-131 (8,04 gün) I-132 (2,3 saat)	Sodyum İyodür Oleik Asit Cholographine Fibrinogene Lipiodol Bengal Pembesi Serum Albüm	Bağırsak obsorsiyonu, Kan hastalıkları, radioimünolojik, araştırılma, tümörlerin lokalizasyonu, nefrogram çıkartılması, lenfatik sistemin durum incelemesi, akciğer sintigrafisi, karaciğer sintigrafisi, karaciğer incelenmesi, kan hacminin incelenmesi, hormon metabolizması, yağların sindiriminin incelenmesi

Çizelge 2.1(Devam). Bazı radyoizotoplar ve tıptaki kullanım alanları

K-32 (12,5 saat)	Potasyum Klorür	Değişebilir potasyum elektrolitinin ölçülmesi
Se-75 (120 gün)	Sodyum Selenit	Tümörlerin lokalizasyonu
Na-24 (15 saat)	Sodyum Klorür	Değişebilir sodyumun ölçülmesi
Tc-99m (6 saat)	Sodyum Perteknetat Teknesyum Sülfür Koloidi Demir-askorbat Kompleksi Serum Albümin Macroaggregate Polyfosfat Mikrokürecik (microsphere)	Tiroid sintigrafisi, Karaciğer sintigrafisi, radyokardiogram, kanın incelenmesi
Hg-197 (23 saat) Hg-203 (65 saat)	Cıva Klorür Neohidrin-Hg-197 Neohidrin-Hg-203	Böbrek sintigrafisi Böbreklerin incelenmesi
Kr-85 (10,6 yıl)	İzotonik çözelti içinde gaz	Akciğer incelenmesi
Mg-28 (21,4 saat)	Magnezyum Klorür	Hücre metabolizmasında Mg değişkenliği
Au-198 (2,7 gün)	Koloidal çözeltisi	Karaciğer ve andotelial Sistemi incelemesi
P-32 (14,54 gün)	Sodyum fosfat	Tümörlerin lokalizasyonu

Görüldüğü gibi insan vücuduna verilen radyoizotopların kısa yarı ömürlü olmasına dikkat edilir(Seyrek. E., 2007).

2.3.SPECT (Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayarlı Tomografi)

SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)' in tarihi, Avusturyalı matematikçi J. Radon tarafından 1917 yılında yayınlanan, iki ya da üç boyutlu bir objenin çeşitli açılar altındaki görünülerinin yeniden elde edilebileceğini vurguladığı yazısına dayanmaktadır. 1922' de radyolojide X-ışını tüpü hasta üzerine döndürülerek tomografi denemeleri yapılmıştır. Obje üç boyutlu olduğundan, ancak bilgisayarlı tomografinin geliştirilmesi ile yapısal oluşumu düzenlenebilmiştir. 1963'te Kuhl ve Edvard emisyon tomografisini geliştirmişler, osiloskop kamera ile elde ettikleri projeksiyon görüntülerini depolamayı başarmışlardır. Gama kamerayı icat eden Hal Anger sayesinde, bu görüntüler yeniden elde edilebilmiştir.



Şekil 2.3. Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayar Tomografisi

1967' de Hal Anger, hastanın etrafında dönebilen bir kamera tezi sunmuştur. Bu tezin uygulamaya geçmesi on yıllık bir zaman almıştır. Kamera hastanın etrafında döndükçe planer imajın oluşumuna yarayan bilgileri toplayarak bilgisayara gönderir. Elde edilen veriler sayısal değerlere çevrilerek piksellere kaydedilir. SPECT teknikleri iki boyutlu görüntülerin her setinden üç boyutlu görüntülerin elde edilmesine olanak sağlar (Cantez, 1992).

2.4.PET (Pozitron Emisyon Tomografisi)

PET, nükleer tıpta kullanılan en modern ve en ileri tanısal tekniklerden biridir. Görüntüleme maddesi olarak radyoaktif bileşikler (radyofarmasötik) veya bir radyoaktif maddenin kendisi (radyonüklid), görüntülenecek yere uygun bir şekilde verilerek görüntüleme yapılır. Radyonüklidlerin üretildiği alet siklotron, görüntülemenin yapıldığı alet ise PET tarayıcısıdır. Bu görüntüleme tekniği özellikle tekrarlanan kanser vakalarının erken teşhisi başta olmak üzere, beyin ve kalple ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır.

Günümüzde özellikle PET uygulamaları için ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O ve ^{18}F pozitron yayan radyoizotopları üretilmektedir. ^{11}C , ^{13}N ve ^{15}O radyoizotopları kısa ömürlü olduklarından, tıp merkezi ve yakın çevresinde üretilmeleri gerekir. ^{18}F diğerlerine göre daha uzun ömürlüdür ve birkaç yüz kilometre uzaktaki üretim sitesinden PET merkezlerine taşınabilmektedir. Tanısal görüntüleme alanında sürekli gelişim gösteren yavaş metabolik süreçlerin incelenmesi için, daha uzun ömürlü pozitron yayıcı gerekmektedir.



Şekil 2. 4. Pozitron Emisyon Tomografisi

^{75}Br ve ^{77}Br radyoaktif çekirdekleri 1980' lerin ortalarına kadar PET ve SPECT çalışmalarında kullanılmıştır. ^{76}Br ise 1980-1990 yıllarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Önemi son yıllarda daha da artmaktadır.

3. NÜKLEER MODELLER

Nükleer bir reaksiyonla radyoizotop elde edebilmek için; hızlandırıcılardan, reaktörlerden veya radyoaktif bir kaynaktan çıkan, belli bir enerjiye sahip parçacıklar belli bir hedef üzerine gönderilmektedir. Deneylerden önce ve sonra teorik hesaplarla oluşacak olan tesir kesitinin ve çıkacak olan parçacıkların spektrumlarının, modellerin tutarlılığı göz önüne alınarak incelenmesi, hem zaman kaybını engellemekte, hem de gereksiz masraftan kaçınılmasını sağlamaktadır. Bu teorik tesir kesiti ve spektrum değerleri, bazı nükleer paket modeller kullanılarak hesaplanabilir. Nükleer modeller sayesinde; daha deneyi yapılmamış, yüksek mertebeli enerjilere sahip parçacıkların bombardıman sonrası oluşacak yeni izotopları ile parçacığın tesir kesiti ve spektrumların hesabı mümkündür (Millazzo, 1974).

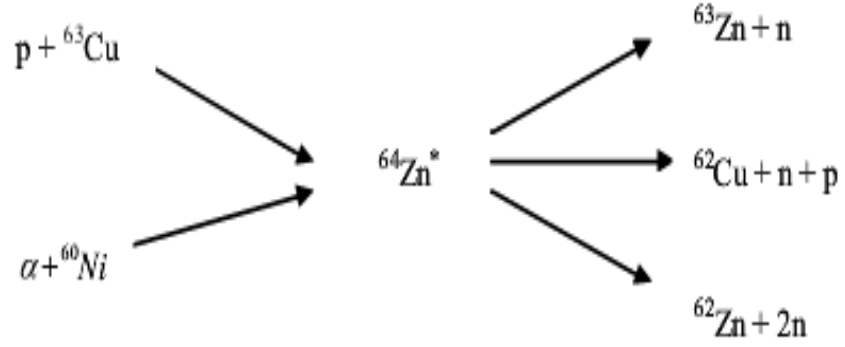
3.1. Bileşik-Çekirdek Reaksiyonları

Bombardıman parçacığı, çekirdek yarıçapına göre küçük bir çarpışma parametresi ile hedef çekirdeğe geldiğinde, gelen nükleonun hedef çekirdek nükleonlarıyla ardışık etkileşim yapma ihtimali bulunmaktadır. Birkaç ardışık etkileşmeden sonra gelme enerjisi, gelen parçacık ve hedef çekirdek bileşik sisteminin nükleonları arasında paylaşılır. Bu etkileşimlerin sonucunda nükleonlar arası enerjilerdeki istatistiksel dağılımla birlikte, çekirdekte bulunan bir nükleonun salınma olasılığı artar.

