

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI REAKSİYONLAR YOLUYLA ANTIMON HEDEFLERDEN ÜRETİLEN
İYOT-124 RADYOİZOTOPUNUN TESİR KESİTLERİNİN HESAPLANMASI

Mehtap DEMİRKAYIK

NİSAN 2014

Fizik Anabilim Dalında Mehtap DEMİRKAYIK tarafından hazırlanan Farklı Reaksiyonlar Yoluyla Antimon (Sb) Hedeflerden Üretilen İyot-124 Radyoizotopunun Tesir Kesitlerinin Hesaplanması 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. Bayram DEMİR

Üye : Prof. Dr. Abdullah AYDIN

Üye : Doç. Dr. İsmail H. SARPÜN

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

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

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

FARKLI REAKSİYONLAR YOLUYLA ANTİMON HEDEFLERDEN ÜRETİLEN İYOT-124 RADYOİZOTOPUNUN TESİR KESİTLERİNİN HESAPLANMASI

DEMİRKAYIK, Mehtap

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AYDIN

Nisan 2014, 45 Sayfa

Bu çalışmada, farklı nükleer reaksiyonlar yoluyla Antimon (Sb) hedeflerden üretilen İyot-124 radyoizotopunun tesir kesitleri hesaplanmıştır. Yüklü parçacık gelme enerjileri göz önüne alınarak radyoizotop çekirdek üretim reaksiyonları incelenmiştir. Literatürden elde edilen deneysel değerler ile, Fortran programlama dilinde yazılan bilgisayar kod programı olan TALYS 1.2 kullanılarak hesaplanan tesir kesitleri kıyaslanmıştır. Radyoizotop üretimi ve hedef seçimi için optimum enerji aralıkları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tesir kesiti, radyoizotop üretimi, ¹²⁴I radyoizotopu.

ABSTRACT

THE CALCULATION OF CROSS-SECTION OF IODINE-124 RADIOISOTOPE PRODUCED BY DIFFERENT REACTIONS ON ANTIMONY TARGETS

DEMİRKAYIK, Mehtap

Kırıkkale University

Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, Msc thesis

Supervisor : Prof. Dr. Abdullah AYDIN

April 2014, 45 Pages

In this study, we calculated the cross-section of Iodine-124 radioisotope produced by different nuclear reactions on Antimony (Sb) targets. Regarding the energy from charged particles, we investigated production of radionuclide. We compared the experimental cross-section values from the literature with calculated cross-sections using Fortran program based computer code TALYS 1.2. Optimum energy ranges were determined for radioisotope production and for the selection of the target.

Key Words: Cross-section, radioisotope production, ¹²⁴I radioisotope.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın hazırlanmasında değerli bilgi ve önerileri ile beni yönlendirerek destek olan, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen saygı değer Hocam Prof. Dr. Abdullah AYDIN'a teşekkürlerimi arz ederim. Bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan anne ve babama, çalışmalarımnda hep yanımda olan, maddi manevi desteğini eksik etmeyen eşim Ömer Faruk TAŐOVA'ya teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ASBTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
GRAFİKLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1.GİRİŞ	1
2. NÜKLEER REAKSİYONLAR VE RADYOİZOTOPLAR	4
2.1.Nükleer Reaksiyonlar.....	4
2.1.1.Genel Bilgiler.....	4
2.1.2.Nükleer Reaksiyon Türleri.....	5
2.1.2.1. Esnek (Elastik) Saçılmalar.....	6
2.1.2.2. Esnek Olmayan (İnelastik) Saçılmalar.....	6
2.1.2.3. Bileşik Çekirdek Reaksiyonları.....	6
2.1.2.4. Direk Reaksiyonlar.....	7
2.1.3. Reaksiyon Tesir Kesitleri.....	8
2.2.Radyoizotoplar.....	10
2.2.1.Radyoizotop Üretimi.....	11
2.2.1.1. Parçacık Hızlandırıcılarında Radyoaktif Çekirdek Üretimi.....	11
2.2.1.2.Nükleer Reaktörlerde Radyoaktif Çekirdek Üretimi.....	12

2.2.1.2.1.Fizyon ile Üretilen Radyoaktif Çekirdekler.....	12
2.2.1.2.2.Nötron Aktivasyonu ile Üretilen Radyoaktif Çekirdekler..	13
2.2.1.3. Radyoaktif Çekirdek Jeneratörleri.....	14
2.2.1.3.1. Molibden-99/Teknesyum-99m Radyoaktif Çekirdek Jeneratörü.....	14
2.2.2.Tıpta Kullanılan Radyoizotoplar.....	15
2.2.2.1.SPECT (Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayarlı Tomografi).....	19
2.2.2.2.PET (Pozitron Emisyon Tomografisi).....	20
3.YÖNTEM VE MATERYALLER.....	21
3.1.Program (TALYS 1.2)	21
3.2.Verilerin ve Değerlendirme Prosedürünün Seçimi.....	23
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	25
4.1. ¹²⁴ I için Üretim Verilerinin Değerlendirilmesi.....	25
4.1.1.Antimon Üzerinde α -parçacık Uyarılma Reaksiyonları.....	25
4.1.1.1. ¹²¹ Sb(α ,n) ¹²⁴ I Reaksiyonu.....	25
4.1.1.2. ¹²³ Sb(α ,3n) ¹²⁴ I Reaksiyonu.....	29
4.1.2. Antimon Üzerinde ³ He-parçacık Uyarılma Reaksiyonu.....	32
4.1.2.1. ¹²³ Sb (³ He,2n) ¹²⁴ I Reaksiyonu.....	32
4.2.İzotopik Kirliliklerin Oluşumu.....	34
4.2.1. ¹²¹ Sb(α ,2n) ¹²³ I Reaksiyonu.....	35
4.2.2. ¹²³ Sb(α ,n) ¹²⁶ I Reaksiyonu.....	37
4.2.3. ¹²³ Sb(α ,2n) ¹²⁵ I Reaksiyonu.....	39
4.2.4. ¹²³ Sb(α ,4n) ¹²³ I Reaksiyonu.....	41
5.TARTIŞMA ve SONUÇ.....	44
5.1. ¹²⁴ I'un üretiminde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması.....	44
KAYNAKLAR.....	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Reaksiyon geometrisi.....	9
2.2. $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ jeneratörü	16
2.3. Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayar Tomografisi.....	21
2.4. Pozitron Emisyon Tomografisi.....	22

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tıpta tedavi ve tanı amaçlı kullanılan bazı radyoizotopların üretim şekli, yarılanma süresi, üretim reaksiyonu ve kullanım yerleri verilmiştir.....	17
3.1. Çalışma yapılan radyoizotoplar.....	25
3.2. Çalışma yapılan radyoizotopik kirlilikler.....	25
4.1. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	28
4.2. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	30
4.3. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	32
4.4. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	32
4.5. $^{123}\text{Sb}({}^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	35
4.6. $^{123}\text{Sb}({}^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	36
4.7. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	38
4.8. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	39
4.9. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	40
4.10. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	41

4.11. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	42
4.12. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	43
4.13. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	44
4.14. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri.....	45
5.1. Radyoizotopların üretim reaksiyonlarının uygun üretim enerji aralıkları ve maksimum tesir kesit değerleri	46

GRAFİKLER DİZİNİ

<u>GRAFİK</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	28
4.2. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için normalizasyon amacıyla kullanılan grafik.....	29
4.3. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	30
4.4. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	31
4.5. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	33
4.6. $^{123}\text{Sb}({}^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	34
4.7. $^{123}\text{Sb}({}^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	35
4.8. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	37
4.9. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	38
4.10. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	39
4.11. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	40

4.12. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	41
4.13. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	42
4.14. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	43
4.15. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar.....	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER DİZİNİ

d	Döteron
eV	elektron volt
mb	Milibarn
p	Proton
Q	Tepkime Enerjisi
s	Saniye
T _{1/2}	Yarı Ömür
α	Alfa
β	Beta
β^+	Pozitif yüklü iyon
γ	Gama
σ	Reaksiyon Tesir Kesiti

KISALTMALAR DİZİNİ

EXFOR	Experimental Nuclear Reaction Data (Deneysel Nükleer Reaksiyon Verileri)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı)
PET	Positron Emission Tomography (Pozitron Emisyon Tomografisi)
RIT	Radyoimmünoterapi
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography (Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayarlı Tomografi)

1.GİRİŞ

Nükleer fizik, atomu meydana getiren çekirdeğin özellikleri ve birbirleri ile yaptıkları etkileşimler ile ilgilenmektedir. Bu nedenle nükleer fiziği çekirdeğin statik özellikleri ve dinamik özellikleri olmak üzere iki ana kısma ayırabiliriz. Nükleer fizik, teknolojik yeniliklerin itici kuvvetini saptayan bir alandır ve günümüzde pek çok kullanım alanına sahiptir. Bu alanlardan bazıları kısaca şu şekilde açıklanabilir:

I.Tıp: Bu alanda hem teşhis hem de tedavi amaçlı kullanılmaktadır. Üretilen radyoizotoplar sayesinde vücuttaki dokular, kemikler ve organlar test edilmekte ve teşhise yardımcı olmaktadır. Proton, nötron veya ağır iyonlar kullanılarak kanserli hücrelerin öldürülmesi yoluyla da tedaviye yardımcı olmaktadır.

II.Endüstri: Bu alanda özellikle, basınç boruları, kaynatıcılar ve diğer büyük metal dökme kalıpların içindeki çatlak ve yarıkların araştırılması yoluyla kontrol alanında kullanılmaktadır.

III.Temel Bilimler: Biyolojide; Radyografi, akışkan yüzeylerde kompleks biyomoleküllerin yapısının incelenmesi. Kimyada; elektron spektroskopisi ile kimyasal analiz, polimerik yapıların incelenmesi, iz elementi analiz. Fizikte; katıların elektron yapısı, yüzeylerin ve ara yüzeylerin incelenmesi gibi kullanım alanları vardır.

Radyoaktivitenin keşfi ile birlikte α , β ve γ gibi ışınlar yaşam bilimlerini de içeren birçok alanda anahtar bir rol oynamaya başladılar. Günümüzde radyoaktif çekirdeklerin bir çoğu yapay olarak üretilmektedir ve böylece radyoaktivite son yüzyıl boyunca yaşam biliminde köklü değişikliklere sebep olmuştur. Şu anda nükleer tıp, sağlık bilimleri içerisinde en önemli ve başarılı branşlardan biridir. Radyoaktif çekirdekler ve radyofarmasötikler hem teşhis hem de tedavi amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Nükleer tıp, günümüzde üç ana branşa ayrılabilir:

- En önemli ve en yaygın branş teşhis amaçlı uygulamalardan oluşur.

- İkinci branş, kan ya da organlarda toplanan hormonların, antikorların, ilaçların konsantrasyonlarını saptamak için radyoaktif çekirdeklerden faydalanır.
- Üçüncü branş ise nihai amaç olan radyasyon tedavisidir.

Nükleer tıpta radyoaktif elementlerin tedavide kullanılmasında temel prensip, bir organ veya doku içerisine lokal olarak verilen veya metabolik taşıyıcılar aracılığı ile hedef dokuya yönlendirilen radyoaktif maddelerin, çevresine yaydığı ışınlar yoluyla hedef hücrelerde oluşturduğu yıkıcı etkiden faydalanmaktır. Radyonüklid tedaviler aşağıda örnekleri olan birçok hastalığın tedavisinde kullanılmaktadır.

► Benign hastalıklar

Hipertiroidi (İyot-131)

Sinovit ile seyreden eklem hastalıkları (Romatoid Artrit, Hemofilik sinovit gibi)
(Yitrium-90, Renyum-186, Erbiyum-164 vb)

► Malign hastalıklar

Tiroid kanserleri (İyot-131)

Nöroendokrin tümörler (İyot-131 MIBG, Yitrium-90 ve Lutesyum-177 peptidler)

Kemik metastazlarında ağrı palyasyonu (Stronsiyum-89, Samaryum-153, Renyum-186)

Non-Hodgkin Lenfoma (Yitrium-90 İbritumomab tiuexetan, İyot-131 tositumomab)

Primer ve metastatik karaciğer tümörlerinin tedavisi (Yitrium-90 mikroküre, İyot-131 lipiodol)

Genel olarak kanser tedavisinde kullanılan lokal (cerrahi, radyoterapi ve lokal kemoterapi) veya sistemik (kemoterapi) tedavi yaklaşımlarından farklı olarak nükleer tıp, kanser tedavisinde hedefe yönlendirilmiş sistemik tedavi yaklaşımını kullanmaktadır. Bu tedavilerde amaç; hedef hücrelerde radyasyon etkisine bağlı sitotoksik etki (hücre ölümü) oluşturulurken, hedef hücreleri çevreleyen dokularda hücre hasarını mümkün olan en az seviyede tutmak ve vücudun geri kalan kısımlarını radyasyonun zararlı etkilerinden korumaktır (Ulu, 2008).

Son yıllarda teşhis ve tedavi amaçlı radyoizotop kullanımında hızlı bir artış gözlenmektedir, PET (Pozitron emisyon tomografisi), nükleer tıpta kullanılan en modern ve en ileri teşhis tekniklerinden birisidir. Standart PET uygulamalarında 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. ^{124}I radyoizotopu da son yıllarda PET uygulamaları ile bağlantılı olarak radyoimmünoterapide kullanılmaktadır. Bu amaçla ^{124}I radyoizotopunun üretimi de farklı reaksiyonlar yoluyla incelenmekte ve en uygun reaksiyon ve en uygun enerji aralıklarının belirlenmesi önemli hale gelmektedir (Aslam, 2011).

Bu tezde, standart olarak kullanılan pozitron yayıcılarından farklı olan ^{124}I radyoizotopunun çeşitli üretim reaksiyonları incelendi. Bu reaksiyonlara ait tesir kesitleri hesaplandı. Hesaplamalar için TALYS 1.2 bilgisayar programı kullanıldı (Koning, 2009). Elde edilen sonuçlar EXFOR (Deneysel Nükleer Reaksiyon Verileri) kütüphanesinden ve literatürden alınan deneysel verilerle karşılaştırıldı (EXFOR, 2012). Bu arada, deneysel verilerle en iyi uyumu sağlamak için yarı-deneysel tesir kesitleri elde edildi ve tüm sonuçlar grafikler üzerinde gösterildi.

Tezin ikinci bölümünde, nükleer reaksiyonlar, radyoizotopların üretimi ve kullanım alanlarından; üçüncü bölümünde yöntem ve materyallerden; dördüncü bölümünde araştırma bulgularından bahsedildi. Son bölümde ise, tartışma ve sonuç ele alındı.

2. NÜKLEER REAKSİYONLAR VE RADYOİZOTOPLAR

2.1. Nükleer Reaksiyonlar

2.1.1. Genel Bilgiler

Reaktör veya parçacık hızlandırıcısından (ya da radyoaktif bir kaynaktan) çıkan enerjik parçacıklar madde üzerine düşürülürse, nükleer bir reaksiyonun meydana gelmesi mümkündür (Krane, 2002). Atom çekirdeklerinin temel özelliklerinin tamamına yakını gelen parçacıklarla çekirdekler arasındaki etkileşmeleri incelemek için yapılan nükleer saçılma ve reaksiyon deneylerinin analizi sonucu bulunmuştur. Bunların en önemli örnekleri; Geiger ve Marsden'in, Rutherford'un laboratuvarında gerçekleştirdiği ve Rutherford'un çekirdekli atom teorisini öne sürdüğü deneyler, nötronunun Chadwick tarafından keşfi ve Cockroft ve Walton tarafından laboratuvarında hızlandırılan protonların bir lityum levha üzerine gönderildiği ilk nükleer reaksiyon çalışmalarıdır (Aydın, 1997).

Tipik bir nükleer reaksiyon,



biçiminde yazılır. Burada, a hızlandırılan parçacık, X hedef (genel olarak laboratuvarında hareketsiz) ve Y ile b reaksiyon ürünleridir. Bu reaksiyonu göstermenin diğer ve kısa yolu,



dir. Temel bir reaksiyonda toplam göreceli enerjinin korunumu,

$$m_x c^2 + T_x + m_a c^2 + T_a = m_y c^2 + T_y + m_b c^2 + T_b \quad (2.3)$$

verir. Burada, T (düşük enerjide göreceli olmayan) kinetik enerji ve m durgun kütedir. Reaksiyonun Q değerini,

$$Q = (m_{ilk} - m_{son})c^2$$

$$Q = (m_x + m_a - m_y - m_b)c^2 \quad (2.4)$$

şeklinde yazabiliriz. Q değeri, pozitif, negatif veya sıfır olabilir. $Q > 0$ ise reaksiyon ekzotermiktir (exothermic) denir. Bu durumda nükleer kütle veya bağlanma enerjisi son ürün parçacıkların kinetik enerjisi olarak salıverilir. $Q < 0$ ise reaksiyon endotermiktir (endothermic) denir ve ilk kinetik enerji, nükleer kütle veya bağlanma enerjisine dönüşür (Krane, 2002).