Gelen parçacığın soğurulması ve çıkan parçacığın (veya parçacıkların) yayınlanmasından önceki bu süreç, bir ara durumu oluşturur. Bu ara duruma **bileşik çekirdek** adı verilir. Sembolik olarak;

$$a + A \rightarrow C^* \rightarrow B + b \quad (3.1)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada C^* bileşik çekirdeği ifade etmektedir. Belirli bir bileşik çekirdek, farklı yollarla bozunabilir. Bileşik çekirdeğin bozunma olasılığı, bileşik çekirdeğin oluşum sürecinden bağımsızdır. Bozunma olasılığı, yalnızca sisteme verilen toplam enerjiye bağlıdır. Örneğin; Zn^* bileşik çekirdeği, aşağıdaki şekildeki gibi birçok reaksiyon süreci ile oluşabilir ve birçok değişik yolla bozunabilir.

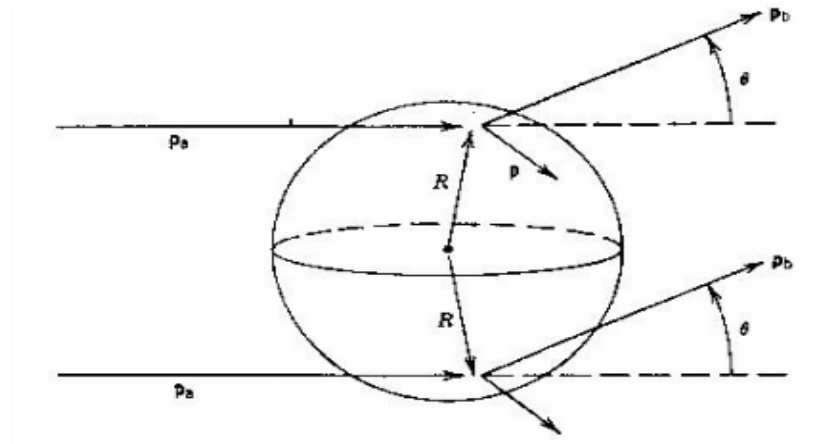


Şekil 3.1. ${}^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdeği için farklı oluşum ve bozunum durumları

Bileşik çekirdeğinin oluşumu sonrasında farklı çıkış kanallarına karşılık gelen tepkime kesitleri Şekil 3.1.'de verilmiştir. Bu tepkime kesitleri, bileşik-çekirdek modelinin temel varsayımları ile uyumludur.

3.2.Doğrudan (Direk) Reaksiyonlar

Bu reaksiyonlarda gelen bombardıman parçacık öncelikle hedef çekirdeğin yüzeyindeki nükleonlar ile etkileşir. Gelen parçacığın enerjisi arttıkça, parçacığın dalga boyu, çekirdek içi nükleonla etkileşecek kadar düşer. Bu etkileşim Şekil 3.2.'de gösterilmektedir:



Şekil 3.2. Çekirdek yüzeyinde meydana gelen doğrudan tepkimelerin geometrisi

Bu tepkime doğrudan reaksiyonları oluşturmaktadır. Söz konusu reaksiyonla, bir kabuk durumuna bir tek nükleon eklendiği veya koparıldığı için doğrudan reaksiyonlar, çekirdeğin kabuk yapısının incelenmesine ve ürün çekirdeğinin birçok uyarılmış durumuna ulaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Doğrudan reaksiyonları, bileşik reaksiyonlardan ayıran temel fark; doğrudan reaksiyonların 10^{-22} saniye kadar kısa bir zamanda meydana gelmesidir. İki reaksiyon için belirlenen açisal dağılımda ise direk reaksiyonların daha keskin piklere sahip olduğu gözlenmiştir.

3.3.Denge Öncesi Reaksiyonlar

Denge öncesi reaksiyonlarda parçacıklar, iki nükleer sistemin çarpışarak bir bileşik sistem oluşturmasıyla, bu sistemin bir termal veya istatistik dengeye ulaşması arasında geçen süre içerisinde yayınlanırlar. Bu durum, özellikle yayınlanan parçacık spektrumunun yüksek enerji kısmında oldukça önemlidir.

Denge öncesi reaksiyonları inceleyen başlıca modeller:

1. Full Exciton Modeli
2. Hybrid Modeli
3. Geometri Bağımlı Hybrid Modeli
4. Cascade Exciton Modeli

Bunlardan sadece Cascade Exciton Modeli yüksek enerji mertebesine kadar hesaplama yaparken, diğer üç model orta enerjili denge öncesi reaksiyon hesaplamaları yapabilmektedir. Bütün modeller istatistiksel yöntemleri içerir. Bu modeller kullanılarak, yayınlanan parçacıkların enerji spektrumları ve tesir kesitleri hesaplanabilmektedir. Bu sayede deneyler yapılmadan önce, sonuçları ile ilgili bilgiler edinilebilmektedir (Kalbach, 1975).

4. YÖNTEM VE MATERYALLER

Tesir kesitleri, nükleer reaksiyonlar için büyük bir önem taşımaktadır. Tıpta da yoğun bir şekilde yararlanılan tesir kesitleri, reaksiyonlardaki hesaplamaların ana kaynağıdır. Nükleer reaksiyonların oluşumu sırasında materyallerin yapısını etkileyebilecek olan problemlerin öneminin anlaşılabilmesi ve sorunların giderilebilmesi için tesir kesitlerinin ve yayılma spektrumlarının deneysel olarak ölçülmesi, teorik hesaplamalarının yapılması gerekir. Tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanması zaman kaybını önlemektedir. Nükleer fizik uygulamaları hayatın her evresinde karşımıza çıktığından, bu bilim üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu hesaplamalar için çeşitli bilgisayar kodları kullanılabilir. Bunlardan en yaygın ve güncel olanlarından birisi TALYS nükleer reaksiyon simülasyon kodudur. Bu uygulamalardaki önemi ile tesir kesiti de, hesaplamamıza büyük kolaylık sağlamaktadır.

4.1.TALYS Programı

TALYS nükleer reaksiyonların simülasyonu için oluşturulmuş bir yazılımdır. Birçok nükleer modelde TALYS programından yararlanır. TALYS tüm reaksiyon kanalları ve gözlenebilirlerin tam bir açıklamasını sağlar. Temel mikroskobik deneylerin analiz ve uygulamalarındaki nükleer verileri oluşturmak için gerekli olan çok yönlü bir araçtır.

TALYS; doğrudan reaksiyonlar, bileşik reaksiyonlar ve fisyon reaksiyonları için uygun olan en iyi programdır. Bu program, geniş bir enerji aralığında çalıştırılabilir. ECIS-06 kodu ile optik modeli entegre etmektedir. Toplam kesitleri, enerji

spektrumları, açısal dağılımları ve çift diferansiyel spektrumları hesaplamada kullanılır. Bilgisayara bağımlı bir program olup, hesaplamalar birkaç saniye ya da birkaç saat sürecektir. Linux, Unix ve Windows altında kullanılır.

TALYS, özel deneysel verilerle, çeşitli parametreleri kullanarak çok detaylı hesaplamalar yapmamızı sağlamaktadır. Genellikle Linux işletim sisteminde çalışan ve fortran programlama diline sahip, nükleer reaksiyonların analizi ve tahmini için oluşturulmuş bir bilgisayar kod programıdır. Simülasyon reaksiyonlarında, nötron, proton, döteryum, trityum, ^3He , α parçacıkları ve γ ışınları ile 1 keV – 250 MeV enerji bölgesinde çalışılabilir.

TALYS çıktı dosyalarında;

- Esnek, esnek olmayan ve toplam tesir kesiti
- Elastik saçılmada açısal dağılımlar
- Kesikli seviyelerde açısal dağılımlar
- İzometrik ve taban durum tesir kesiti
- Toplam parçacık enerjisi ve çift katlı diferansiyel tesir kesitleri
- Ürün çekirdeklerin oluşum tesir kesitleri

elde edilebilir. Nükleer fizik reaksiyonları için birçok benzetim programı mevcuttur. Bu programlar arasındaki seçim, tamamen programın benzetimi yapabilme kabiliyetine bağlıdır(Koning, 2006).

4.2.Yarı Deneysel Tesir Kesiti Elde Etme İşlemi (Evaluation İşlemi)

1-) Her deneysel enerji değerine karşılık gelen σ_{deney} değeri, bu enerji değerine karşılık gelen σ_{teo} değerine bölünür. ($\sigma_{\text{deney}} / \sigma_{\text{teo}}$)

2-) Elde edilen $\sigma_{\text{deney}} / \sigma_{\text{teo}}$ deęerinin enerjiye (E) göre grafięi çizilir.

3-) Elde edilen bu grafiğe, grafik programındaki ‘‘polynomial fit’’ ile fitting işlemi uygulanır.

4-) Polinomun derecesi ayarlanarak en uygun eğri ve buna karşılık gelen formülü belirlenir.

5-) Böylece enerjiye bağlı bir f(E) normalizasyon ifadesi elde edilir.

6-) Herhangi bir enerji aralığı için $\sigma_{\text{teo}}(E)$ hesapları yapılır.

7-) Yarı-deneysel tesir kesitleri; ($\sigma_{\text{yarıdeney}}(E)$), f(E) normalizasyon ifadesinden elde edilen f (E) normalizasyon katsayıları kullanılarak,

$$(\sigma_{\text{yarıdeney}}(E) = f (E) \cdot \sigma_{\text{teo}} (E) \quad (4.1)$$

formülünden bulunur.

8-) Sonuç olarak $\sigma_{\text{deney}}-E$ ve $\sigma_{\text{yarıdeney}}-E$ değerleri tek grafikte gösterilerek, elde edilmiş olan yarı-deneysel tesirkesitleri ile deneysel tesir kesitleri karşılaştırılmış olur.

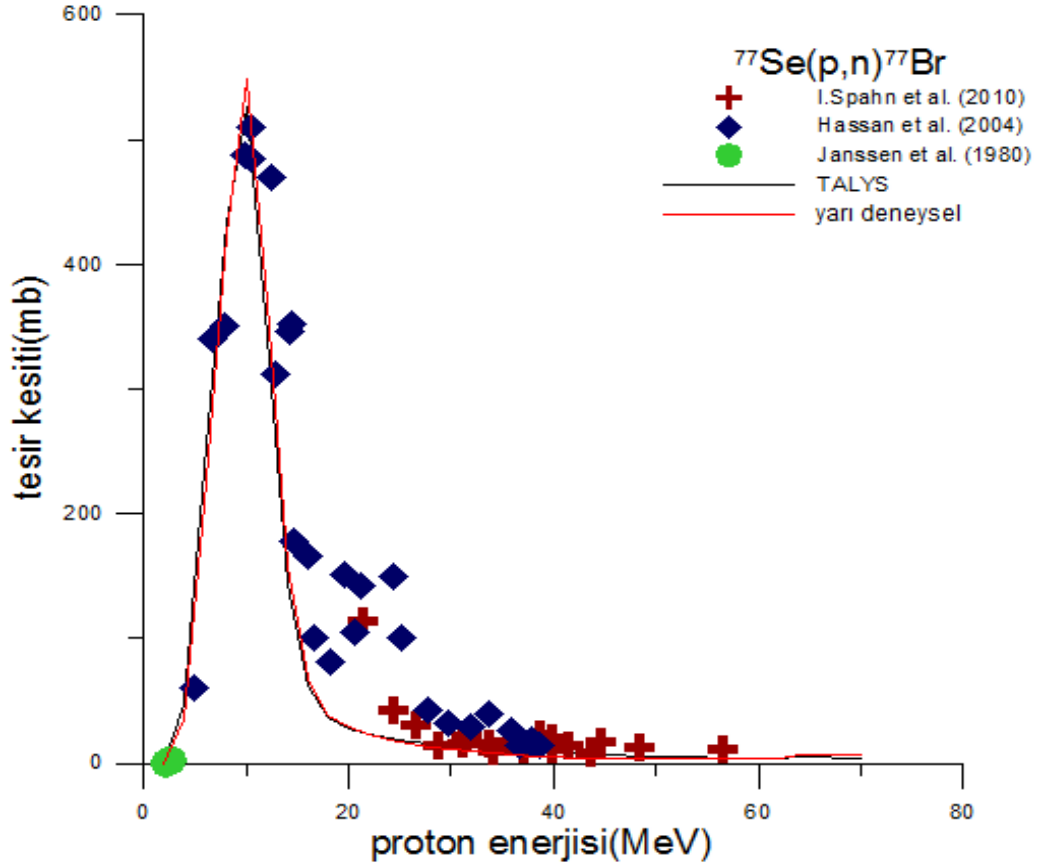
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, standart olarak kullanılan pozitron yayınlayıcılara göre daha uzun ömürlü olan Br-76 ($t_{1/2} = 16,2$ saat) radyoizotopunun üretim metotları incelendi. Bunun için $^{77}\text{Se}(p,n)^{77}\text{Br}$, $^{77}\text{Se}(p,2n)^{76}\text{Br}$, $^{77}\text{Se}(p,3n)^{75}\text{Br}$, $^{78}\text{Se}(p,2n)^{77}\text{Br}$, $^{78}\text{Se}(p,3n)^{76}\text{Br}$, $^{78}\text{Se}(p,4n)^{75}\text{Br}$, $^{75}\text{As}(^3\text{He},2n)^{76}\text{Br}$, $^{75}\text{As}(\alpha, 3n)^{76}\text{Br}$, $^{76}\text{Se}(p, 2n)^{75}\text{Br}$ nükleer reaksiyonları ele alındı ve bu reaksiyonlara ait tesir kesitleri hesaplanarak üretim için en uygun enerji aralıkları belirlendi.

Deneysel veriler için Uluslararası Atom Enerji Kurumu'nun bünyesinde bulunan Deneysel Nükleer Reaksiyon Veri Bankası'ndan (EXFOR) yararlanıldı. Nükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin hesaplanmasında TALYS 1.2 programı kullanıldı. Elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırıldı. Ancak, sonuçların iyileştirilmesi ve deneysel değer bulunmayan enerji bölgelerindeki tesir kesitlerini tahmin edebilmek amacıyla, deneysel verilerden yararlanarak yarı-deneysel tesir kesitleri elde edildi.