2.1.2. Nükleer Reaksiyon Türleri

Bir nükleer reaksiyonda hedefteki çekirdek ile hedefe gönderilen parçacık demeti arasındaki etkileşme genellikle, reaksiyondan sonra farklı bir ürün çekirdeğin ve farklı ürün parçacıklarının olduğu yeni bir düzenlemeyle sonuçlanabilir ve reaksiyon sonrası oluşan ürünler hedef çekirdek ve hedef çekirdeğe gönderilen parçacık ile aynı olabilir. Hedef çekirdeğin reaksiyon sonrası değiştiği reaksiyonlara dönüşüm reaksiyonu adı verilir. Genel olarak eşitlik (2.1) denklemindeki gibi gösterilmesine rağmen, bir reaksiyon için son durumda bulunan ürünleri iki parçacıkla sınırlandıramayız, çarpışma üç veya daha fazla parçacıkla da sonuçlanabilir (Kürkçüoğlu, 2006).

Nükleer etkileşmeleri, saçılmalar ve reaksiyonlar şeklinde iki ana sınıfa ayırmak mümkündür (Aydın, 1997). Fakat nükleer etkileşmelerin sınıflandırılmasında kullanılan bu tanımlamaya sıkı bir bağlılık yoktur. Kimi zaman inelastik terimi esnek saçılma dışında herhangi bir reaksiyon için kullanılabilen, bu tür reaksiyonlar literatürde esnek olmayan (non-elastic) biçiminde de yer bulabilmektedir. Nükleer reaksiyon teriminin, nükleer parçacıkların karıştığı herhangi bir saçılma işlemi içinde kullanıldığına sıkça rastlanabilmektedir (Satchler, 1980; Kürkçüoğlu, 2006).

2.1.2.1. Esnek (Elastik) Saçılmalar

Bu tür reaksiyonlarda, reaksiyona giren ve çıkan parçacıklar hiçbir değişikliğe uğramazlar. Çarpışmadan önceki ve sonraki toplam kinetik enerjilerin değişmediği yani Q değerinin sıfır olduğu reaksiyonlardır. Bu nedenle (2.1) ifadesi,



şeklinde yazılır. Bu tür saçılmalarda hedef çekirdeğin enerji durumu değişmez ancak gelen parçacık, hedef çekirdekle arasındaki etkileşmeye bağlı olarak, geliş doğrultusundan saparak saçılır (Aydın, 1997).

2.1.2.2. Esnek Olmayan (İnelastik) Saçılmalar

Çıkan parçacığın gelen parçacıkla aynı olduğu, fakat farklı kinetik enerjiye sahip olduğu saçılmalardır. Bu saçılmada $Q = -E_x$ olur. Burada E_x geri tepen çekirdeğin uyarılma enerjisidir. Bu durumda (2.1) ifadesi,



şeklinde yazılır ve geri tepen çekirdek uyarılmış durumda kalır.

2.1.2.3. Bileşik Çekirdek Reaksiyonları

Gelen parçacığın hedef çekirdek içerisindeki, oldukça düşük bir kabuk modeli seviyesinde bulunan bir nükleonla çarpışması durumunda, gelen parçacık ve çarptığı nükleon çekirdekten kaçacak yeterli enerjiye sahip olmayabilir. Böylece çekirdek içerisinde bir dizi rastgele çarpışma daha gerçekleşebilecektir. Bu çarpışmalar çekirdek içerisindeki parçacıklardan birisinin şans eseri çekirdekten kaçmaya yetecek kadar enerjiyi üzerinde toplamasına dek devam edecektir (Kürkçüoğlu, 2006).

Bu tür reaksiyonlar, gelen parçacığın soğurulmasından sonra fakat giden parçacığın veya parçacıkların yayınlanmasından önce belirli bir ara duruma sahiptir. Bu ara duruma birleşik çekirdek denir. Sembolik olarak,

$$a + X \rightarrow C^* \rightarrow Y + b \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilirler. Burada C^* birleşik çekirdeği göstermektedir.

Yazılışından da görüleceği gibi, böyle bir reaksiyonu iki basamaklı bir işlem olarak ele alabiliriz: birleşik çekirdeğin oluşması ve sonra bozunumu. Belirli bir birleşik çekirdek, farklı yollarla bozunabilir. Birleşik çekirdek modelinin temel varsayımı, birleşik çekirdeğin belirli bir son ürünler kümesine bozunması için bağıl olasılığı, birleşik çekirdeğin oluşma şekline bağımsızdır şeklinde ifade edilebilir (Krane, 2002). Birleşik çekirdek reaksiyonlarının meydana gelme süresi 10^{-22} sn'den daha büyüktür. Gelen parçacığın çekirdekten kaçma şansının küçük olduğu düşük enerjilerde (10-20 MeV) gözlenebilmektedir. Tesir kesitleri direk reaksiyonlarla karşılaştırıldığında çok daha büyüktür, nükleonlar arası etkileşim rastgeledir ve açıyla pek değişim göstermez, gelen parçacığın yönüne hafifçe bağlıdır (Bayrak, 2004; Kürkçüoğlu, 2006).

2.1.2.4. Direk Reaksiyonlar

Bu reaksiyonda gelen parçacık öncelikle çekirdeğin yüzeyinde etkileşir. Gelen parçacığın enerjisi arttıkça parçacığın dalga boyu, çekirdek mertebesi boyutlarındaki bir cisimle etkileşecek büyüklükten nükleon büyüklüğündeki bir cisimle etkileşecek kadar küçülür. 1 MeV enerjili gelen bir nükleon 4 fm mertebesinde bir de Broglie dalga boyuna sahiptir ve bu nedenle tek nükleonları göremez; bu durumda birleşik çekirdek reaksiyonu daha muhtemeldir. 20 MeV enerjili bir nükleonun de Broglie dalga boyu 1 fm civarındadır ve dolayısıyla direk reaksiyon gerçekleşebilir. Direk reaksiyonların hedef çekirdeğin yüzeyi civarındaki bir veya birkaç değerlik nükleonu ile gerçekleşmesi olasılığı çok yüksektir (Krane, 2002).

Direk reaksiyonlar aşağıdaki özelliklere sahiptir:

1. Yüksek enerjilerde meydana gelirler ve reaksiyonun oluşma süresi bileşik çekirdek reaksiyonlarına göre daha kısadır (10-22 s den daha kısa).
2. Reaksiyon sırasında mermi ve hedef çekirdek kontak yaparak şiddetli absorpsiyon meydana getirirler.

3. Etkileşim genelde yüzeyde değerlik nükleonları arasında meydana gelir.
4. Tesir kesitleri bileşik çekirdek reaksiyonlarınınkine göre düşüktür; Tesir kesitleri küçük açılarda pik yaparken, büyük açılarda şiddetleri düşmektedir (Koçak, 2005).

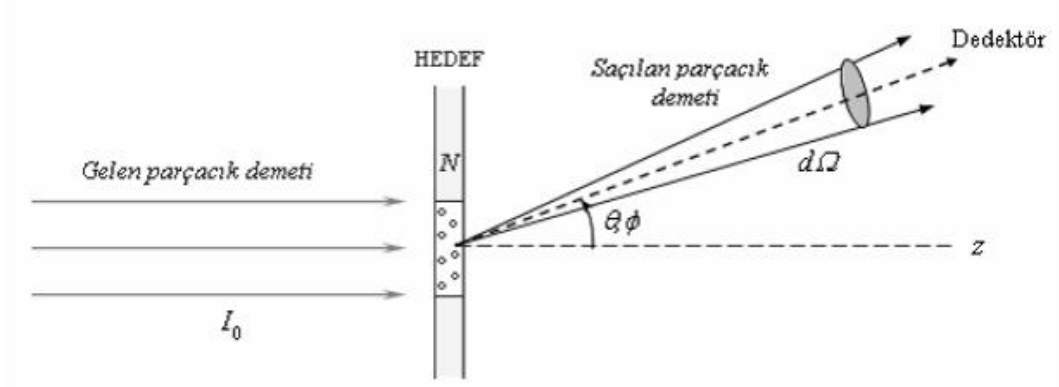
2.1.3. Reaksiyon Tesir Kesitleri

Bir nükleer reaksiyonun (veya saçılmanın) meydana gelme ihtimalini belirleyen ölçülebilir niceliklere ihtiyaç vardır. Bu nedenle, bir nükleer reaksiyonun (veya saçılmanın) oluşma ihtimalini veren tesir kesiti kavramı nükleer fizikte önemli bir yere sahiptir ve ölçülen niceliklerin başında gelir. Gelen parçacıklara karşılık, her bir hedef çekirdeğin gösterdiği belirli bir etkin alan vardır. Gelen parçacık, hedef çekirdeğin bu alanı ile doğrudan etkileşir. Bu nedenle daha büyük bir kesit daha büyük bir etkileşme ihtimalini doğurur. Gelen parçacıklar etkileşme sonucu hedeften saçıldığında (reaksiyonlarda ise yayınlanan parçacıklar), uygun bir uzaklıkta konumlandırılan detektörler tarafından sayılır. $X(a,b)Y$ genel formundaki bir nükleer reaksiyon için tesir kesiti şu şekilde açıklanabilir; N tane X tipi çekirdek içeren bir hedefe birim alan başına I_0 akısına sahip a tipi parçacık demetinin geldiği kabul edilirse, birim zamanda yayınlanan (ya da saçılan) b parçacıklarının sayısının (N_b), I_0 ve N niceliklerinin her ikisi ile de orantılı olacağı açıktır. Bu orantı sabiti tesir kesiti (σ) olarak bilinir ve alan boyutuna sahiptir. Bu tanımdan hareketle tesir kesiti,

$$\sigma = \frac{N_b}{I_0 N} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir. Nükleer fizik için uygun alan birimi (dolayısıyla tesir kesitinin birimi) barn'dır ve $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$ dir.

Eğer gelen demet doğrultusuna göre θ ve ϕ kutupsal açıları doğrultusundaki bir $d\Omega$ katı açısı içerisinde birim zamanda yayınlanan b parçacıklarının sayısını kaydetme için bir dedektör yerleştirildiği düşünülürse, bu yayınlanan b parçacıklarının sayısı, I_0 ve N niceliklerinin yanı sıra $d\Omega$ katı açısına da bağlı olacaktır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Reaksiyon geometrisi

Detektörler yalnızca küçük bir $d\Omega$ katı açısı işgal ederler ve bu nedenle çıkan parçacıkların tümünü gözleyemez; aslında, parçacıkların sadece küçük bir dN kesri sayılır ve dolayısıyla tesir kesitinin yalnızca küçük bir kesri elde edilir $d\sigma/d\Omega$ ile gösterilen bu tesir kesitine diferansiyel tesir kesiti adı verilir ve bu niceliğin ölçülmesi, reaksiyon ürünlerinin açisal dağılımları hakkında önemli bilgiler verir. Katı açı steradyan cinsinden ölçüldüğünden, diferansiyel tesir kesiti de alan boyutunda olup birimi barn/steradyandır.

Tesir kesiti ile diferansiyel tesir kesiti arasındaki ilişki,

$$\sigma = \int_0^{4\pi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega \quad (2.9)$$

şeklinindedir. Bu denklemde $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ olmak üzere, her iki kutupsal açıya bağımlılık söz konusu ise,

$$\sigma(\theta, \phi) = \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi (d\sigma(\theta, \phi)/d\Omega) \quad (2.10)$$

ve spin polarizasyonu yoksa, yani diferansiyel tesir kesiti ϕ 'den bağımsızsa,

$$\sigma(\theta) = 2\pi \int_0^\pi (d\sigma(\theta)/d\Omega) \sin\theta d\theta \quad (2.11)$$

biçiminde verilmektedir. Literatürde, genellikle $\sigma(\theta, \phi)$ veya $\sigma(\theta)$ tanımları arasında dikkatli bir ayırım yapılmaksızın sadece 'σ' veya tesir kesiti şeklinde nitelermelere rastlanabilmektedir, θ açısına göre bir tesir kesiti grafiği ile karşılaşıldığında diferansiyel tesir kesitinin kastedildiği anlaşılmalıdır. Diferansiyel tesir kesiti tüm açılar üzerinden entegre edildiğinde, toplam tesir kesitini vermektedir. Toplam tesir kesiti belirli bir kalınlıktaki hedefin içinden geçen demetin şiddetindeki kayıp ölçülerek doğrudan elde edilebilmektedir. Bir nükleer etkileşmeye ait toplam tesir kesiti, σ_t , esnek saçılma tesir kesiti, σ_e , ve reaksiyon tesir kesiti (esnek olmayan saçılmalar için soğrulma tesir kesiti), σ_r nin toplamından oluşmaktadır.

$$\sigma_t = \sigma_e + \sigma_r \quad (2.12)$$

Birden fazla reaksiyonun olduğu durumlarda her bir reaksiyona ait tesir kesitleri farklı olur. Bunlar, $\sigma_{r1}, \sigma_{r2}, \dots$ kısmi tesir kesitlerini ve bunların toplamları da,

$$\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} + \sigma_{r3} + \dots \quad (2.13)$$

toplam reaksiyon tesir kesitini oluşturur (Arya, 1966; Aydın, 1997).

2.2. Radyoizotoplar

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 hızlandırılmış parçacıklar tarafından bombardıman edilmesiyle oluşturulan nükleer reaksiyonlar yoluyla 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 bir çok alanda radyoizotoplar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tıp ve endüstride kullanılan radyoizotoplar reaktör veya parçacık hızlandırıcısı kullanılarak üretilmektedir. SPECT (Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayarlı Tomografi) ve PET radyoizotoplarının üretiminde siklotronlar parçacık hızlandırıcısı 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. Radyoizotop Üretimi

Birçok doğal radyoaktif çekirdek bulunmasına rağmen, nükleer tıpta hastalara uygulanmak üzere kullanılanların hepsi gelişen teknolojiyle yapay olarak elde edilebilmektedir. Yapay radyoaktivite 1934 yılında Irene Curie ve Frederic Joliot tarafından keşfedilmiştir. Günümüzde değişik metotlarla üretilen 2500'den fazla radyoaktif çekirdek vardır. Tıpta kullanılan radyoizotopların tümü oluşturulacak nükleer reaksiyonlar yardımıyla çeşitli tipteki parçacık hızlandırıcısı veya nükleer reaktörlerde üretilir. Bir parçacık hızlandırıcısıyla hızlandırılan ya da doğal bir radyoizotop kaynağından fırlatılan parçacığı hedef malzemeye çarparak nükleer reaksiyon oluşturur. Reaksiyon sonucunda yapay radyoizotoplar oluşturulan sistemlerde üç farklı biçimde üretilmektedir (Bushberg, 2011).

I. Parçacık hızlandırıcılarında

II. Nükleer reaktörlerde

III. Radyoaktif çekirdek jeneratörlerinde ($^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$) üretilmektedir.

2.2.1.1. Parçacık Hızlandırıcılarında Radyoaktif Çekirdek Üretimi

Siklotron ve diğer parçacık hızlandırıcıları, kararlı çekirdeklerin hızlandırılmış yüklü parçacıklarla bombardıman edilmesiyle yapay radyoaktif çekirdekler üretir. Tıpta genellikle proton (H^+), döteron ($^2\text{H}^+$) ve alfa parçacıkları ($^4\text{He}^{2+}$) gibi pozitif yüklü parçacıklar ve hidrojen iyonları (H^-) gibi negatif yüklü parçacıklar radyoaktif çekirdeklerin üretiminde kullanılır. Yüklü parçacıkların hedef atom çekirdeğinin itici Coulomb kuvvetini yenebilmesi için yüksek kinetik enerjilerde ivmelendirilmeleri gerekir. Bu ivmelendirilen iyonlar hedef çekirdek ile uygun koşullarda etkileşerek nükleer reaksiyon oluştururlar ve yeni radyoaktif çekirdekler meydana getirirler. Yüklü parçacık hedef çekirdek ile etkileştikten sonra enerjisinin bir kısmını transfer ederek ayrılabilir veya tamamıyla absorbe edilebilir. Özel reaksiyonlar bombardıman parçacığının enerjisi ve türü ile ilişkilidir. Galyum-67 (Ga-67) siklotronda üretilmiş radyoaktif çekirdeğe örnek olarak verilebilir. Üretim reaksiyonu $^{68}\text{Zn}(p,2n)^{67}\text{Ga}$ şeklinde yazılır.

Bazı özel siklotronlar PET için pozitron yayınlıyıcı radyoaktif çekirdek üretimi amacıyla geliştirilmiştir. Bu siklotronlar, endüstriyel siklotronlara ve H⁻ iyonu hızlandırıcılara göre daha düşük enerjilerde (10-30 MeV) çalışmaktadır. Bu özel siklotronların, otomatik siklotron operasyonu ve radyokimya modülleri gibi birçok avantajlı yanı vardır. Tıbbi olarak faydalı olan pozitron yayıncı radyoaktif çekirdeklerin bazılarının üretim yöntemleri aşağıda verilmiştir.

$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	$T_{1/2}=110$ dak
$^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{13}\text{N}$	$T_{1/2}=10$ dak
$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$; $^{15}\text{N}(\text{p},\text{n})^{15}\text{O}$	$T_{1/2}=2$ dak
$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$	$T_{1/2}=20,4$ dak

Tasarım kolaylığı ve maliyet göz önünde bulundurulduğunda bazı tıbbi siklotronlar sadece proton ivmelendirmektedir. Tıbbi siklotronlar genellikle PET görüntüleme sistemlerinin yanına konuşlandırılırlar, çünkü üretilen radyoaktif çekirdeğin ömrü kısadır (Bushberg, 2011).

2.2.1.2. Nükleer Reaktörlerde Radyoaktif Çekirdek Üretimi

Nükleer reaktörler tıbbi olarak kullanılan radyoaktif çekirdeklerin üretimi için bir başka temel yöntemdir. Nötron yüksüz olduğundan dolayı çekirdeğin itici kuvvetini yüksek enerjilerde ivmelendirilmeden yenmektedir. Reaktörlerde radyoaktif çekirdek üretiminde iki temel yöntem vardır.

- I. Nükleer fizyon
- II. Nötron aktivasyonu

2.2.1.2.1. Fizyon ile Üretilen Radyoaktif Çekirdekler

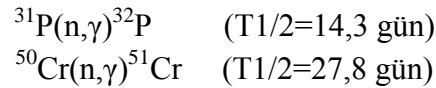
Fizyon ile üretilerek nücler tıpta genellikle Molibden-99 (Mo-99), İyot-131 (I-131) ve Zenon-133 (Xe-133) kullanılmaktadır. Bu ürünler diğer fizyon ürünlerinden mevcut radyoaktif çekirdeğin esasen kararlı izotopu (taşıyıcı) olmayışıyla kimyasal olarak ayrılabilir. Bu nedenle, bu taşıyıcısız fizyon ile üretilen radyoaktif çekirdeklerin konsantrasyonu veya özel aktiviteleri çok yüksektir. Taşıyıcısız çekirdekler

müstahzarların etiketleme verimliliğini artırmak ve enjekte edilen malzemenin kütle ve hacmini en aza indirmek için radyofarmasötik preparatlarda tercih edilmektedir.

2.2.1.2.2. Nötron Aktivasyonu ile Üretilen Radyoaktif Çekirdekler

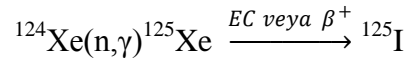
Nükleer reaktörlerde Uranyum 'un fizyonu ile üretilen nötronlarla reaktöre yerleştirilmiş kararlı hedef elementin bombardıman edilmesiyle radyoaktif çekirdekler üretilir. Nötronun kararlı çekirdek tarafından yakalanması ve radyoaktif çekirdeğin üretilmesi süreci nötron aktivasyonu olarak isimlendirilir.

Termal (yavaş) nötronlar için en genel nötron yakalama reaksiyonu (n,γ) reaksiyonudur, burada nötronun çekirdek tarafından yakalanmasından hemen sonra bir gama ışınımı gerçekleşir. Diğer termal nötron yakalama reaksiyonları (n,p) ve (n,α) reaksiyonlarıdır, burada da nötronun yakalanmasından sonra proton ve alfa parçacık yayılımı gerçekleşir. Ancak birçok nötron aktivasyonu (n,γ) reaksiyonunu kullanır, çünkü termal nötronlar düşük atomik kütleli hedef çekirdek reaksiyonlarını çok az uyarırlar. Hemen hemen her nötron aktivasyonu ile üretilen radyoaktif çekirdekler β⁻ parçacığı yayarak bozunurlar. Nükleer tıpta faydalı olan nötron aktivasyonu ile üretilen bazı radyoaktif çekirdek örnekleri;



(n,γ) reaksiyonunu ile üretilen radyoaktif çekirdek hedef elementin izotopudur. Hedef element ile aynı kimyasal özelliklere sahip olduğundan kimyasal ayrıştırma teknikleri kullanışlı değildir. Bunun yanı sıra hedef elementteki safsızlıklar diğer radyoaktif çekirdeklerin üretilmesine neden olacaktır. Bu nedenle tıbbi olarak kullanılan nötron aktivasyonu ile üretilen (¹³¹I, ⁹⁹Mo) radyoaktif çekirdeklerinin yerine özel aktivasyonu maksimize etmek için nükleer fizyon ile üretilirler. Nötron aktivasyonu ile radyoaktif çekirdek üretimindeki kısıtlara ¹²⁵I radyoaktif çekirdeği bir istisna olarak gösterilebilir. ¹²⁴Xe hedef elementi nötron aktivasyonu ile ¹²⁵Xe radyoizotopu üretir ve arzu edilen radyoizotopa bozunur. Bu durumda elde edilen

radyoizotop kimyasal veya fiziksel olarak hedef elementten ayrılabilir (Bushberg, 2011).



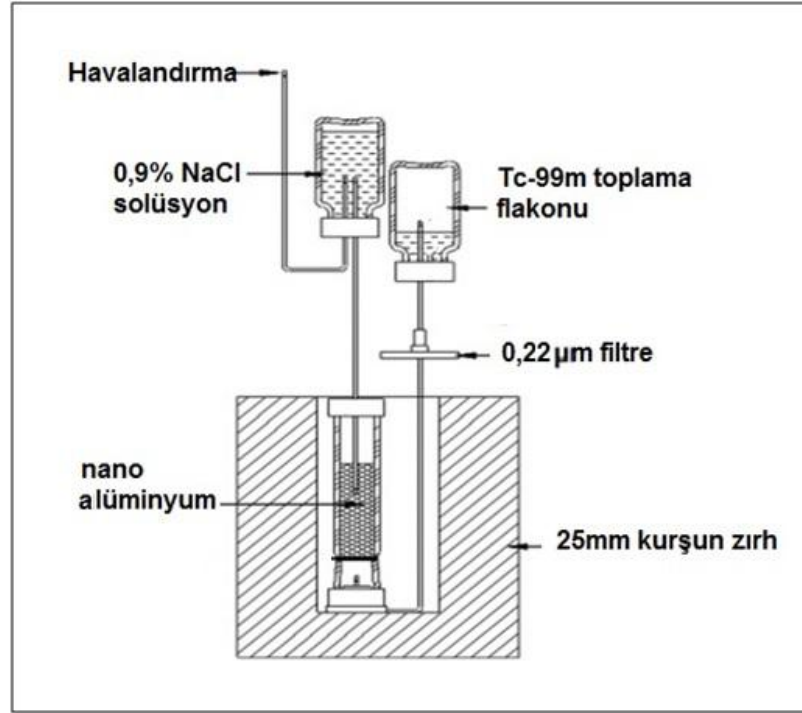
2.2.1.3. Radyoaktif Çekirdek Jeneratörleri

1960'ların ortalarından bu yana Teknesyum (Tc-99m), nükleer tıpta çeşitli radyofarmasötik uygulamalarda çok sık kullanılan radyoaktif çekirdektir. Ancak kısa yarı ömre (6 saat) sahip olması uygulamada kaynak sorunlarına yol açmaktadır. Bu kaynak problemi daha uzun yarı ömre (67 saat) sahip olan ve sürekli Tc-99m üreten Mo-99'un elde edilmesiyle aşılmıştır. Tıbbi uygulamalar için Tc-99m yeterli miktarlarda periyodik olarak toplanmaktadır. Ürünün kaynaktan rahatlıkla ayrıştırılabildiği bu sistem radyoaktif çekirdek jeneratörü olarak isimlendirilir.

2.2.1.3.1. Molibden-99 / Teknesyum-99m Radyoaktif Çekirdek Jeneratörü

Mo-99/Tc-99m radyoaktif çekirdek jeneratöründe Mo-99, 5-10 g Alüminyum Oksit (Al_2O_3) reçinesi ihtiva eden gözenekli kolona Amonyum Molibdenat (NH_4^+)(MoO_4^-) formunda doldurulur. Amonyummolibdenat, alüminyumoksit moleküllerine tutunur.

Bütün radyoaktif çekirdek jeneratörlerinde ürün ve kaynağın kimyasal özellikleri farklıdır. Mo-99/Tc-99m jeneratöründe Tc-99m Mo-99'a göre daha düzensiz bağlara sahiptir. Ürün kolonlardan izotonik (normal,%0,9) tuzlu su (yıkama sıvısı) ile çıkarılabilir. Yıkama sıvısı kolonlardan geçtiği zaman, klorit iyonları Sodyumperteknesyum (Na^+)($^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$) üreterek TcO_4^- iyonları ile kolaylıkla yer değiştirir (Bushberg, 2011).



Şekil 2.2. $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ jeneratörü (Savaş, 2013).

Tıpta kullanılan diğer önemli jeneratör sistemleri:

- Stronsiyum-82 / Rubidyum-82
- Germanyum-68 / Galyum-68
- Rubidyum-81 / Kripton-81m
- Kalay-113 / İndiyum-113m

2.2.2. Tıpta Kullanılan Radyoizotoplar

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 radyofarmasötik şekli yaygın olarak kullanılmaktadır. Radyofarmasötikler belirli organlara, kemiklere veya dokulara bağlanır.

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.

Radyoizotopların doğal yolla istenilen fiziksel özelliklere sahip olması her zaman mümkün olmayabilir. İstenilen özelliklere sahip radyoizotoplar teknolojik ve tıbbi kullanım amacına göre nükleer reaksiyonlarla üretilebilir. Bazı radyoizotoplar ve üretim reaksiyonları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tıpta tedavi ve tanı amaçlı kullanılan bazı radyoizotopların üretim şekli, yarılma süresi, üretim reaksiyonu ve kullanım yerleri verilmiştir (Savaş, 2013).

Radyoizotop	Üretim Şekli/ Yarı ömrü	Üretim Reaksiyonu	Kullanım alanı
İyot (^{123}I)	Siklotron/ 13,2 saat	$^{124}\text{Xe}(p,2n) \rightarrow ^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},3n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{124}\text{Xe}(d,2pn) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{126}\text{Xe}(d,2p3n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{128}\text{Xe}(d,2p5n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{129}\text{Xe}(d,2p6n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{122}\text{Te}(d,n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{123}\text{Te}(d,2n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{124}\text{Te}(d,2n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{124}\text{Te}(d,3n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{124}\text{Te}(d,3n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{123}\text{Te}(p,n) \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{124}\text{Te}(p,2n) \rightarrow ^{123}\text{I}$	Beyin, tiroid, böbrek ve myokardial görüntüleme, beyindeki kan akışının görüntülenmesi ile bazı nörolojik hastalıkların teşhisinde (Alzheimer vb.) kullanılır.
İyot (^{124}I)	Siklotron/ 4,176 gün	$^{121}\text{Sb}(\alpha,n) \rightarrow ^{124}\text{I}$ $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n) \rightarrow ^{124}\text{I}$ $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},2n) \rightarrow ^{124}\text{I}$ $^{124}\text{Xe}(d,2p) \rightarrow ^{124}\text{I}$ $^{126}\text{Xe}(d,2p2n) \rightarrow ^{124}\text{I}$ $^{128}\text{Xe}(d,2p4n) \rightarrow ^{124}\text{I}$	Radyoimmünoterapi için nükleer tıpta değerlendirilebilen olanakları ile en önemli olan standart pozitron yayıcıları biri olan iyot PET ile birleştirilip kullanılmaktadır.

		$^{129}\text{Xe}(d,2p5n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{130}\text{Xe}(d,2p6n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{131}\text{Xe}(d,2p7n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{132}\text{Xe}(d,2p8n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{134}\text{Xe}(d,2p10n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{124}\text{Te}(p,n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{125}\text{Te}(p,2n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{126}\text{Te}(p,3n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{123}\text{Te}(d,n) \text{ }^{124}\text{I}$ $^{124}\text{Te}(d,2n) \text{ }^{124}\text{I}$	
İyot (^{125}I)	Siklotron/ 59,4 gün	$^{126}\text{Te}(p,2n) \text{ }^{125}\text{I}$ $^{125}\text{Te}(p,n) \text{ }^{125}\text{I}$ $^{124}\text{Te}(d,n) \text{ }^{125}\text{I}$	Tiroit teşhis ve tedavisinde kullanılır.
İyot (^{131}I)	Reaktör/ 192,96 saat	$^{131}\text{Xe}(d,2p) \text{ }^{131}\text{I}$ $^{132}\text{Xe}(d,2pn) \text{ }^{131}\text{I}$ $^{134}\text{Xe}(d,2p3n) \text{ }^{131}\text{I}$ $^{136}\text{Xe}(d,2p5n) \text{ }^{131}\text{I}$	Nükleer tıpta radyoaktif iyot tedavisi ve tiroid kanserinin teşhisinde kullanılmaktadır.
Karbon (^{11}C)	Siklotron/ 20,39 dk	$^{14}\text{N}(p, \alpha) \text{ }^{11}\text{C}$	Beyin fonksiyonlarını ve PET görüntüleme; göğüs, kronik lenfositik, karaciğer, çoklu miyelom, prostat, idrar yolu kanserlerini görüntüleme kullanılır.
Azot (^{13}N)	Siklotron/ 9,96 dk	$^3\text{C}(p,n) \text{ }^{13}\text{N}$ $^{12}\text{C}(d,n) \text{ }^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(p, \alpha) \text{ }^{13}\text{N}$ $^{10}\text{B}(\alpha,n) \text{ }^{13}\text{N}$ $^{11}\text{B}(\alpha,2n) \text{ }^{13}\text{N}$ $^{14}\text{N}(p,pn) \text{ }^{13}\text{N}$	Çok kısa ömürlü PET izleyici olarak beyin fizyoloji ve patolojisinde, ayrıca nörofarmakolojik, psikiyatri, akıl hastalıklarıyla ilgili çalışmalarda, miyokard görüntüleme azot etikeli amonyakla görüntüleme kullanılır
Karbon (^{14}C)	Reaktör/ 5730yıl	$^4\text{N}(n,p) \text{ }^{14}\text{C}$ $^{13}\text{C}(n,\gamma) \text{ }^{14}\text{C}$ $^{17}\text{O}(n,\alpha) \text{ }^{14}\text{C}$	Böbrekler, mesane, mide, göğüs kanseri tümörlerinin Belirlenmesinde kullanılır.

Oksijen (^{15}O)	Siklotron/ 122,24s	$^{5}\text{N}(p,n) ^{15}\text{O}$ $^{16}\text{O}(p,pn) ^{15}\text{O}$ $^{15}\text{Nd},n) ^{15}\text{O}$ $^{12}\text{C}(\alpha,n) ^{15}\text{O}$	PET görüntüleme kullanılır.
Flor (^{18}F)	Siklotron/ 109,77 dk	$^{18}\text{O}(p,n) ^{18}\text{F}$ $^{16}\text{O}(^3\text{He},p) ^{18}\text{F}$ $^{16}\text{O}(^3\text{He},n) ^{18}\text{Ne} \rightarrow ^{18}\text{F}$ $^{16}\text{O}(\alpha,np) ^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(d, \alpha) ^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha p) ^{18}\text{F}$	Beyin üzerine yapılan Araştırmalarda radyoizleyici ve şekerle kolaylıkla bağlanması nedeniyle PET görüntüleme kullanılır. Bir tür beyin ve kanser hücreleri gibi glikoz yüksek kullanıcıları kanseri hücreleri tarafından alınır.
Fosfor (^{32}P)	Reaktör/ 14 gün	$^{32}\text{S}(n,p) ^{32}\text{P}$ $^{31}\text{P}(d,p) ^{32}\text{P}$	Kemik kanserinde ağrı azaltmak, lösemi ve polisitemivera tedavilerinde kullanılır.
Potasyum (^{43}K)	Siklotron/ 22,3 saat	$^{45}\text{Sc}(p,3p) ^{43}\text{K}$	22 saatlik bir yarılanma ömrüne sahip potasyumun yapay üretilen beta yayan izotopu, miyokard perfüzyon çalışmalarında radyoaktif izleyici olarak kullanılır.
Skandiyum (^{43}Sc)	Siklotron/ 3,89saat	$^{45}\text{Sc}(p,2np) ^{43}\text{Sc}$	Teşhis amaçlı olarak ve radyoterapide kullanılır.
Kobalt (^{60}Co)	Reaktör/ 5,27 yıl	$^{59}\text{Co}(^3\text{He},2n) ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Co}$	Siteriliasyon ve ışın tedavisinde kullanılır.
Bakır (^{60}Cu)	Siklotron/ 23,7 dk	$^{60}\text{Ni}(p,n) ^{60}\text{Cu}$	Tümörün yapısında bulunan hipoksik dokular ile beyin ve kalbin görüntülenmesinin yanı sıra, protein ve peptitlerin etiketlenmesinde kullanılır
İtriyum (^{86}Y)	Siklotron/ 14,74 saat	$^{\text{nat}}\text{Zr}(p,x) ^{86}\text{Y}$ $^{86}\text{Sr}(p,n) ^{86}\text{Y}$	Tedavi edici olarak kullanılır.
Stronsiyum (^{89}Sr)	Reaktör/ 50,5gün	$^{88}\text{Sr}(n,\gamma) ^{89}\text{Sr}$ $^{89}\text{Y}(n,p) ^{89}\text{Sr}$	Kemik metastazlarının tedavisinde en yaygın olarak kullanılan radyonükliddir.
Zirkonyum (^{89}Zr)	Siklotron/ 78,41 saat	$^{89}\text{Y}(p,n) ^{89}\text{Zr}$ $^{89}\text{Y}(d,2n) ^{89}\text{Zr}$	PET görüntüleme kullanılır.