5.1. $^{77}\text{Se}(p, n)^{77}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5.1.'de $^{77}\text{Se}(p,n)^{77}\text{Br}$ reaksiyonunun tesir kesitlerine ait hesaplamaların ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.

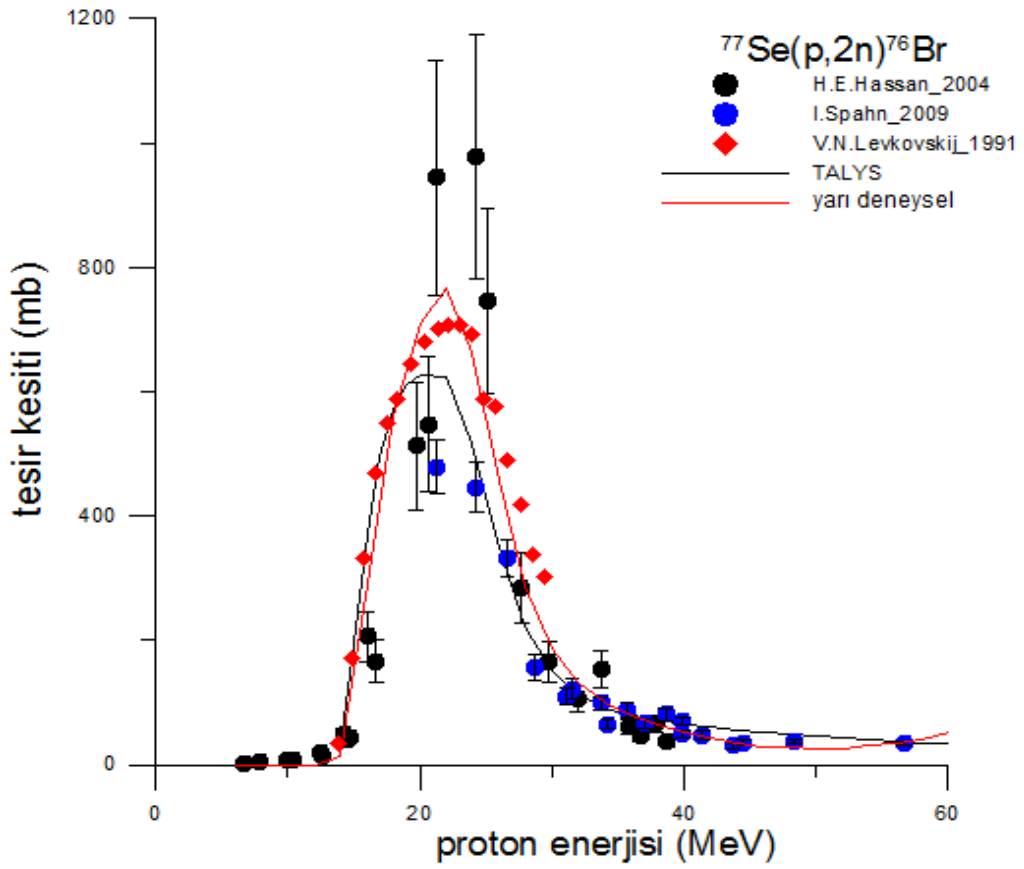


Şekil 5.1. $^{77}\text{Se}(p, n)^{77}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Görüldüğü gibi, 0–20 MeV proton enerji aralığında TALYS 1.2 ve yarı deneysel tesir kesitleri deneysel değerler ile oldukça uyumludur. Ayrıca 10–15 MeV proton enerjilerinde ^{77}Br üretim tesir kesitinin maksimum olduğu görülmektedir. ^{77}Br radyoizotopu da tıbbi uygulamaları olan bir radyoizotop olmasına rağmen, ^{76}Br üretiminde bir izotopik kirlilik oluşturur. Bu sebeple ^{77}Br üretimini en aza indirebilmek için 10–15 MeV'lik proton enerji aralığının dışında çalışılması gerektiği anlaşılmaktadır.

5.2. $^{77}\text{Se}(p,2n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5.2.'de $^{77}\text{Se}(p,2n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonunun tesir kesitlerine ait hesaplamaların ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.



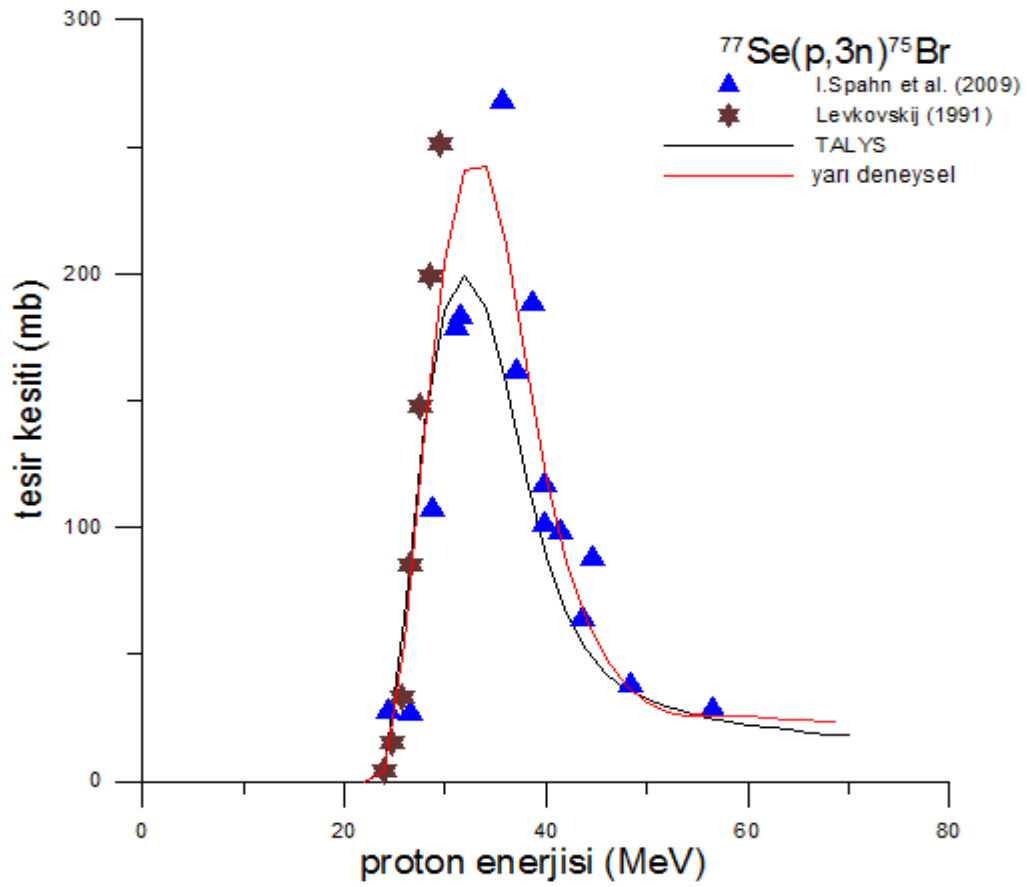
Şekil 5.2. $^{77}\text{Se}(p,2n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi ^{76}Br izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerjisi aralığı 20–25 MeV'dir. Bu enerji aralığındaki TALYS 1.2

hesaplarından elde edilen tesir kesitleri deneysel verilerin altında kalmaktadır. Ancak, ayrıntısı Bölüm 4.2’de anlatılan yarı deneysel tesir kesiti elde etme işlemi sonunda elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyum sağladığı görülmektedir. Sonuçların daha da iyileştirilmesi için daha fazla deneysel veriye ihtiyaç olduğu açıktır.

5.3. $^{77}\text{Se}(p,3n)^{75}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5. 3.’de $^{77}\text{Se}(p,3n)^{75}\text{Br}$ reaksiyonunun tesir kesitlerine ait hesaplamaların ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 5. 3. $^{77}\text{Se}(p,3n)^{75}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

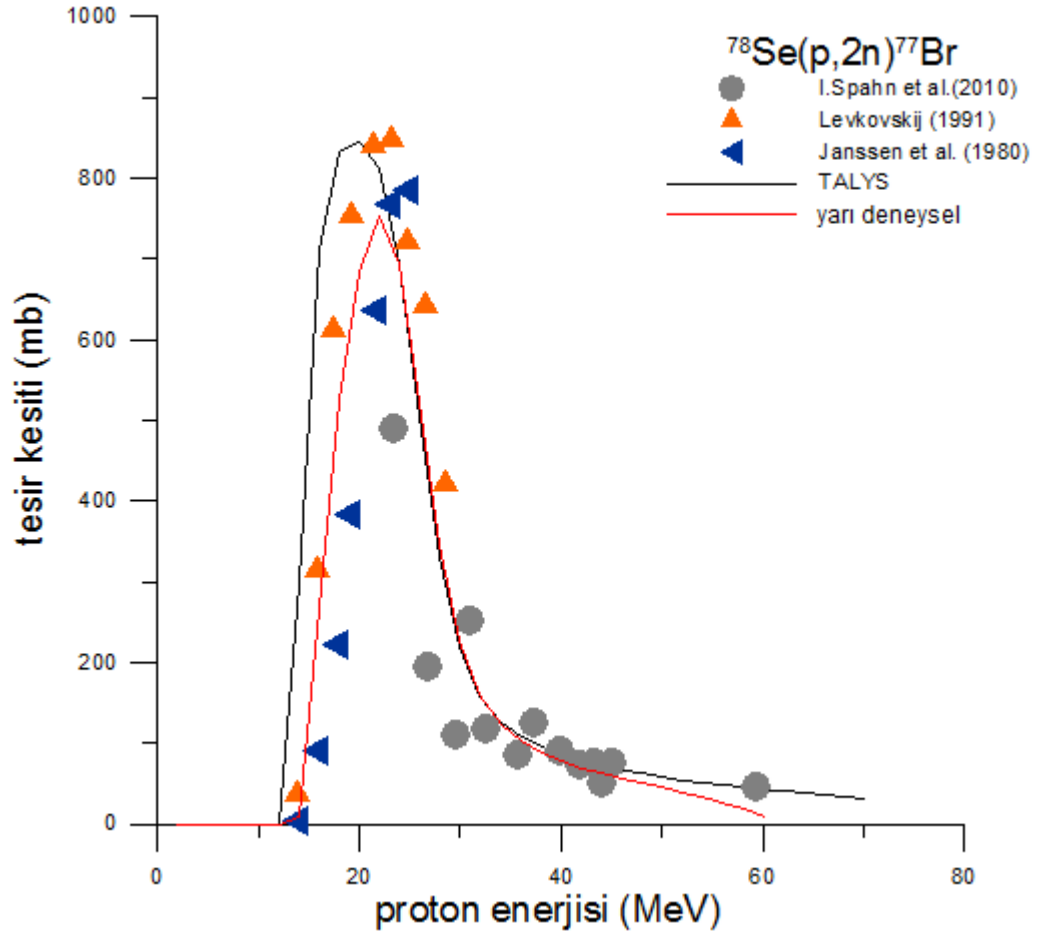
Şekil 5. 3.'de görüldüğü gibi 30–40 MeV proton enerji aralığında ^{75}Br izotopunun üretim tesir kesiti en büyük değerine ulaşır. ^{75}Br radyoizotopu da tıpkı ^{77}Br gibi bir izotopik kirlilik oluşturur. Ancak Şekil 5.3 ve Çizelge 5.1'e bakıldığında bu üretim için eşik enerjisinin 20 MeV'in üzerinde olduğu görülür. Bu sebeple, ^{75}Br üretimini en aza indirebilmek için 30–40 MeV'lik proton enerji aralığının altında çalışılması gerekir. Ayrıca bu reaksiyon için de yarı deneysel tesir kesitleri ile elde edilen sonuçların daha fazla deneysel veriyle uyum sağladığı görülmektedir.

Çizelge 5.1. $p + ^{77}\text{Se}$ reaksiyonları

Reaksiyon	Ürün	Yarı-Ömür (saat)	Maksimum Tesir Kesiti (mb)	Enerji Aralığı (MeV)	Q-değeri (MeV)	Eşik Enerjisi (MeV)
$^{77}\text{Se}(p,n)$	^{77}Br	57	500-550	10-15	-2,147	2,175
$^{77}\text{Se}(p,2n)$	^{76}Br	16,2	750-800	20-25	-13,164	13,336
$^{77}\text{Se}(p,3n)$	^{75}Br	1,6	200-250	30-40	-22,644	22,710

5.4. $^{78}\text{Se}(p,2n)^{77}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5. 4.'de $^{78}\text{Se}(p,2n)^{77}\text{Br}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitlerinin ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.