İtriyum (^{90}Y)	Reaktör/ 64 saat	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	Benign ve malign tümör çeşitlerini tedavi etmek için kullanılır.
Molibden (^{99}Mo)	Reaktör/ 66 saat	$^{98}\text{Mo} (n, \gamma) ^{99}\text{Mo}$ $^{100}\text{Mo} (n, 2n) ^{99}\text{Mo}$	^{99}mTc için jeneratör olarak kullanılmaktadır.
Kalay (^{117}mSn)	Siklotron/ 13,76 gün	$^{116}\text{Cd}(\alpha, 3n) ^{117}\text{mSn}$ $^{114}\text{Cd}(\alpha, n) ^{117}\text{mSn}$ $^{117}\text{Sn}(\text{nfast}, n\gamma) ^{117}\text{mSn}$	Metasfaz veya primer kemik kanserlerinin tedavisinde ve ağrıyı hafifletmek için kullanılır.
Sezyum (^{137}Cs)	Reaktör/ 30,17 yıl	$^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f}) ^{137}\text{Cs}$	Işın tedavisinde ışın kaynağı olarak kullanılmaktadır.
Erbiyum (^{165}Er)	Siklotron/ 10,4 saat	$^{165}\text{Ho}(\text{d}, 2\text{n}) ^{165}\text{Er}$ $^{165}\text{Ho}(\text{p}, \text{n}) ^{165}\text{Er}$ $^{\text{nat}}\text{Er}(\text{d}, \text{xn}) ^{165}\text{Tm} \rightarrow ^{165}\text{Er}$	Nükleer tıpta tedavi edici radyonüklid olarak kullanılmaktadır.

2.2.2.1. SPECT (Tek Foton Yayınlanmalı Bilgisayarlı Tomografi)

SPECT'in tarihi, Avusturyalı matematikçi J. Radon tarafından 1917 yılında yayınlanan, iki ya da üç boyutlu bir objenin çeşitli açılar altındaki görünümünün 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.

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).



Şekil 2.3. Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayar Tomografisi (SPECT)

2.2.2.2. 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 (PET)

3. YÖNTEM VE MATERYALLER

Bu çalışmada tıbbi olarak önemli bir pozitron yayıcı olan ^{124}I 'nın ($T_{1/2}=4,18$ gün) Sb izotopları üzerinde ^3He - ve α -parçacık uyarılma reaksiyonları ile üretimi için tesir kesit verisi hesaplanmıştır. Tahmini değerlere göre nükleer model kod yardımıyla yapılan hesaplamalar bu konuyla ilgili yapılmış mevcut çalışmaların sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Nükleer model kod olarak TALYS 1.2 kullanılmıştır.

^{124}I ($T_{1/2}=4,18$ gün; $E_{\beta^+}=2,13$ MeV; $I_{\beta^+}= \%22$) radyonüklidi, PET ile birlikte RIT (Radyoimmünoterapi) için uygun kullanım alanlarıyla nükleer tıpta en önemli pozitron yayıcılardan biridir. Bunun üretimi için çeşitli metotlar araştırılmıştır (Scholten ve ark., 2008; Qaim, 2010). Halen yüksek zenginleştirilmiş ^{124}Te üzerine $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu tercih edilen yöntemdir (Scholten ve ark., 1995; Qaim ve ark., 2003). Bu araştırmaların yanı sıra antimon üzerindeki ^3He - ve α -parçacık uyarılmış reaksiyonları incelenmiştir ve bu çalışmada ^{124}I 'nin üretimi için bu reaksiyonlar üzerinde çalışılmıştır (Aslam, 2010).

Hedef element antimon hemen hemen eşit zenginlikte iki kararlı izotoptan oluşmaktadır ($^{121}\text{Sb}(\% 57,36)$ $^{123}\text{Sb}(\% 42,64)$). Bu izotopların ^3He - ve α -parçacık ile bombardımanı artan atış enerjilerinde farklı nükleer reaksiyonlarla aynı ürünün ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu çalışmada $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ ve $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ reaksiyonları üzerinde hesaplamalar yapıldı. Ayrıca ^{124}I 'nin üretimi sırasında ortaya çıkabilecek kirliliklerden ^{123}I , ^{125}I ve ^{126}I 'nın üretimi için uyarılma fonksiyonları değerlendirilmiştir. Radyasyon tespitini geliştirmek ve hastalara radyasyon dozunu ayarlamak yerine bu kirliliklerin mevcudiyetinin bastırılması gerekmektedir (Aslam, 2010).

3.1. Program (TALYS 1.2)

Tesir kesitlerinin teorik hesaplanmasında Ubuntu 10.0 işletim sistemi üzerine kurulmuş olan TALYS programı kullanılmıştır. 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, ^3He , α parçacıkları ve gama ışınları 1 keV – 250 MeV enerji bölgesinde çalışılabilir. Hedef çekirdek kütleleri için 12 ve daha ağır kütleli olma şartı TALYS 1.2 sürümü ile $5 < A \leq 339$ 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

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) v.b enerji ve çift diferansiyel tesir kesitleri,
 - Tekli ya da çoklu emisyon tesir kesitleri,
 - Ürün çekirdeklerin oluşum tesir kesiti sonuçları
- gibi veriler elde edilebilir (Uyar, 2012).

Nükleer fizik ve nükleer fiziğin gelişimiyle oluşan diğer alanlarda karşılaşılan en büyük sorunlardan biri deneylerin maliyetli olmasıdır. Bu durum ister istemez yapılacak deneylerin verimlerinin yüksek olmalarını gerektirmektedir. Maliyetin dışında örneğin bir malzeme ya da parçacık hızlandırıcısı tasarımında, bu tasarımı yapmadan önce gerekli tüm hesaplamaların yapılması ve gerekiyorsa ona göre önlemler alınması şarttır. Ayrıca nükleer tıp alanında bu hesaplamalar hayati öneme sahiptir. Ayrıca şu anda var olan gerçekleşen olayların anlaşılması için oluşturulan teorik çalışmaların geliştirilmesi içinde bu hesaplamalara ihtiyaç vardır. Bu hesaplamaların yapılması konusunda benzetim programları bizim için büyük kolaylık teşkil eder. Bu sayede istenilen hedefe odaklı sağlıklı ve verimli deneyler yapabilmek için gerekli hesaplamalar kolaylıkla yapılabilmektedir.

Kısacası benzetim programı ihtiyaçlarımızı;

- 1.Kurulacak deneysel sistemlere karar verebilmek için,
- 2.Deneysel sonuçlarla, simülasyon sonuçlarını karşılaştırıp hata oranlarını ya da analizin doğruluğunu bulabilmek için,

3. Teoriden gelen simülasyon verileri ile deneysel sonuçları karşılaştırıp teoriyi test edebilmek için, şeklinde üç ana başlıkta toplayabiliriz.

3.2. Verilerin ve Değerlendirme Prosedürünün Seçimi

Değerlendirilen reaksiyonlar, Q-değerleri ve referanslarıyla birlikte Çizelge-3.1’de verilmiştir. Benzer şekilde, her reaksiyon ile ilişkili çeşitli kirliliklerin ayrıntıları Çizelge 3.2’de listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışma yapılan radyoizotoplar

Nükleer Reaksiyon	Q-değeri (MeV)	Referanslar
$^{121}\text{Sb}(\alpha, n) ^{124}\text{I}$	-7,87	Calboreanu 1982; Ismail 1989,1990; Singh 1991, 2006; Tarkanyi 2009; Hassan 2006b
$^{123}\text{Sb}(\alpha, 3n) ^{124}\text{I}$	-23,6	Watson 1973; Ismail 1989, 1990; Singh 1991,2006;
$^{123}\text{Sb}({}^3\text{He}, 2n) ^{124}\text{I}$	-3,07	Watson 1973; Tarkanyi 2009

Çizelge 3.2. Çalışma yapılan radyoizotopik kirlilikler

Nükleer Reaksiyon	Q-değeri (MeV)	Referanslar
$^{121}\text{Sb}(\alpha, 2n) ^{123}\text{I}$	-15,37	Hassan 2006b; Singh 1991; Ismail 1989; Calboreanu 1982
$^{123}\text{Sb}(\alpha, n) ^{126}\text{I}$	-6,95	Ismail 1989; Singh 1991,2006
$^{123}\text{Sb}(\alpha, 2n) ^{125}\text{I}$	-14,06	Uddin 2011
$^{123}\text{Sb}(\alpha, 4n) ^{123}\text{I}$	-31,15	Ismail 1989, 1990; Singh 1991

Yapılan çalışmada, bu reaksiyonlar üzerine çalışmalar ve deneyler yaparak sonuçlar elde etmiş olan araştırmacıların verileri EXFOR kütüphanesinden alınmıştır ve kendi değerlerimizle elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yöntemine gidilmiştir. Referans deneylerden alınan değerler ve elde edilen tesir kesit değerleri kullanılarak, tesir kesit değerleri normalizasyon faktörü $f(E)$ yardımıyla yeniden hesaplatılmıştır. $\sigma_{\text{yarı-den}}(E)=f(E) \sigma_{\text{model}}(E)$ (Model hesaplama kesiti ürünü $\sigma_{\text{model}}(E)$, ve enerji bağımlı normalizasyon faktörü $f(E)$, değerlendirilmiş kesiti tanımlar).

Her bir reaksiyon için, IAEA (Uluslararası Atomik Enerji Ajansı) EXFOR (Deneysel Nükleer Reaksiyon Verileri) kütüphanesinden alınan deneysel çalışmaların sonuçları alınarak Excel (MS Office) sayfasına kaydedildi. Kaynak olarak kullanılan makalede (Aslam, 2010) yer alan enerji aralığı değerleri kullanılarak TALYS 1.2 programı aracılığıyla her bir reaksiyon için tesir kesit değerleri elde edildi ve Excel sayfasına bu değerler kaydedildi. Makalede yer alan enerji aralığına yakın olacak şekilde enerji değerleri kullanılarak yeni tesir kesit değerleri her bir reaksiyon için TALYS 1.2 programı aracılığıyla elde edildi ve Excel sayfasına kaydedildi. Verilerin kaydedildiği Excel sayfası bu çalışma için veri kaynağı olarak kullanıldı. Bu değerler kullanılarak, Grapher 4 (Golden Software) programı aracılığıyla her bir reaksiyon için enerji ve tesir kesit değerleri kullanılarak grafikler çizdirildi.

Yarı deneysel tesir kesit değerlerini elde etmek için; EXFOR'dan alınan araştırmacıların enerji değerleri kullanılarak TALYS 1.2 programı aracılığıyla tesir kesit değerleri hesaplatıldı, bu değerler σ_{teo} olarak isimlendirildi. Ayrıca EXFOR'dan alınan araştırmacıların tesir kesit değerleri σ_{den} olarak isimlendirildi. $\sigma_{den} / \sigma_{teo}$ oranı ve enerji aralığı değerleri kullanılarak Grapher 4 programı aracılığıyla yeni bir grafik çizdirildi. Bu grafik kullanılarak ve fitting işlemi gerçekleştirilerek Grapher 4 programında polinom tipi bir denklem ($f(E)$) elde edildi. Bu polinom tipi denklemde enerji değerleri kullanılarak elde edilen değerler, TALYS 1.2 programı aracılığıyla elde edilen tesir kesitleri çarpılarak yeni tesir kesit değerleri hesaplanmıştır ($\sigma_{yarı-den}(E)=f(E) \sigma_{model}(E)$). Son olarak EXFOR'dan alınan bütün deneysel sonuçların, TALYS 1.2 ile elde edilen sonuçların ve Polinom tipi denklemle elde edilen sonuçların yer aldığı grafik Grapher 4 programı aracılığıyla her bir reaksiyon için çizdirildi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada standart olarak kullanılan pozitron yayıcılarından farklı olan ^{124}I radyoizotopunun çeşitli üretim reaksiyonları incelendi. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{124}\text{I}$, $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ nükleer reaksiyonları ele alındı ve bu reaksiyonlara ait tesir kesitleri hesaplanarak üretim için en uygun enerji aralıkları belirlendi.

Deneysel veriler için EXFOR kütüphanesinden yararlanıldı. Nükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin hesaplanmasında TALYS 1.2 programı kullanıldı. Elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırıldı. Sonuçların iyileştirilmesi ve deneysel değer bulunmayan enerji bölgelerindeki tesir kesitlerini tahmin edebilmek amacıyla, deneysel verilerden yararlanarak yarı-deneysel tesir kesitleri elde edildi.

4.1. ^{124}I için Üretim Verilerinin Değerlendirilmesi

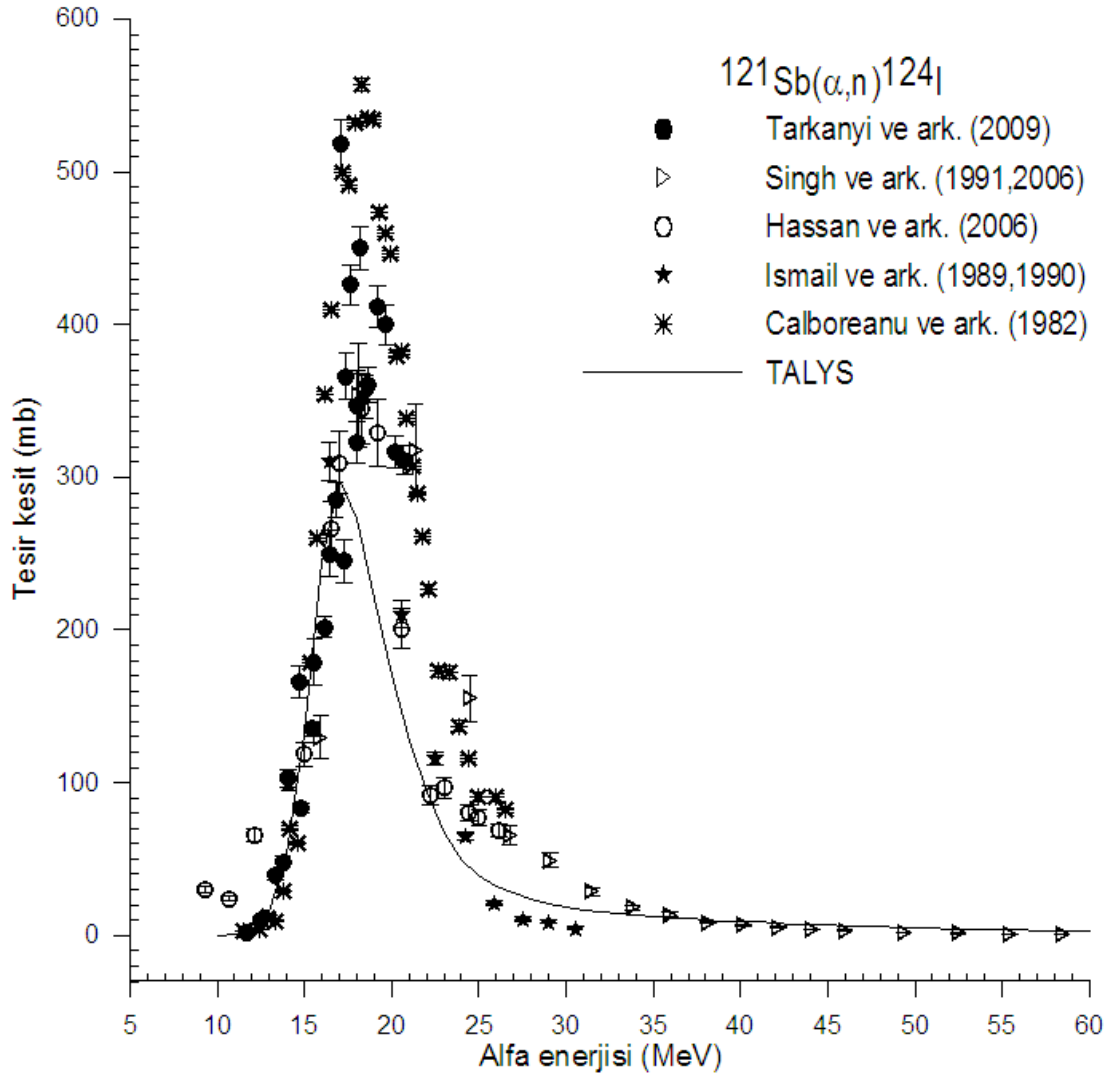
4.1.1. Antimon Üzerinde α -parçacık Uyarılma Reaksiyonları

Antimon izotoplarının α -parçacık ile bombardımanı neticesinde $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ ve $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ reaksiyonları aracılığıyla ^{124}I elde edilmiştir.

4.1.1.1. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu

Grafik 4.1. incelendiğinde Calboreanu ve Tarkanyi'nin elde ettiği değerlerin bizim elde ettiğimiz değerlere göre oldukça yüksek tesir kesit değerlerine sahip olduğu görülmektedir (Calboreanu ve ark., 1982; Tarkanyi ve ark., 2009). Tarkanyi ve Calboreanu'nu değerlerinden birkaçının birbiriyle örtüştüğü görülmektedir. Hassan'ın ölçümleri, eşik değeri civarındaki üç değer dışında bizim ölçümlerimizle örtüşmektedir (Hassan ve ark., 2006).

Hesaplama sonuçları ve Grafik 4.1. incelendiğinde 15 - 20 MeV enerji aralığında yüksek verim alındığı görülmektedir.



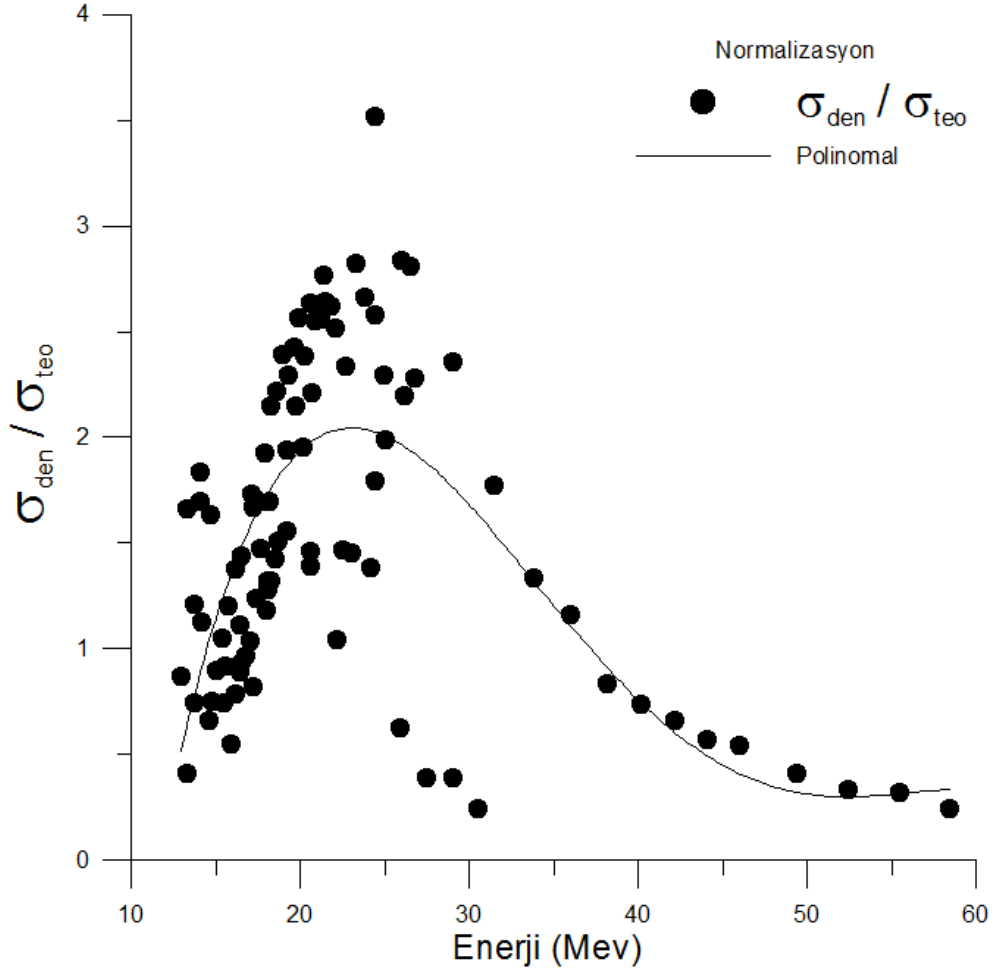
Grafik 4.1. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar

Çizelge 4.1. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS1.2 yardımıyla hesaplatılan tesisir kesit değerleri

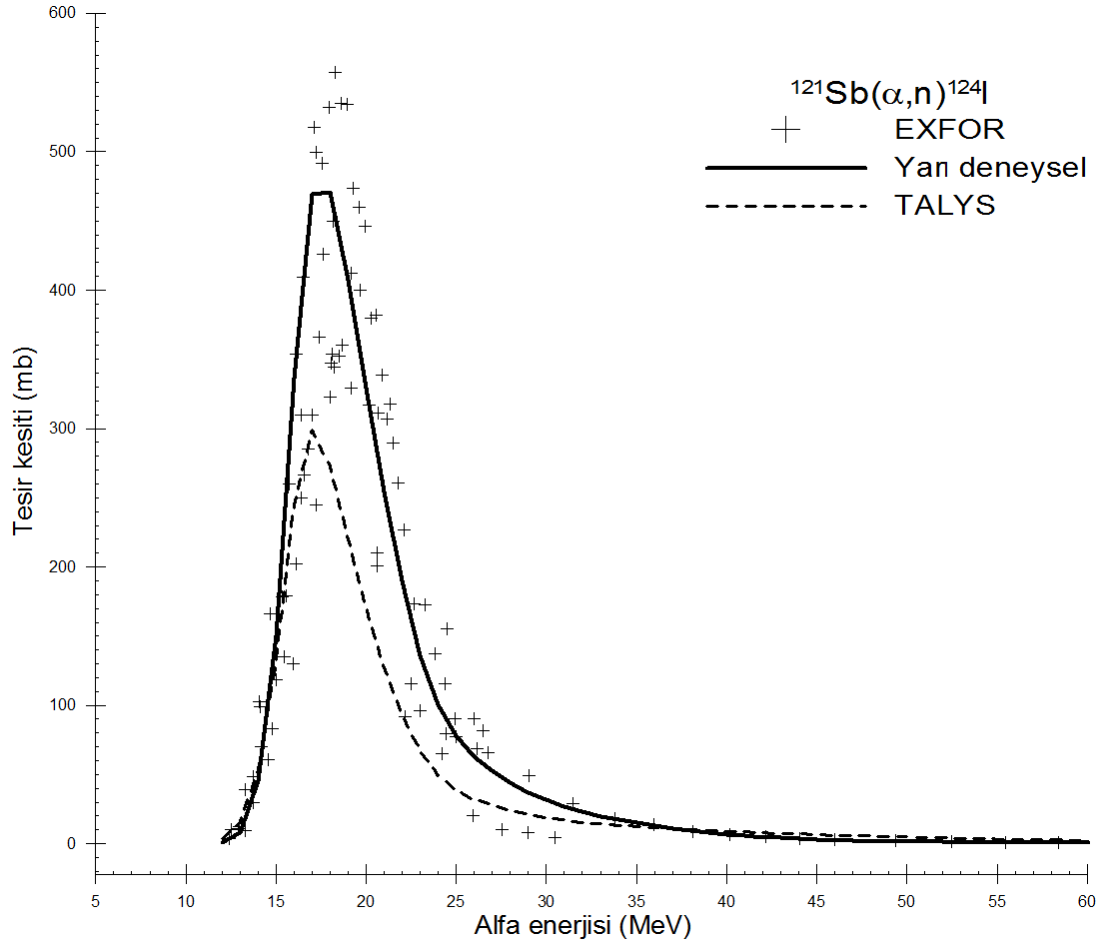
E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)
10	0,085119	21	127,376	32	15,5597	43	7,49431	54	3,66257
11	0,629816	22	93,4146	33	14,2741	44	7,09823	55	3,40869
12	3,54834	23	66,3001	34	13,3435	45	6,75647	56	3,42533
13	15,5887	24	49,3674	35	12,5443	46	6,13505	57	3,18327
14	52,6415	25	38,9799	36	11,6982	47	5,81106	58	2,89216
15	131,661	26	31,9378	37	10,8542	48	5,59267	59	2,73473
16	244,879	27	27,6588	38	10,306	49	5,22504	60	2,62547
17	298,924	28	23,8333	39	9,64764	50	5,03743		
18	272,738	29	21,0387	40	8,96014	51	4,69067		
19	220,584	30	18,8203	41	8,77346	52	4,30176		
20	170,174	31	16,9783	42	7,83924	53	3,88533		

Aşağıda yarı deneysel tesir kesit değerlerini elde etmek için kullanılan polinom tipi denklem ve bu denklemi elde etmek için kullandığımız normalizasyon grafiği yer almaktadır. Bu işlem üzerinde çalıştığımız bütün reaksiyonlar için teker teker gerçekleştirilmiştir.

$$f(E) = -9,903511907 + 1,377912801 * E - 0,05465619872 * E^2 + 0,0008642195336 * E^3 - 0,00000481069858 * E^4$$



Grafik 4.2. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için normalizasyon amacıyla kullanılan grafik



Grafik 4.3. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar

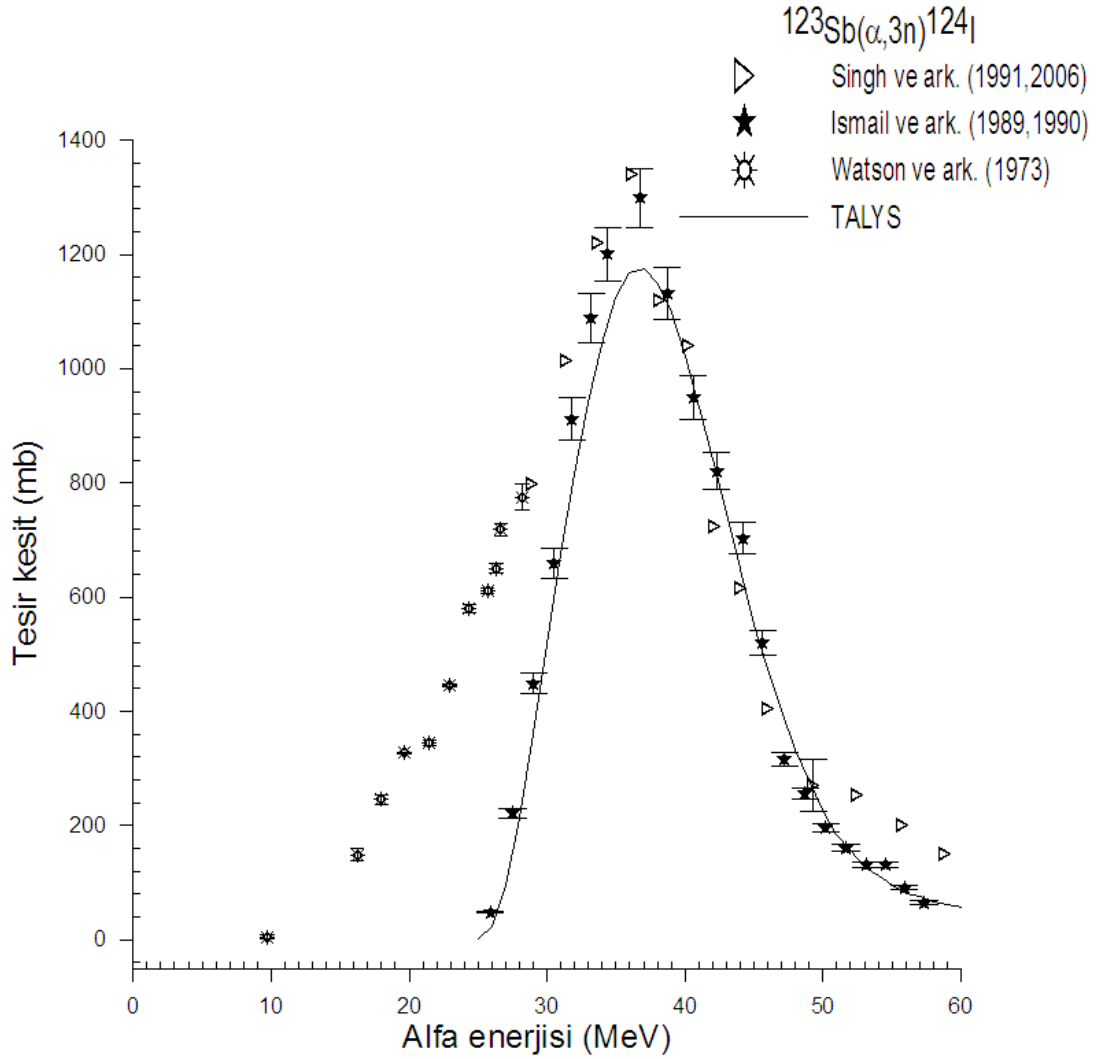
Grafik 4.3 incelendiğinde normalize edilen değerlerin diğer araştırmacıların çalışmalarındaki sonuçlarla büyük oranda örtüştüğü görülmektedir ve 16 - 21 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

Çizelge 4.2. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit

E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)
10	-0,06587	21	254,398	32	23,27907	43	4,137672	54	1,113894
11	-0,17637	22	189,8413	33	19,97459	44	3,527588	55	1,057775
12	0,548452	23	135,5228	34	17,367	45	3,032951	56	1,08839
13	8,320451	24	100,4785	35	15,10272	46	2,502743	57	1,03519
14	45,33817	25	78,2886	36	12,95945	47	2,173551	58	0,958255
15	150,1903	26	62,78267	37	11,00848	48	1,940646	59	0,915281
16	336,874	27	52,81712	38	9,52395	49	1,706112	60	0,876136
17	469,1554	28	43,90116	39	8,088391	50	1,57272		
18	470,5905	29	37,13395	40	6,789492	51	1,423668		
19	407,3503	30	31,62855	41	5,990807	52	1,289633		
20	329,5095	31	27,00162	42	4,81452	53	1,166726		

4.1.1.2. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu

Bu reaksiyonun, tesir kesit değerleri için kullanılan deneyler Çizelge 3.1’de verilmiştir. TALYS 1.2 hesaplamasında α -parçacık için optik model parametreleri avadjust ve rvdjust değerleri 1,055’e eşit alınarak kullanılmıştır. Nükleer model hesaplama sonuçları deneysel verilerle birlikte Grafik 4.4’de gösterilmiştir.



Grafik 4.4. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kodu yardımıyla elde edilen sonuçlar

Deneysel verilerin çoğunluğu bir uyum içerisindedir, fakat Watson tarafından yapılan ölçümler eşik yakınlarında enerji kayması göstermektedir ve 32 - 42 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır (Watson ve ark., 1973).

Çizelge 4.3. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri

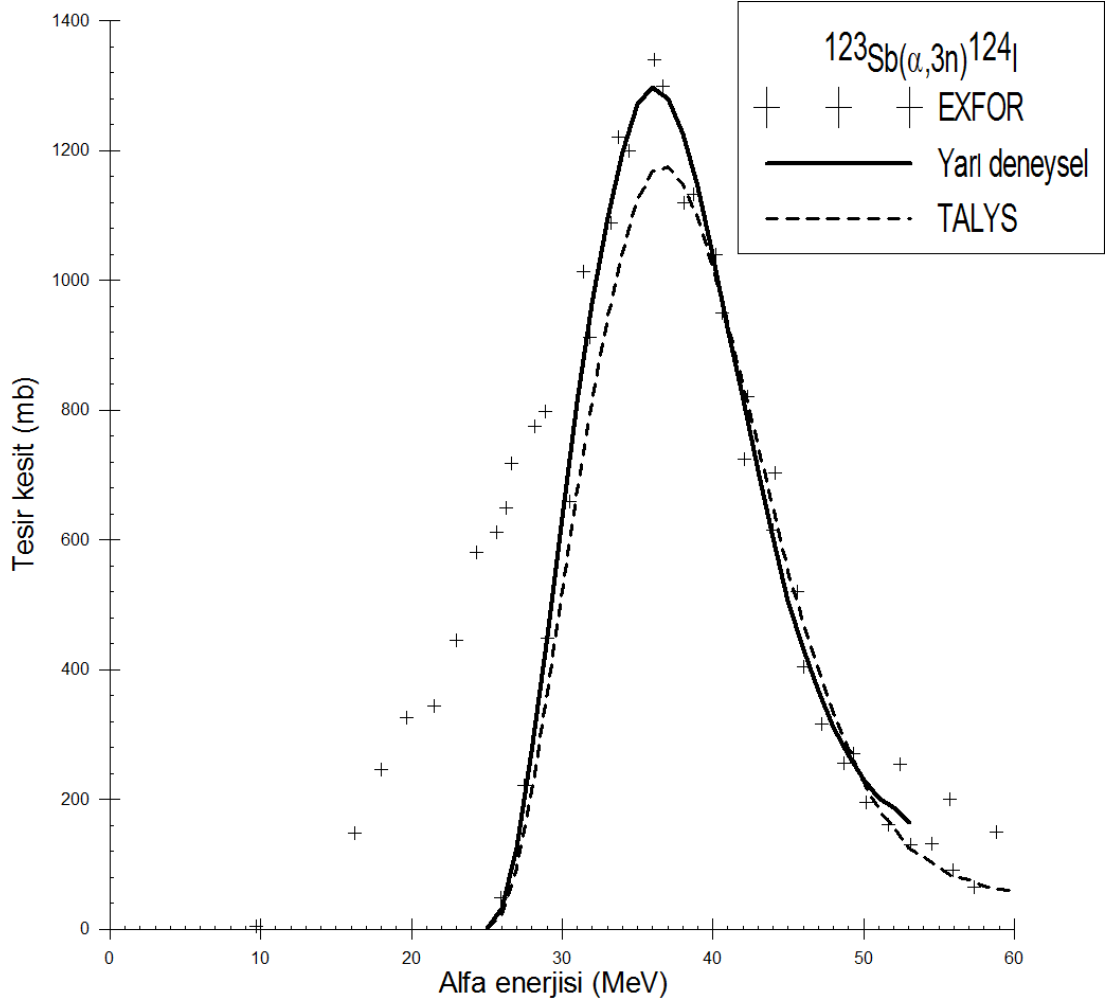
E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)
25	1,19	36	1168,49	47	401,63	58	66,66
26	23,26	37	1174,34	48	333,95	59	62,04
27	95,13	38	1148,40	49	279,53	60	57,61
28	213,36	39	1097,03	50	226,30		
29	361,68	40	1021,71	51	184,56		
30	518,60	41	933,32	52	156,69		
31	676,38	42	841,94	53	125,74		
32	815,46	43	747,06	54	112,24		
33	940,49	44	650,25	55	95,88		
34	1042,63	45	552,15	56	80,73		
35	1124,33	46	473,23	57	76,61		