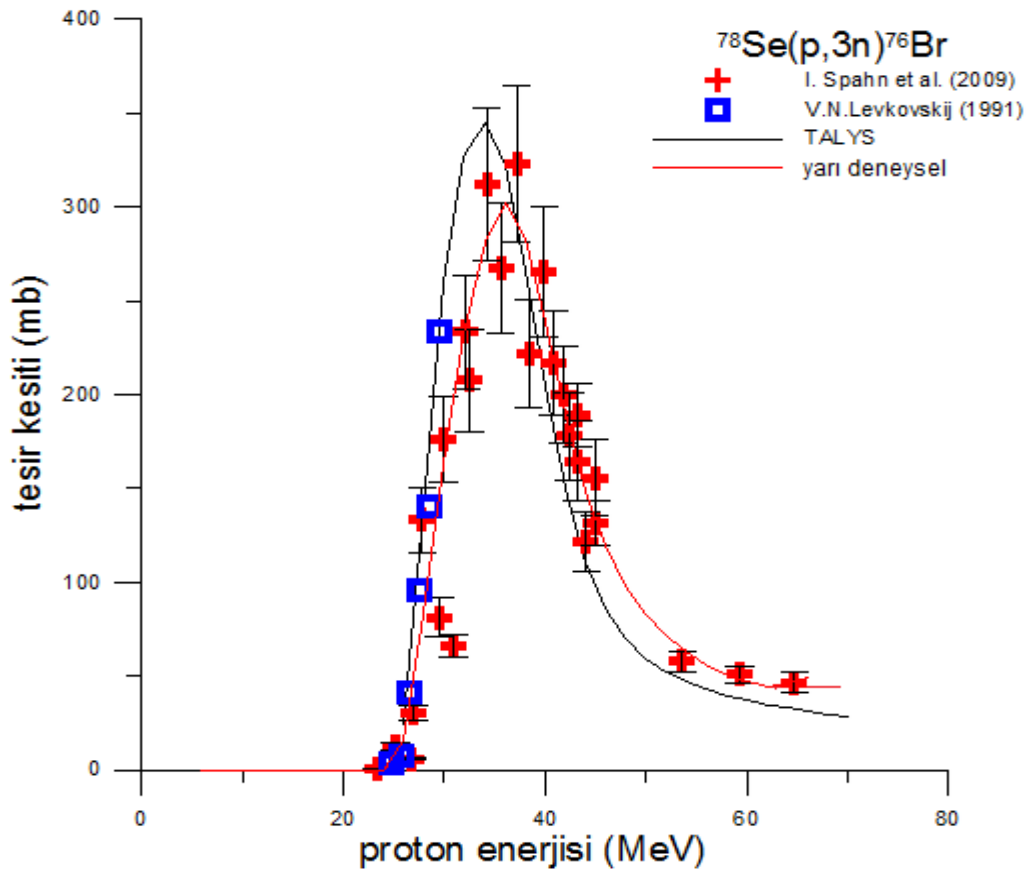


Şekil 5. 4. $^{78}\text{Se}(p,2n)^{77}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Görüldüğü gibi, 20 MeV proton enerjisinin altındaki enerjilerde aralığında TALYS 1.2 deneysel değerlerden oldukça büyük tesir kesitleri verirken yarı deneysel tesir kesitleri deneysel değerler ile daha uyumlu sonuçlar verir. Ayrıca 20–30 MeV proton enerji aralığında ^{77}Br üretim tesir kesitinin maksimum olduğu görülmektedir. ^{76}Br üretiminde bir izotopik kirlilik oluşturan ^{77}Br üretimini en aza indirebilmek için bu enerji aralığının dışında çalışılmalıdır.

5.5. $^{78}\text{Se}(p,3n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5.5.'de $^{78}\text{Se}(p,3n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitlerinin ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.



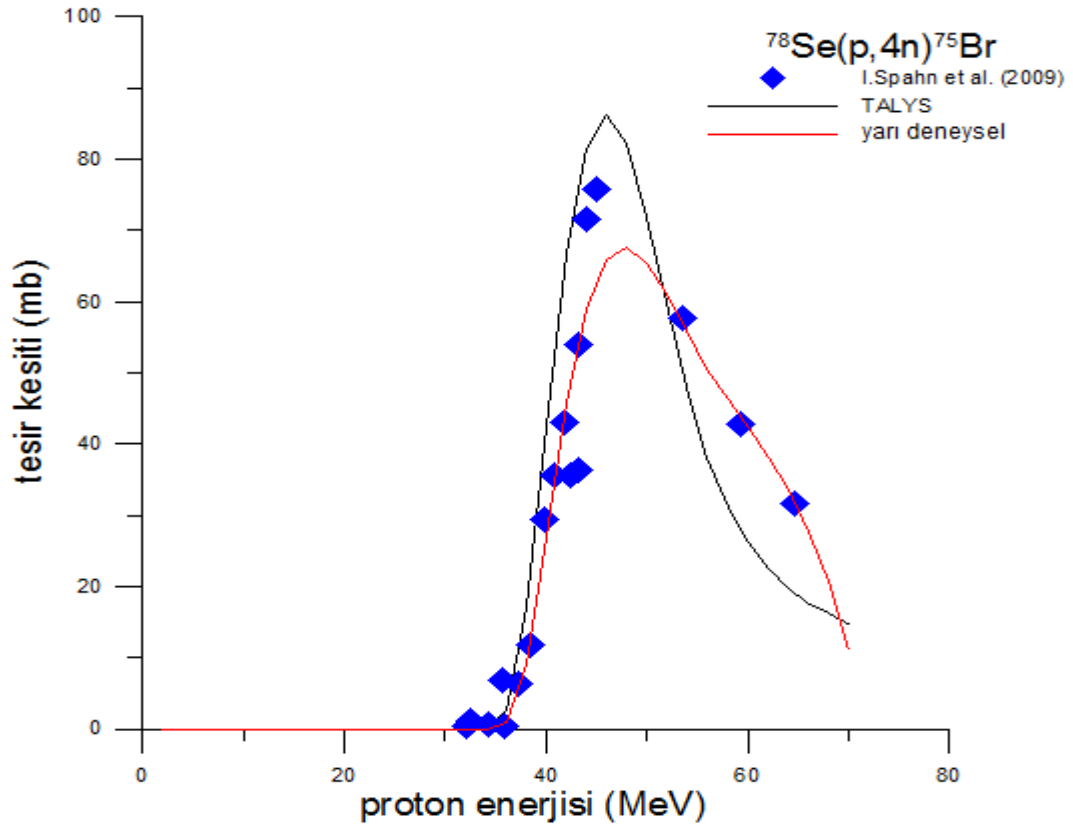
Şekil 5. 5. $^{78}\text{Se}(p,3n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Şekil 5. 5.'den görüldüğü gibi ^{76}Br izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu en uygun proton enerji aralığı 35–40 MeV'dir. Bu reaksiyon için TALYS 1.2

hesaplarından elde edilen tesir kesitleri genel olarak deneysel verilerle uyumludur. Ancak, yarı deneysel tesir kesiti elde etme işlemi sonunda elde edilen sonuçların daha fazla deneysel veriyle uyum sağladığı görülmektedir.

5.6. $^{78}\text{Se}(p,4n)^{75}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5.6.'da $^{78}\text{Se}(p,4n)^{75}\text{Br}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitlerinin ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 5. 6. $^{78}\text{Se}(p,4n)^{75}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

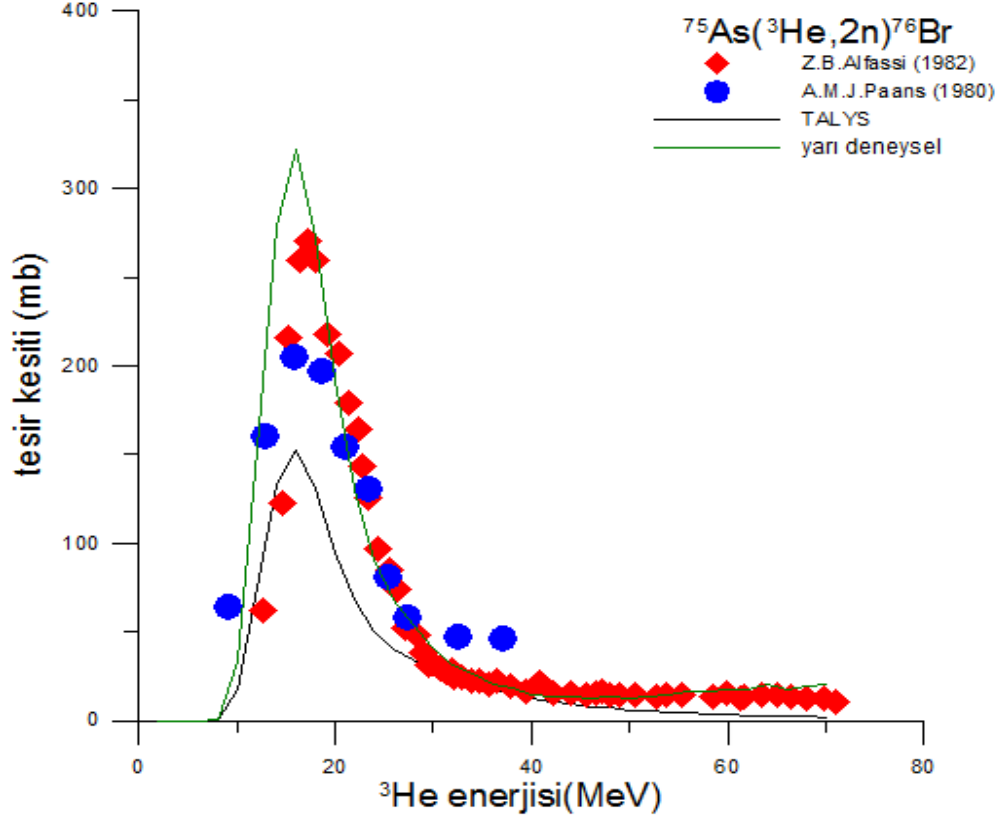
Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi ^{75}Br izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu proton enerji aralığı 45–50 MeV'dir. Çizelge 5.2'den de görüldüğü gibi bu enerji aralığı ^{76}Br üretiminin maksimum olduğu enerji aralının üzerindedir. Böylece ^{76}Br üretimi için seçilecek 35–40 MeV'lik proton enerji aralığı izotopik kirlilikleri oluşturan ^{77}Br ve ^{75}Br üretimini en aza indirecektir.