Tanımlanmış normalizasyon yöntemiyle elde edilen uyarma fonksiyonu Grafik 4.5’de gösterilmiştir ve değerleri çizelge 4.4’de yer almaktadır.

$$f(E) = 21,299672491 - 2,2015704112 * E + 0,0908472802 * E^2 - 0,001666197468 * E^3 + 0,00001135246482 * E^4$$

Çizelge 4.4. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri

E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)
25	1,72	36	1298,06	47	367,21	58	172,91
26	31,96	37	1279,96	48	311,21	59	186,51
27	125,79	38	1225,70	49	269,82	60	200,76
28	273,41	39	1144,45	50	230,28		
29	451,80	40	1040,28	51	201,60		
30	634,39	41	926,71	52	186,96		
31	812,86	42	815,42	53	166,53		
32	964,69	43	706,88	54	167,24		
33	1096,17	44	603,22	55	162,50		
34	1197,17	45	505,05	56	156,91		
35	1270,72	46	430,38	57	171,71		



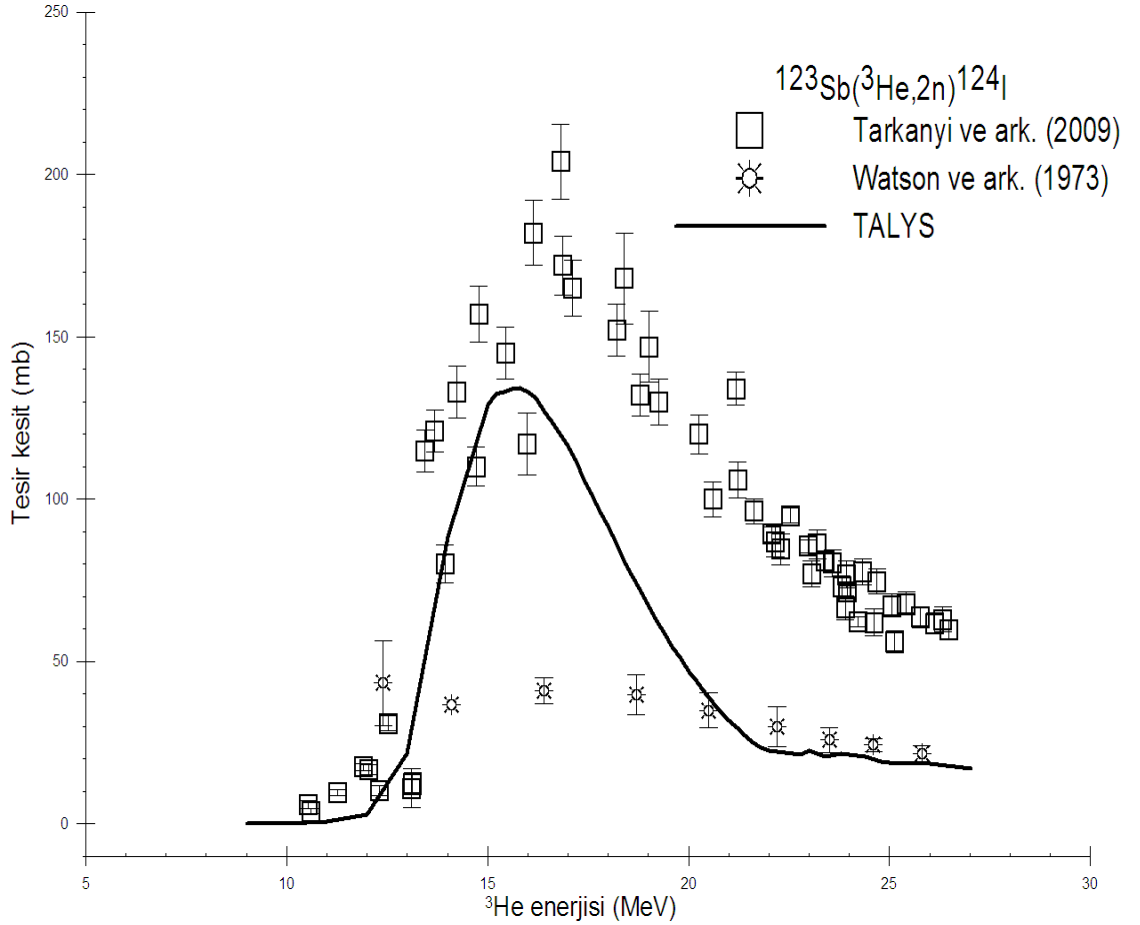
Grafik 4.5. $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar

Grafik incelendiğinde araştırmacıların sonuçları ile hesaplama sonuçlarının eşik civarında farklılıklar gösterdiği görülmektedir fakat genel itibariyle sonuçların bir uyum içinde olduğu görülmektedir ve 34 - 42 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

4.1.2. Antimon Üzerinde ^3He -parçacık Uyarma Reaksiyonu

4.1.2.1. $^{123}\text{Sb} (^3\text{He}, 2n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu

Bu reaksiyon için kullanılan deneyler Çizelge 4.1'de verilmiştir. TALYS 1.2 hesaplamasında optik model parametreleri $\text{avadjust}=1,12$ ve $\text{rvadjust}=1,13$ olacak şekilde değiştirilmiştir. Matris elemanının karesinin ortalamasının ayarı için M2 sabitinin değeri 0,7 olacak şekilde değiştirilmiştir. Nükleer model hesaplama sonuçları deneysel tesir kesitleri ile beraber Grafik 4.6'de gösterilmiştir.



Grafik 4.6. $^{123}\text{Sb} (^3\text{He}, 2n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar

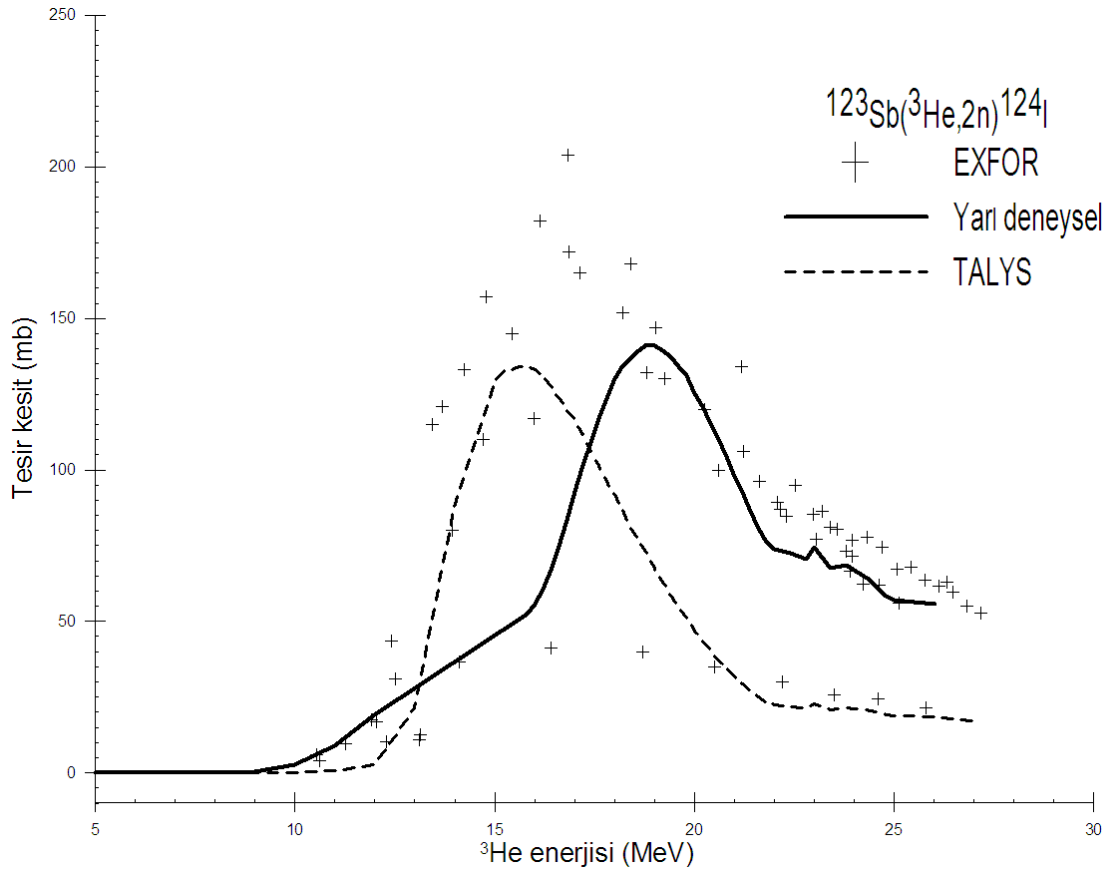
Deneysel verilerin arasında büyük farklılıkların olduğu görülmektedir. Bunlar ölçümlerde büyük tutarsızlıklar olabileceğini göstermektedir ve 14 - 18 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

Çizelge 4.5. $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri

E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)
5	0,00	17	116,40	27	17,00	37	8,10
7	0,00	19	67,50	29	14,50	39	6,20
9	0,14	21	31,70	31	12,60	41	6,00
11	0,70	23	22,70	33	11,00	43	5,30
13	21,50	25	18,90	35	9,40	45	4,60
15	129,10						

$$f(E) = 382,4425139 - 76,95908345 * E + 5,681536235 * E^2 - 0,1821099186 * E^3 + 0,00214797542 * E^4$$

Önerilen uyarma fonksiyonu seçilen ölçümlerle Grafik 4.7’de gösterilmiştir ve sayısal değerler Çizelge 4.6’da yer almaktadır.



Grafik 4.7. $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar

Grafik incelendiğinde normalize edilerek hesaplanan sonuçların araştırmacıların sonuçlarına yaklaştığı görölmektedir ve 18 - 21 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

Çizelge 4.6. $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit

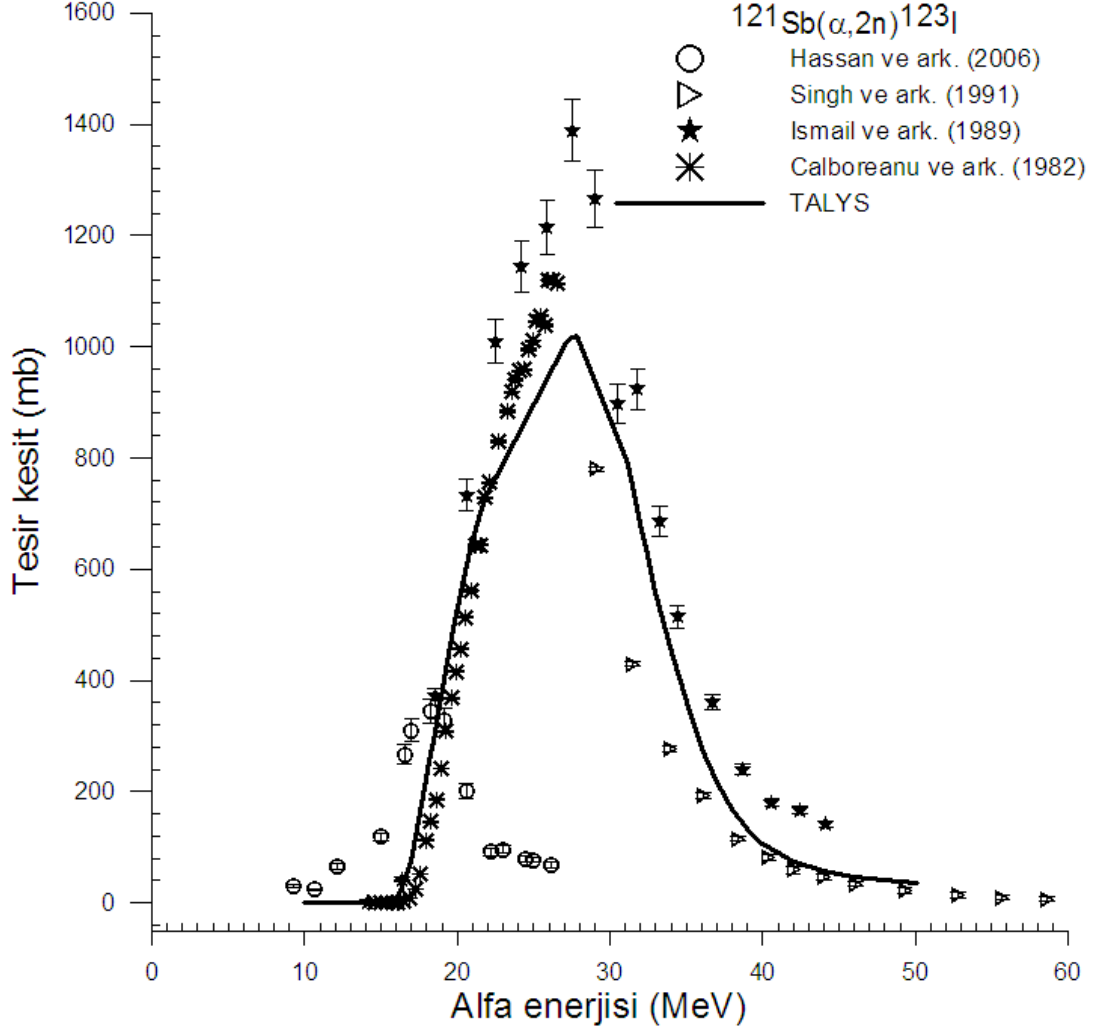
E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)
5	0,00	13	73,49372	19	141,0177	25	57,1273
7	0,00	15	67,43266	21	97,91852	27	58,60272
9	0,44	17	92,7895	23	74,42737	29	95,32603
11	8,820608						

4.2. İzotopik Kirliliklerin Oluşumu

Sb üzerinde ^3He ve α parçacık reaksiyonlarla ^{124}I 'un radyoizotop çekirdeğin yüksek saflıkta elde edilebilmesi için iyot'un farklı radyoizotoplarının incelenmesi gerekmektedir. ^{123}I ($T_{1/2}=13.2$ s), ^{125}I ($T_{1/2}=59.4$ gün) ve ^{126}I ($T_{1/2}=13.1$ gün) beklenen ana kirliliklerdir. Bu kirlilik parçacığın enerjisinin dikkatli seçilmesiyle ve uygulamadan birkaç gün önce radyokimyasal olarak ayrıştırılmış iyot'un bozunması için bekletilmesiyle bastırılabilir. Kısa ömürlü ^{123}I ile daha uzun ömürlü ^{125}I ve ^{126}I gibi kirlilikler olduğundan itibaren α parçacıkların ^{123}Sb ile girişimi çok daha karmaşık durumlar ortaya çıkarmaktadır. ^{nat}Sb 'un ^3He parçacık ile ışınlanmasında hedef çekirdek ^{121}Sb neredeyse hiç radyoizotop çekirdek kirliliğine neden olmayacaktır. ^{124}I 'un üretimi ağırlıklı olarak $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu ile gerçekteştirilmesi daha uygun görölmektedir. ^{126}I ve ^{125}I radyoizotop çekirdeklerinin $^{123}\text{Sb}(^3\text{He}, \gamma)^{126}\text{I}$ ve $^{123}\text{Sb}(^3\text{He}, n)^{125}\text{I}$ reaksiyonları ile çok düşük tesir kesitlerde üretilmesi nedeniyle ^{123}I önemli kirlilik olarak görölmemektedir. ^{124}I 'un ^3He ve α -parçacık reaksiyonlar ile üretilmesi sırasında karşılaşılan $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$, $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ ve $^{123}\text{Sb}(^3\text{He},3n)^{123}\text{I}$ kirliliklerin nükleer model analizleri incelenmiştir (Aslam, 2010).

4.2.1. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ Reaksiyonu

Bu reaksiyon için tesir kesit verileri çeşitli deneylerde ortaya konulmuştur (Çizelge 3.2).