Çizelge 5. 2. p + ^{78}Se reaksiyonları

Reaksiyon	Ürün	Yarı-Ömür (saat)	Maksimum Tesir Kesiti (mb)	Enerji Aralığı (MeV)	Q-değeri (MeV)	Eşik Enerjisi (MeV)
$^{78}\text{Se}(p,2n)$	^{77}Br	57	700-800	20-30	-12,644	12,808
$^{78}\text{Se}(p,3n)$	^{76}Br	16,2	280-300	35-40	-23,661	23,967
$^{78}\text{Se}(p,4n)$	^{75}Br	1,6	60-70	45-50	-32,915	33,340

5.7. $^{75}\text{As}(^3\text{He},2n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5. 7.'de $^{75}\text{As}(^3\text{He},2n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitlerinin ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.

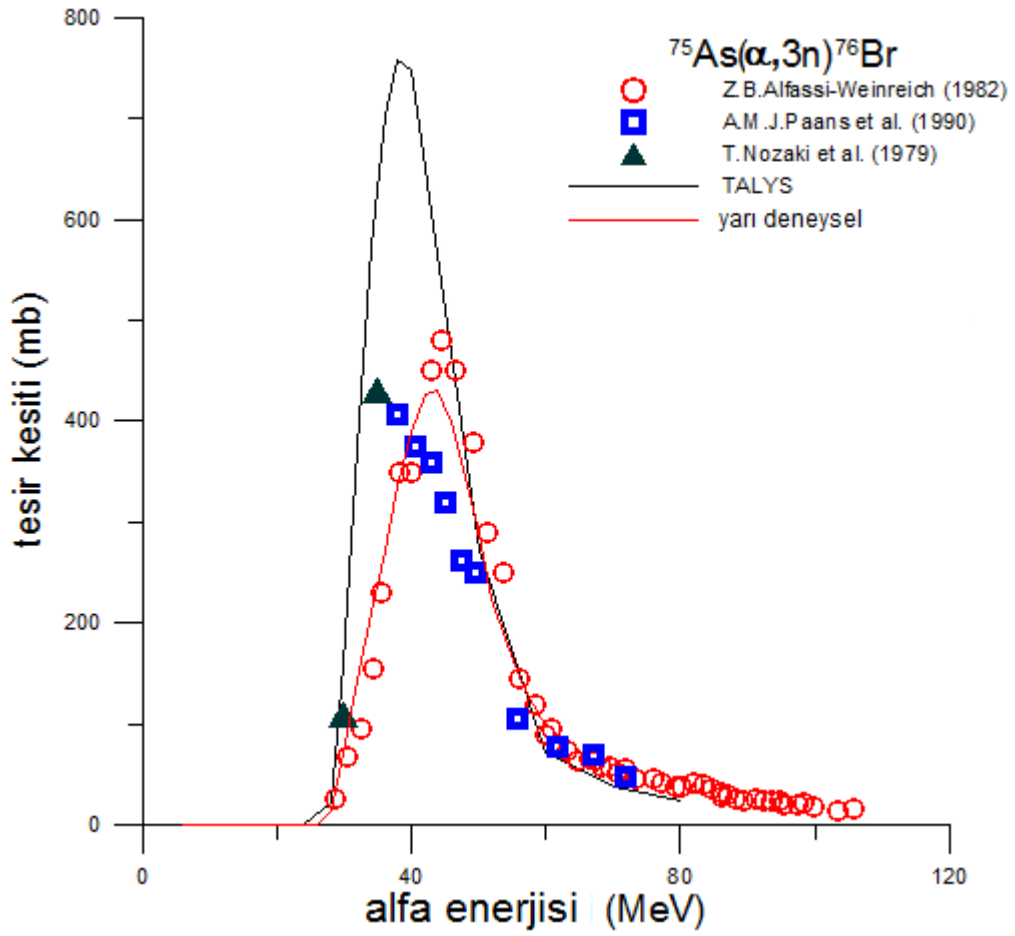


Şekil 5. 7. $^{75}\text{As}(^3\text{He},2n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Şekil 5. 7.'de ^{76}Br radyoizotopunun maksimum üretim tesir kesitinin 20 MeV civarındaki ^3He enerjisinde elde edilebileceği görülmektedir. Dikkat edilirse 0–30 MeV ^3He enerji aralığında TALYS 1.2 tesir kesitlerinin deneysel tesir kesitlerinin oldukça altında kaldığı, yarı deneysel tesir kesitlerinin ise deneysel verilerle çok iyi uyum gösterdiği görülmektedir.

5.8. $^{75}\text{As}(\alpha,3n)^{76}\text{Br}$ Reaksiyonu

Şekil 5.8.'de $^{75}\text{As}(\alpha,3n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitlerinin ve yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel verilerle olan karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 5. 8. $^{75}\text{As}(\alpha,3n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonu için tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.8.'de görüldüğü gibi ^{76}Br izotopunun üretim tesir kesitinin maksimum olduğu

en uygun alfa enerji aralığı 40–50 MeV’dir. 30–50 MeV enerji aralığında TALYS 1.2 hesapları deneysel değerlerden oldukça büyük sonuçlar verirken yarı deneysel tesir kesitlerinin deneysel tesir kesitleri ile uyumu mükemmeldir. Ayrıca Çizelge 5.3’den düşük enerjili ^3He ’lerle ^{76}Br üretiminin mümkün olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5. 3. $^{75}\text{As}(^3\text{He},2n)$ ve $^{75}\text{As}(\alpha,3n)$ reaksiyonları

Reaksiyon	Urün	Yarı-Omür (saat)	Maksimum Tesir Kesiti (mb)	Enerji Aralığı (MeV)	Q-değeri (MeV)	Eşik Enerjisi (MeV)
$^{75}\text{As}(^3\text{He},2n)$	^{76}Br	16,2	300-350 mb	15-20	-3,956	4,115
$^{75}\text{As}(\alpha,3n)$	^{76}Br	16,2	400-450 mb	40-50	-24,534	25,844

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Standart olarak kullanılan pozitron yayınlıyıcılara göre çok daha uzun ömürlü bir pozitron yayınlıyıcı olan ^{76}Br ($t_{1/2} = 16,2$ saat), PET uygulamaları için önemli bir radyoizotoptur.