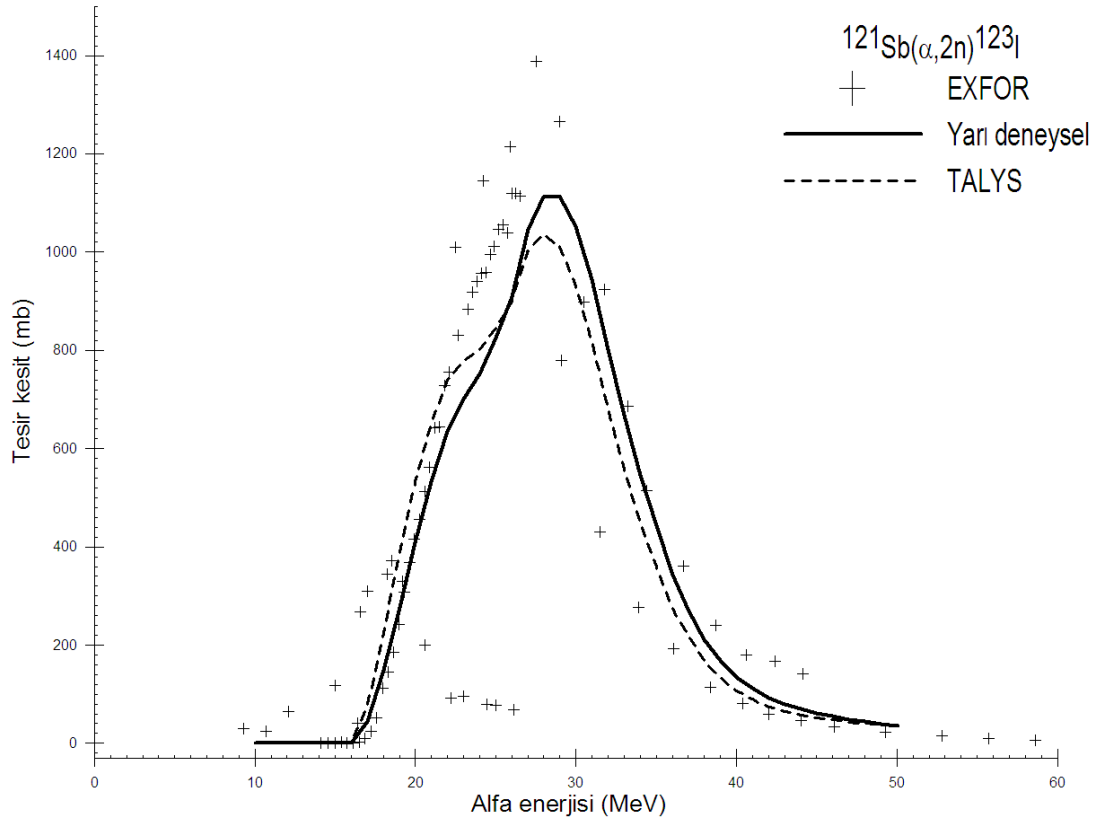
Grafik 4.8. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar

Calboreanu ve Ismail'in uyarma fonksiyonları uyum içindedir. Singh'in verileri uyarma fonksiyonunun maksimumundan sonra düşük olmasına karşın Ismail'in verileri 25 MeV'in altındaki enerjilerde nispeten yüksektir. 24 - 33 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır (Singh ve ark., 1991; Ismail ve ark., 1989).

$$f(E) = -1,188874537 + 0,1777260753 * E - 0,005918047978 * E^2 + 0,0001171971741 * E^3 - 0,000001051524386 * E^4$$

Çizelge 4.7. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri

E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)
10	0,00	22	739,063	32	682,192	42	74,0967
12	0,00	24	801,028	34	449,342	44	58,0445
14	0,00	26	899,656	36	275,925	46	47,8452
16	1,63	28	1036,31	38	167,3	48	40,6503
18	223,16	30	931,203	40	106,036	50	36,4816
20	532,466						



Grafik 4.9. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar

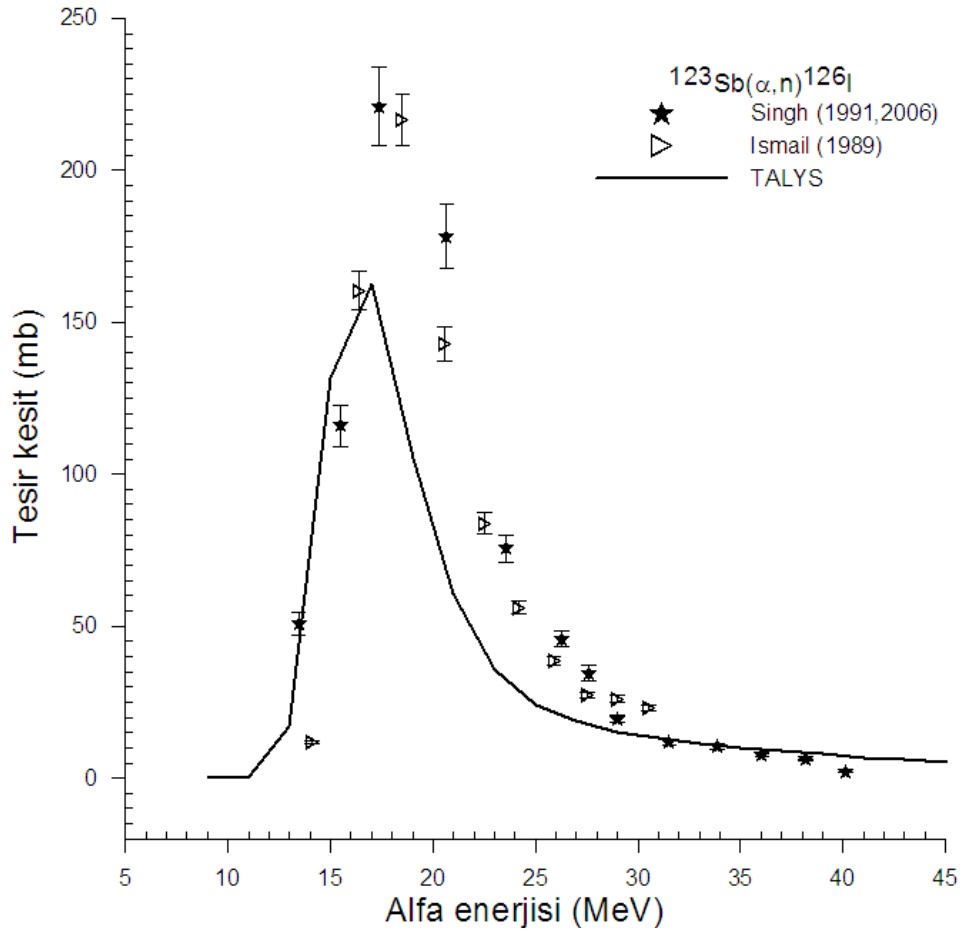
Grafik incelendiğinde hesaplanan değerlerin bir uyum sağladığı görülmektedir ve 24 - 32 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

Çizelge 4.8. $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit

E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)
10	0,00	22	634,3773	32	802,2527	42	92,40333
12	0,00	24	752,1804	34	545,3558	44	70,57292
14	0,00	26	909,3175	36	342,4969	46	55,65762
16	0,90	28	1113,093	38	210,3508	48	44,14361
18	148,60	30	1051,564	40	133,6063	50	35,74936
20	408,8068						

4.2.2. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ Reaksiyonu

Bu reaksiyon üzerindeki çoğu araştırma denge öncesi etkiler üzerine yapılan çalışmalar ile ilgilenmektedir, Çizelge 3.2’de referanslar belirtilmiştir. $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ ve $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ reaksiyonlarında, zenginleştirilmiş ^{121}Sb hedefinden elde edilen veriler ^{nat}Sb hedefinden elde edilen verilerle karşılaştırıldığında tesir kesitlerin daha küçük olduğu görülmüştür.

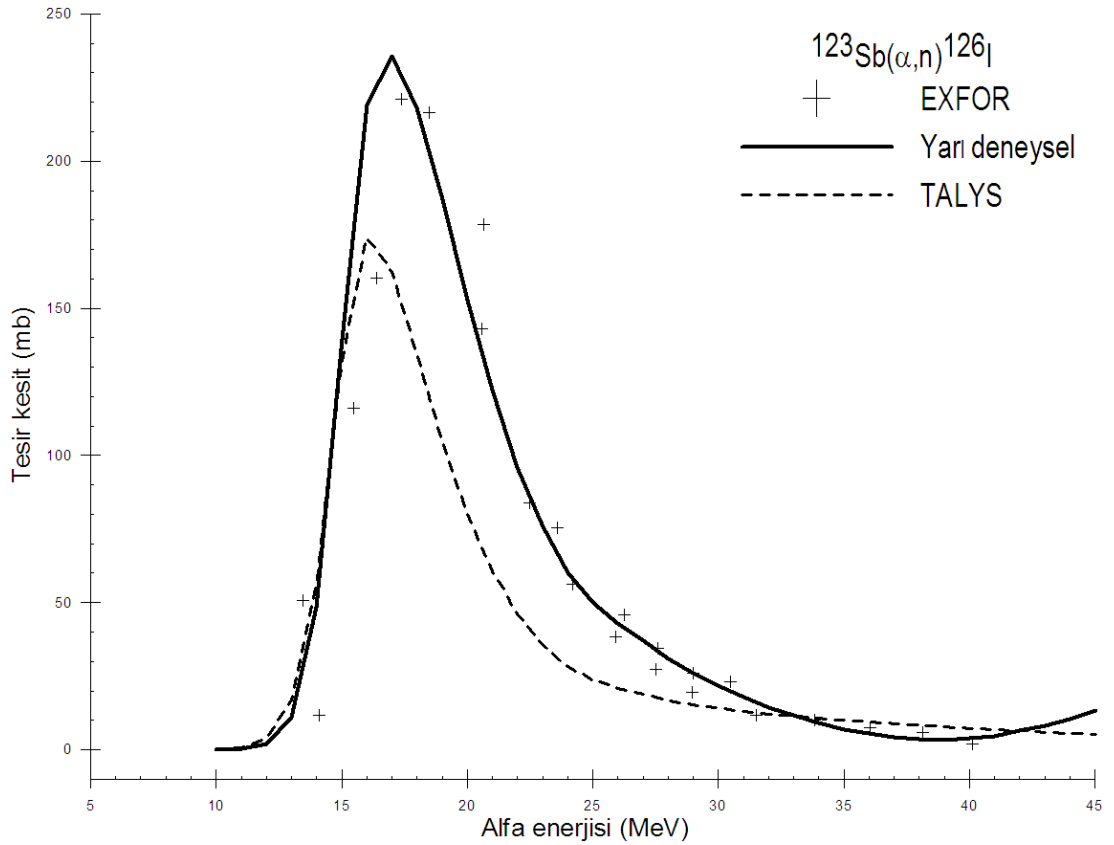


Grafik 4.10. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar

Çizelge 4.9. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri

E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)
5		17	162,543	27	18,9049	37	8,82244
7		19	105,125	29	15,1856	39	7,80593
9	0,01	21	60,8289	31	13,1036	41	6,71004
11	0,69	23	35,6874	33	11,4869	43	6,00935
13	16,87	25	23,8869	35	9,91263	45	5,25827
15	131,691						

$$f(E) = 3,523325238 - 1,041909098 * E + 0,1005859346 * E^2 - 0,003342372096 * E^3 + 0,00003579957552 * E^4$$



Grafik 4.11. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar

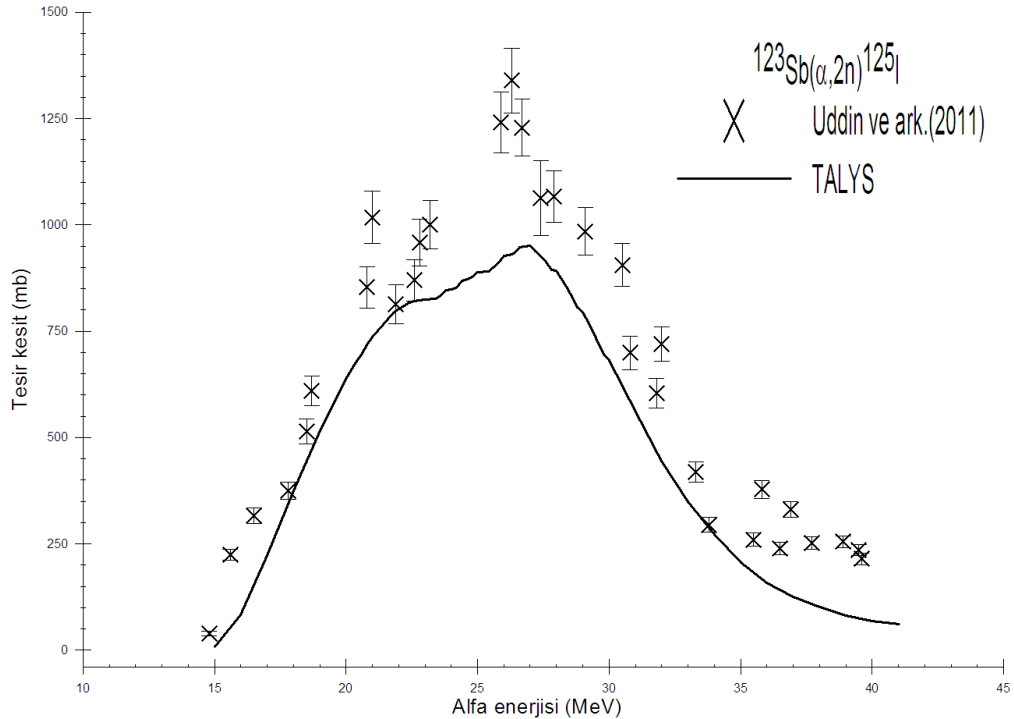
Grafik 4.11 incelendiğinde normalizasyon sonucu elde edilen değerler diğer araştırmacıların değerleri ile büyük oranda örtüştüğü görülmektedir ve 14 - 21 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

Çizelge 4.10. $^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir

E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)
5		17	235,5488	27	36,98513	37	4,127381
7		19	186,9838	29	25,87594	39	3,388651
9	0,01	21	122,2819	31	18,03421	41	4,639492
11	0,21	23	75,69023	33	11,70573	43	8,138303
13	11,08	25	50,19718	35	6,857667	45	13,41338
15	139,378						

4.2.3. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ Reaksiyonu

Bu reaksiyon için kullanılan referans değerler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir ve nükleer model hesaplama sonucunda elde edilen değerler Grafik 4.12’de gösterilmiştir.

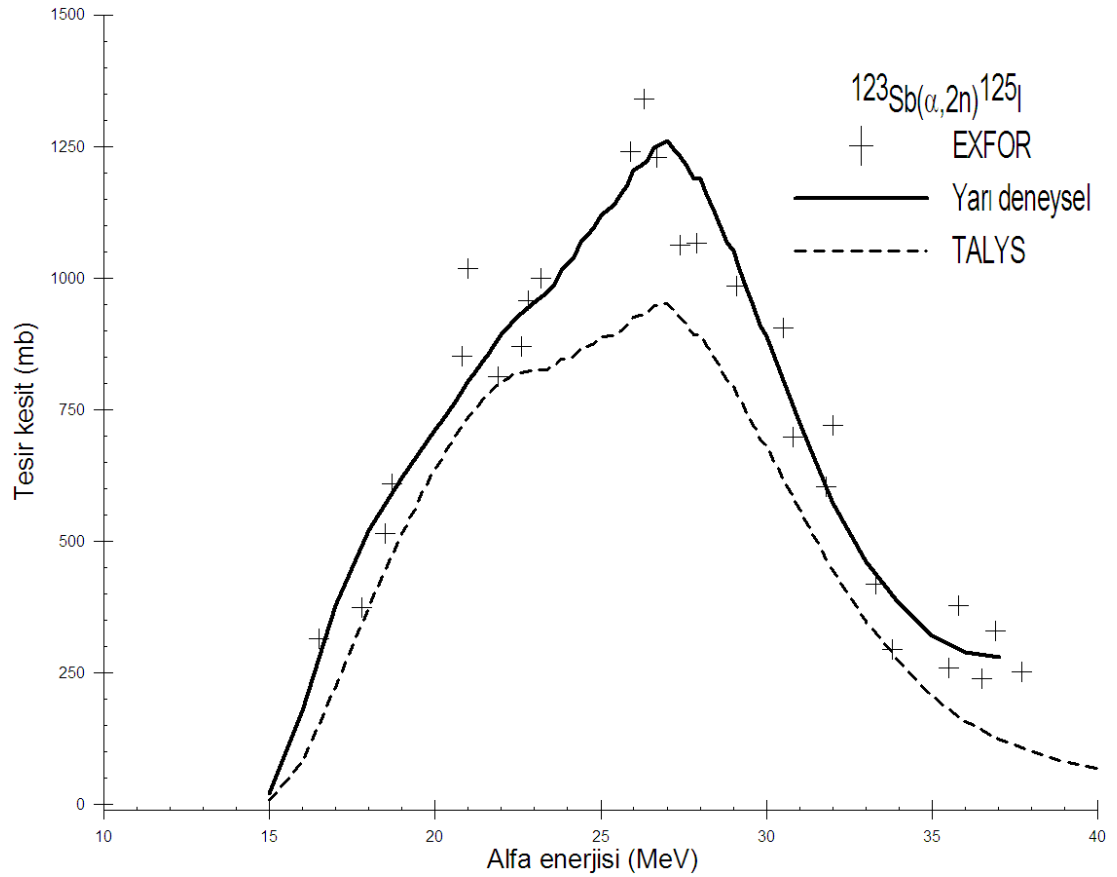


Grafik 4.12. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ için DeneySEL sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar

Çizelge 4.11. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri

E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)
11	0,00	21	1065,12	31	18,03421	39	111,523
13	0,00	23	1017,51	33	11,70573	41	78,1518
15	20,90	25	1001,09	35	6,857667	43	58,6912
17	400,22	27	1230,88	37	189,179	45	49,4717
19	806,54	29	1119,6				

$$f(E) = 71,94864404 - 11,05995652 * E + 0,6372793801 * E^2 - 0,01606474525 * E^3 + 0,0001498190763 * E^4$$



Grafik 4.13. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar

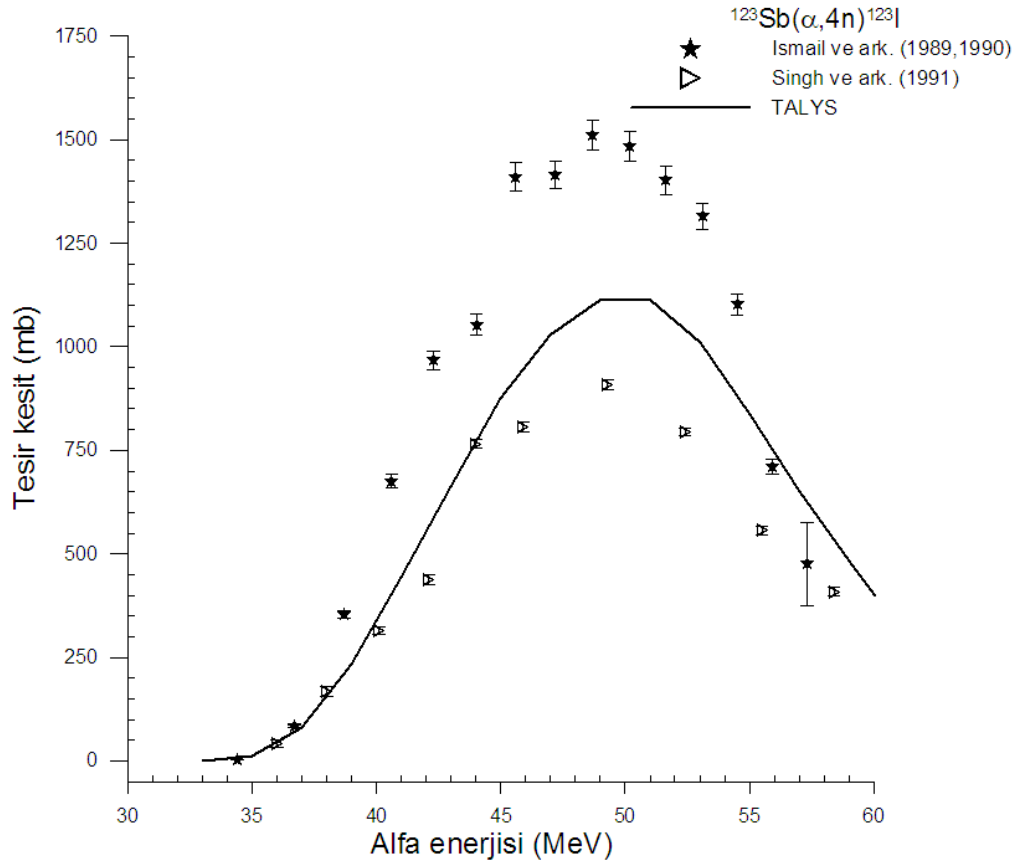
Grafik 4.13 incelendiğinde normalizasyon sonucu elde edilen değerler diğer araştırmacıların değerleri ile büyük oranda örtüştüğü görülmektedir ve 22 - 32 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

Çizelge 4.12. $^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir

E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)
17	377,67	25	1120,448	33	461,21	39	291,8133
19	621,11	27	1260,609	35	321,1944	41	364,455
21	803,08	29	1051,304	37	279,5407	43	474,1518
23	953,88	31	723,6709				

4.2.4. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ Reaksiyonu

Bu reaksiyon için kullanılan referans değerler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir ve nükleer model hesaplama sonucunda elde edilen değerler Grafik 4.14’de gösterilmiştir.

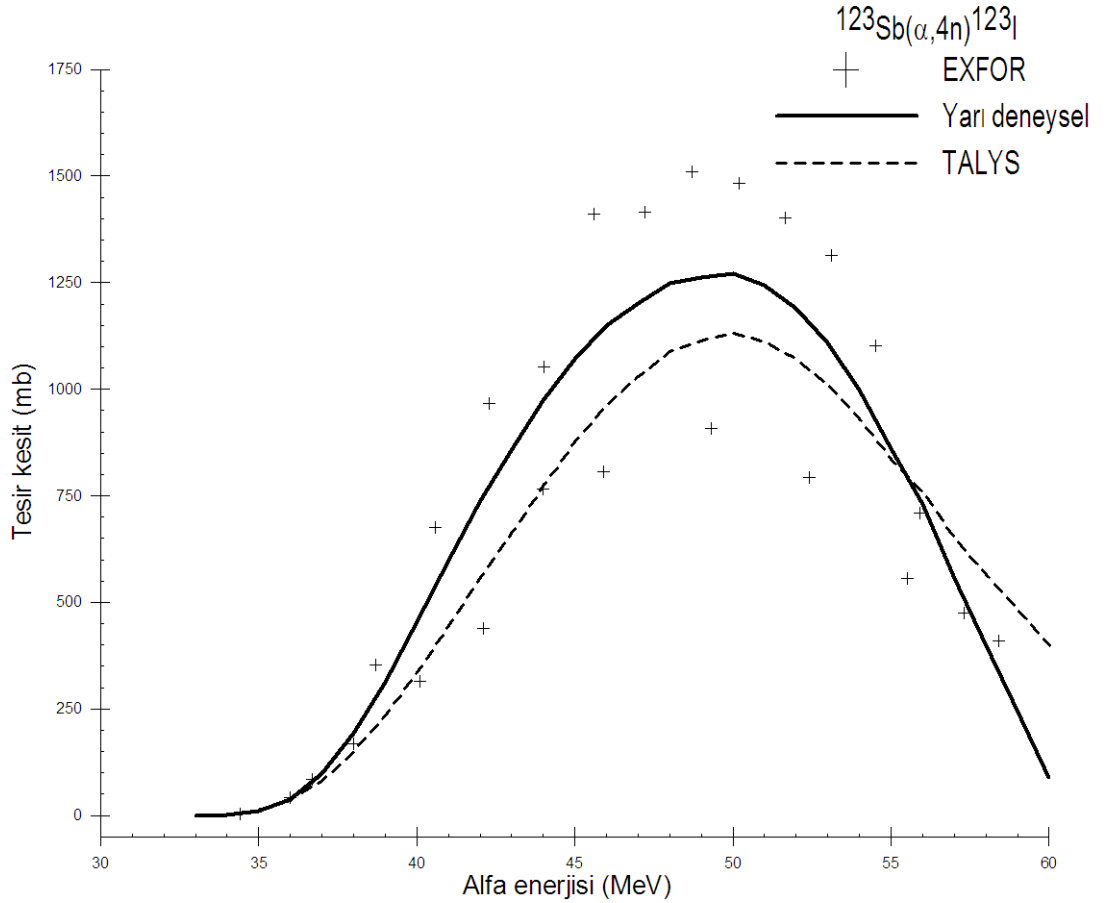


Grafik 4.14. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ için DeneySEL sonuçlar ve Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar

Çizelge 4.13. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir kesit değerleri

E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)	E (MeV)	σ (mb)
33	0,11	41	444,876	49	1113,67	57	651,413
35	11,23	43	662,317	51	1111,8	59	483,709
37	81,36	45	875,208	53	1011,02	60	400,525
39	234,02	47	1028,61	55	835,684		

$$f(E) = -217,1973886 + 18,83293814 * E - 0,6043868484 * E^2 + 0,008565173357 * E^3 - 0,00004528064073 * E^4$$



Grafik 4.15. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ için Deneysel sonuçlar, Nükleer model kod yardımıyla elde edilen sonuçlar, Polinom tipi denklem yardımıyla elde edilen sonuçlar

Sonuçlara göre 45 - 55 MeV enerji aralığında yüksek verim alınmaktadır.

Çizelge 4.14. $^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$ reaksiyonu için kullanılan enerji değerleri ve normalizasyon sonucu TALYS 1.2 yardımıyla hesaplatılan tesir

E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)	E (MeV)	σ_{ev} (mb)
33	0,023831	41	599,1711	49	1262,851	57	556,8771
35	9,701805	43	856,6455	51	1243,48	59	241,9567
37	97,98173	45	1071,215	53	1109,043	60	90,75368
39	313,1659	47	1200,457	55	859,5402		

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada ^{124}I 'un üretimi için Sb izotopları üzerinde ^3He - ve α -parçacıklarıyla oluşturulan reaksiyonlar ele alınmış ve bu reaksiyonlara ait tesir kesitleri hesaplanmıştır. Her bir reaksiyon için uygun olan enerji aralığı belirlenmiştir. En ideal tesir kesit değerlerini tespit edebilmek için normalizasyon yöntemi uygulanarak düzenlemeler yapılmıştır. Literatürden alınan değerler ile TALYS 1.2 nükleer model kodu kullanılarak yapılan hesaplamalar karşılaştırılmıştır.

5.1. ^{124}I 'un üretiminde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

Özellikle ^{124}I 'un üretimi ile ilgili, Sb izotopları üzerinde ^3He ve α -parçacık reaksiyonların karşılaştırması Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Daha önce belirtildiği gibi, tesir kesiti bir reaksiyonun gerçekleşme olasılığını vermektedir. Dolayısıyla tesir kesiti değerinin büyük olması olumlu bir sonuçtur. ^{124}I 'un üretimi için reaksiyonlar karşılaştırıldığında, $^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$ reaksiyonunun daha yüksek tesir kesit değerine sahip olduğu görülmektedir. Ancak düşük enerji ile çok ürün elde etmek maddi açıdan oldukça önemlidir. Dolayısıyla maksimum tesir kesitine sahip düşük enerji aralığı olan reaksiyonları seçmek daha verimli olacaktır. ^{124}I üretimi için enerji aralığı değeri düşük olan iki reaksiyondan yüksek tesir kesite sahip olanının $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu olduğu görülmektedir. Dolayısıyla ^{124}I üretimi için en uygun olan $^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonudur.

Çizelge 5.1. Radyoizotopların üretim reaksiyonlarının uygun üretim enerji aralıkları ve maksimum tesir kesit değerleri

Radyoizotoplar	Üretim Reaksiyonları	Uygun üretim enerji aralığı	Maksimum tesir kesit değeri
^{124}I	$^{121}\text{Sb}(\alpha,n)^{124}\text{I}$	16 - 21 MeV	480 mb
	$^{123}\text{Sb}(\alpha,3n)^{124}\text{I}$	34 - 42 MeV	1360 mb
	$^{123}\text{Sb}(^3\text{He},2n)^{124}\text{I}$	14 - 18 MeV	145 mb
^{123}I	$^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$	24 - 32 MeV	1100 mb
	$^{123}\text{Sb}(\alpha,4n)^{123}\text{I}$	45 - 55 MeV	240 mb
^{125}I	$^{123}\text{Sb}(\alpha,2n)^{125}\text{I}$	22 - 32 MeV	1250 mb
^{126}I	$^{123}\text{Sb}(\alpha,n)^{126}\text{I}$	14 - 21 MeV	1250 mb

Çizelge 5.1 'den görüldüğü gibi,

- $^{121}\text{Sb}(\alpha, n) ^{124}\text{I}$ reaksiyonu için 16-21 MeV α enerji aralığında çalışıldığında ^{123}I izotopik kirliliğinin üretimi ve
- $^{123}\text{Sb}(\alpha, 3n) ^{124}\text{I}$ reaksiyonu için 34-42 MeV α enerji aralığında çalışıldığında ise ^{123}I , ^{125}I , ^{126}I izotopik kirliliklerinin üretimi elelenmiş olur.

KAYNAKLAR

- Arya, A.P., Fundamentals of Nuclear Physics. Allyn and Bacon, Boston, 1966.
- Aslam, M.N., Sudar, S., Hussain, M., Malik, A.A., Qaim, S.M., Evaluation of excitation functions of ^3He - and α -particle induced reactions on antimony isotopes with special relevance to the production of Iodine-124, Applied Radiation and Isotopes 69, 94-104, 2011.
- Aydın, A., $^{40}\text{Ar}(p,p)^{40}\text{Ar}$ Esnek Saçılmasının 22.6, 27.5, 30.0, 36.7 MeV Proton Enerjilerinde Optiksel Model Analizi. Doktora Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 1997.
- Bayrak, O., Hafif-Ağır İyon Reaksiyonlarının Yeni Bir Potansiyel Yaklaşımı ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2004.
- Bushberg, J.T., Seibert, J.A., Leidholdt Jr, E.M., Boone, J.M., The Essential Physics of Medical Imaging. Lippincott Williams & Wilkins Publisher, Baltimore, 2011.
- Calboreanu, A., Pencea, C., Salagean, O., The effect of gamma de-excitation competition on the (a,n) and (a,2n) reactions on gold and antimony. Nucl. Phys. A 383, 251–263, 1982.
- Cantez, S., Gorpe, A., Pratik Nükleer Tıp. 266-276. İstanbul Üniversitesi Vakfı Tayf Ofset Basım, İstanbul, 1992.
- EXFOR, Experimental Nuclear Reaction Data, National Nuclear Data Center (NNDC) (CSISRS alias EXFOR), 2012.
- Hassan, K.F., Qaim, S.M., Saleh, Z.A., Coenen, H.H., ^3He -particle induced reactions on natSb for production of ^{124}I . Appl. Radiat. Isot. 64, 409–413, 2006b.
- Ismail, M., Hybrid model analysis of the excitation function for alpha induced reactions on ^{121}Sb and ^{123}Sb . Pramana-J.Phys.32, 605–618, 1989.
- Ismail, M., Measurements and analysis of the excitation function for alpha induced reactions on Ga and Sb isotopes. Phys.Rev. C41, 87–108, 1990.
- Koçak, G., Nükleer Kümelenme: Nükleer Reaksiyon ve Yapı Formalizmine Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2005.
- Koning, A. J., Hilaire, S., Duijvestijn, M. TALYS-1.2 A Nuclear Reaction Program, User Manual. NRG, The Netherlands, 2009.

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 ile Optik Model Analizleri. Doktora Tezi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 2006.

Qaim, S.M., Hohn, A., Bastian, Th., El-Azoney, K.M., Blessing, G., Spellerberg, S., Scholten, B., Coenen, H.H., Some optimization studies relevant to the production of high purity ^{124}I and $^{120\text{g}}\text{I}$ at a small sized cyclotron. Appl. Radiat. Isot. 58, 69–78, 2003.

Qaim, S.M., Radiochemical determination of nuclear data for theory and applications. J. Radioanal. Nucl. Chem. 284, 489–505, 2010.

Satchler, G.R., Introduction to Nuclear Reactions. 153-210. Mc Millan Pres Ltd., London, 1980.

Savaş, F. Medikal Fizikte Kullanılan Bazı Radyonüklidlerin Nükleer Reaksiyon Tesir Kesitlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2013.

Scholten, B., Kovacs, Z., Tarkanyi, F., Qaim, S.M., Excitation functions of $^{124}\text{Te}(p, xn)^{124,123}\text{I}$ reactions from 6 to 31 MeV with special reference to the production of ^{124}I at a small cyclotron. Appl. Radiat. Isot. 46, 255–259, 1995.

Scholten, B., Hassan, K.F., Saleh, Z.A., Coenen, H.H., Qaim, S.M., 2008. Comparative studies on the production of the medically important radionuclide ^{124}I via p-, d-, ^3He - and α -particle induced reactions. In: Bersillon, O., Gungor, F., Bauge, E., Jacqmin, R., Leray, S.(Eds.), Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22–27, Nice, France, pp. 1359–1361, 2007,

Singh, B.P., Bhardwaj, H.D., Prasad, R., A study of pre-equilibrium emission in α -induced reactions on ^{121}Sb , ^{123}Sb . Can.J.Phys. 69, 1376–1382, 1991.

Singh, B.P., Manoj, K.S., Musthafa, M.M., Bhardwaj, H.D., Prasad, R., A study of pre-equilibrium emission in some proton and alpha induced reactions. Nucl. Instrum. Method Phys. Res. A 562, 717–720, 2006.

Tarkanyi, F., Taka'cs, S., Kiraly, B., Szelecse'nyi, F., Ando', L., Bergman, J., Heselius, S.J., Solin, O., Hermanne, A., Shubin, Yu.N., Ignatyuk, A.V., Excitation functions of ^3He - and α -particle induced nuclear reactions on $^{\text{nat}}\text{Sb}$ for production of medically relevant ^{123}I and ^{124}I radioisotopes. Appl. Radiat. Isot. 67, 1001–1006, 2009.

- Uddin,M.S., Hermanne,A., Sudár,S., Aslam, M.N., Scholten^B, Coenen, H.H., Qaim, S.M., Excitation functions of α -particle induced reactions on enriched ^{123}Sb and $^{\text{nat}}\text{Sb}$ for production of ^{124}I , 2011.
- Ulu, M.O., Parçacık Detektörlerin Tıpta Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2008.
- Uyar R., Yılmaz M.E., Kiremitçioğlu Ş., Akçaalan U., Nükleer Fizik'te Benzetim Programları Üzerine Değerlendirme, Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, s.951-956, 2013.
- Watson, I.A., Waters,S.L., Silvester,D.J., Excitation functions for the reactions producing ^{121}I , ^{123}I and ^{124}I from irradiation of $^{\text{nat}}\text{Sb}$ with ^3He and ^4He particles with energy up to 30MeV. J.Inorg. Nucl. Chem. 35, 3047–3053, 1973.