Bu çalışmada; ^{76}Br radyoizotopunun farklı üretimi için farklı nükleer reaksiyonlar belirlendi. Her bir reaksiyon için TALYS 1.2 bilgisayar programı ile hesaplanan torik tesir kesitleri ve bu çalışmada elde edilen yarı-deneysel tesir kesitleri, Deneysel Nükleer Reaksiyon Veri Bankası'ndan (EXFOR) elde edilen deneysel tesir kesitleri ile karşılaştırıldı. Yarı deneysel tesir kesitlerinin TALYS 1.2 ile elde edilen sonuçlara göre deneysel değerlerle daha fazla uyum sağladığı görüldü.

$p + ^{77}\text{Se}$ reaksiyonları sonucunda 20 MeV'in altında ^{77}Br ve 30 MeV'in üzerinde ^{75}Br izotopik kirlilikleri oluşur. Bu sebeple bu kirlilikleri en aza indirebilmek amacıyla 20–30 MeV'lik proton enerji aralığında çalışılması ^{76}Br üretimi için daha verimli olacaktır.

$p + ^{78}\text{Se}$ reaksiyonları sonucunda 30 MeV'in altında ^{77}Br ve 40 MeV'in üzerinde ^{75}Br izotopik kirlilikleri oluşur. Bu sebeple bu kirlilikleri en aza indirebilmek amacıyla 30–40 MeV'lik proton enerji aralığında çalışılması ^{76}Br üretimi için daha verimli olacaktır.

Çizelge 6. 1., ^{76}Br farklı üretim metotlarına ait nükleer reaksiyonları ve maksimum tesir kesitlerini verecek en uygun enerji aralıklarını göstermektedir.

Çizelge 6.1. ^{76}Br radyoizotopunun elde edildiği reaksiyonlar

Reaksiyon	Maksimum Tesir Kesiti (mb)	Enerji Aralığı (MeV)	Q-değeri (MeV)	Eşik Enerjisi (MeV)
$^{77}\text{Se}(p,2n)^{76}\text{Br}$	750-800	20-25	-13,164	13,336
$^{78}\text{Se}(p,3n)^{76}\text{Br}$	280-300	35-40	-23,661	23,967
$^{75}\text{As}(3\text{He},2n)^{76}\text{Br}$	300-350	15-20	-3,956	4,115
$^{75}\text{As}(\alpha,3n)^{76}\text{Br}$	400-450	40-50	-24,534	25,844

Çizelge 6. 1’den görüldüğü gibi, ^{76}Br üretimi için en yüksek tesir kesiti ve en düşük proton enerji aralığı $^{77}\text{Se}(p,2n)^{76}\text{Br}$ reaksiyonuna aittir. Orta enerjili bir proton siklotronunda bu reaksiyon gerçekleştirilebilir. Ayrıca, bu sonuç ^{76}Br radyoizotopunun ülkemizde kurulu olan 30 MeV’lik TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi’nde de üretilebileceğini göstermektedir.

Son olarak, yarı deneysel tesir kesiti elde etme yöntemleri deneysel sonuçların var olmadığı enerji bölgelerindeki tesir kesitlerinin ön görülmesi açısından önemlidir. Böylece, bu çalışmalar hem farklı nükleer modellerin sınanmasına hem de nükleer hesaplamaların yapıldığı bilgisayar programlarının geliştirilmesine katkı sağlar.

KAYNAKÇA

Atam, P. Arya, “Fundamentals of Nuclear Physics”, Allyn and Bacon Inc., Boston, 1966.

Aydın, A., Tel. E., Sarer, B., “Investigation of the (n, p) reaction cross-sections of some nuclei in the rare-earth elements for an incident energy range of 8-24 MeV” *Physica Scripta*, 75: 299-306, 2007.

Aydın, E. G., Tel, E., Kaplan, A., Aydın, A., “Equilibrium and Pre-Equilibrium Calculations of Neutron Production In Medium-Heavy Targets Irradiated By Protons up to 100 MeV”, *Annals of Nuclear Energy*, 35(12): 2306, 2008.

Bayhurts, B.P. and Gilmore, J.S, “Cross Section for (n' x n) reactions between 7.5 and 28 MeV” *Physical Review, C (Nuclear Physics)* 12: 451-467, 1975.

Blann M., “Extensions of Griffin's Statistical Model for Medium Energy Nuclear Reactions”, *Phys. Lett.*, 21: 1357, 1968.

Blann M., “Hybrid Model for Pre-Equilibrium Decay in Nuclear Reactions”, *Phys. Rev. Lett.*, 27:337, 1971.

Blann, M., A. Mignerey and W. Scobel, *Nukleonika*, 21: 35, 1976.

Blann, M. And Vonach, H. K., “Global test of modified precompound decay models”, *Phys. Rev.*, C28: 1475, 1983.

Cantez, S., Gorpe, A., “Pratik Nükleer Tıp”, (İstanbul Üniversitesi Vakfı) Tayf Ofset Basım, İstanbul, 266-276, 1992.

Cline C.K., “The Pauli exclusion principle in pre-equilibrium decay”, Nucl. Phys., A195: 353, 1972.

Griffin, J. J., “Statistical model of intermediate structure”, Phys. Lett., 17: 478, 1966.

Kalbach, C., “Pre-Equilibrium Models in General the Griffin Model in Particular”, Acta Phys., 2-3: 25-38, 1975.

Kaplan, A., Aydın, A., Tel. E., Sarer, B., “Equilibrium and Pre-Equilibrium Emissions In Proton-Induced Reactions on ^{203}Tl ”, Pramana-Journal of Physics, 72(2): 343, 2009.

Koning, A.J. and Duijvestijn, M. C., “New Nuclear Data Evaluations For Ge Isotopes”, Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Research Sec. B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 248, Iss. 2, pp. 197-224, 2006.

Krane K. S. “Nükleer Fizik I-II”, Başar Şarer, Palme Yayınevi, Ankara, 2002.

Kürkçüoğlu, M. E., $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ Esnek Saçılmasının Fenomenolojik ve Mikroskopik Potansiyeller İle Optik Model Analizleri, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2006.

Maziere, B., Loch, C., “Radiopharmaceuticals labelled with bromine isotopes”, Appl. Radiat. Isot. 37, 703-713, 1986.

Maziere, B., Valette, H., Loch, C., “ ^{76}Br -MBBG, a PET radiotracer to investigate the norepinephrine neurological and vesicular transporters in the heart”, Nucl. Med.

Biol. 22, 1049-1052, 1995.

Millazzo-Colli, L., Braga-Marcazzan, G. M., “Preformation Probability of a Clusters in Rare Earth Nuclei Measured by Means of the (p,a) Reaction” , Nuclear Physics A, 218:274-284, 1974.

Nayak, T.P., Brechbiel, M.W., “Radioimmunoimaging with longer-lived positron emitting radionuclides”; potentials and challenges, Bioconjugate Chem. 20, 825-841, 2009.

Oblozinsky P., Ribansky I., “Angular-Momentum Effects In The Pre-Equilibrium Statistical Model”, Acta Phys. Slov., 24:103, 1974.

Qaim, S.M., “Decay data and production yields of some non-standard positron emitters used in PET.”, Q. J. Nucl. Med. Mol. Imaging 52, 111-120, 2008.

Seyrek, E., “Radyoizotopların Üretimi ve Radyoterapide Kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.

Stöcklin, G., Qaim, S. M., Rösch, F., “The impact of radioactivity on medicine”, Radiochim, Acta 70/71, 249-272, 1995.