

**NÜKLEER TIPTA KULLANILAN  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  
 $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  VE  $^{67}\text{Cu}$  RADYOİZOTOPLARININ  
UYARILMA FONKSİYONLARININ  
TALYS 1.6 İLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Niyazi BALÇIN**

**Danışman**

**Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**Nisan 2017**

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NÜKLEER TIPTA KULLANILAN  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  VE  $^{67}\text{Cu}$   
RADYOİZOTOPLARININ UYARILMA FONKSİYONLARININ  
TALYS 1.6 İLE İNCELENMESİ**

**Niyazi BALÇIN**

**Danışman**

**Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**Nisan 2017**

## TEZ ONAY SAYFASI

Niyazi BALÇIN tarafından hazırlanan “Nükleer Tıpta Kullanılan  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  ve  $^{67}\text{Cu}$  Radyoizotoplarının Uyarılma Fonksiyonlarının TALYS 1.6 İle İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 28/04/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM

**Başkan** : Prof. Dr. Rıdvan ÜNAL  
Uşak Üniversitesi Sağlık Hizmetleri MYO

**Üye** : Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi

**Üye** : Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
...../...../..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

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

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

**beyan ederim.**

**28/04/2017**

**Niyazi BALÇIN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NÜKLEER TIPTA KULLANILAN <sup>60</sup>CU, <sup>61</sup>CU, <sup>62</sup>CU, <sup>64</sup>CU VE <sup>67</sup>CU RADYOİZOTOPLARININ UYARILMA FONKSİYONLARININ TALYS 1.6 İLE İNCELENMESİ

Niyazi BALÇIN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Bakırın radyofarmasötiklerinde kullanılabilen beş radyoizotopu (<sup>60</sup>Cu, <sup>61</sup>Cu, <sup>62</sup>Cu, <sup>64</sup>Cu, and <sup>67</sup>Cu) vardır. Bu radyoizotoplar,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$  ve  $\gamma$ 'dan oluşan karışık emisyonlarla, 9,74 dakikadan (<sup>62</sup>Cu için) 2,58 güne (<sup>67</sup>Cu için) kadar geniş bir yelpazede yarılanma ömrü ile bozunur ve bu, nükleer tıpta tanınal ve tedaviye yönelik kullanılan farklı biyomedikal uygulamalar için çeşitli radyofarmasötiklerin tasarımını ve sentezini sağlar. Kullanılabilirlik ve üretim maliyeti nedeniyle, radyofarmasötiklerdeki araştırma çabaları, esas olarak, tasarlanan üretkenliğin olasılığını gösteren reaksiyon kesitlerinin hesaplanmasına odaklanmıştır. Bu çalışmada, nükleer tıpta kullanılan <sup>60</sup>Cu, <sup>61</sup>Cu, <sup>62</sup>Cu, <sup>64</sup>Cu ve <sup>67</sup>Cu radyoizotoplarının üretimini destekleyebilecek nükleer reaksiyon tesir kesitleri 0-50 MeV aralığında geliş enerjisine sahip parçacıklarla TALYS 1.6 kullanılarak hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

**2017, ix + 26 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Reaksiyon tesir kesiti, Radyoizotop, Radyofarmasötik, Bakır, TALYS 1.6

## ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF EXCITATION FUNCTIONS OF  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  AND  $^{67}\text{Cu}$  RADIOISOTOPES USED IN NUCLEAR MEDICINE WITH TALYS 1.6

Niyazi BALÇIN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Copper has five radioisotopes ( $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ , and  $^{67}\text{Cu}$ ) that can be used in copper radiopharmaceuticals. These radioisotopes decay by mixed emissions of  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ , and  $\gamma$  with a wide range of half-lives from 9.74 min (for  $^{62}\text{Cu}$ ) to 2.58 d (for  $^{67}\text{Cu}$ ), which enable the design and synthesis of a variety of radiopharmaceuticals for different biomedical applications used in diagnostic and therapeutic nuclear medicine. Due to the availability and production cost, the research efforts in copper radiopharmaceuticals are mainly focused on calculations of reaction cross sections that show the possibility of the intended productivity in this process. In this study, it is aimed to examine the nuclear reaction cross section which may support the production of the radioisotopes  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ , and  $^{67}\text{Cu}$  by using TALYS 1.6 in the particle incident energy range of 0-50 MeV.

**2017, ix + 26 pages**

**Keywords:** Reaction cross section, Radioisotope, Radiopharmaceutical, Copper, TALYS 1.6

## TEŐEKKÖR

Fizik eğitimim süresince yardımlarını, bilgilerini ve tecrübelerini benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM'a ve Prof. Dr. Rıdvan ÜNAL'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında emeği geçen Sercan ÇEVRE, Ufuk AKÇAALAN ve Özgün AĖAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli aileme ve eğitimim boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Emine Nur KÖSE'ye teşekkür ederim.

Niyazi BALÇIN  
AFYONKARAHİSAR, 2017

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Nükleer Tıp .....	2
1.2 Radyoizotop Üretimi .....	3
1.3 Radyoizotop Hazırlanması .....	3
1.4 Radyoizotop Kalite Kontrolü .....	4
1.5 Tesir Kesiti.....	4
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	5
3. MATERYAL ve METOT .....	9
3.1 Benzetim Programlarının Fizik İçin Önemi.....	9
3.2 TALYS 1.6.....	9
3.3 Ana Anahtar Kelime .....	10
3.4 Talys Çıktı Dosyası.....	10
3.5 Nükleer Tıpta Bakır Radyoizotopu .....	10
4. BULGULAR .....	12
4.1 Cu <sup>60</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti .....	12
4.2 Cu <sup>61</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti .....	13
4.3 Cu <sup>62</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti .....	15
4.4 Cu <sup>64</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti.....	17
4.5 Cu <sup>67</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti.....	19
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	20
6. KAYNAKLAR.....	22
ÖZGEÇMİŞ.....	26



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

$\alpha$	Alfa
$\beta$	Beta
$\gamma$	Gama
$\sigma$	Tesir Kesiti
mb	Milibarn
mSv	MiliSievert
p	Proton
n	Nötron
d	Döteryum
t	Trityum
MeV	Megaelektrovolt
K	Kelvin
cm	Santimetre

### Kısaltmalar

---

PET	Pozitron Emisyon Tomografi
SPECT	Tek Fotonlu Emisyonlu Bilgisayarlı Tomografi
CT	Bilgisayarlı Tomografi
EOB	Bombardıman Sona Ermesi
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
TOF	Seviye Ölçüm Cihazı (Time Of Flight)

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.1 Proton ile uyarılmış $^{60}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{60}\text{Cu}$ elde edilmesi. ....	12
Şekil 4.2 Proton ile uyarılmış $^{61}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{61}\text{Cu}$ elde edilmesi. ....	13
Şekil 4.3 Proton ile uyarılmış $^{62}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{61}\text{Cu}$ elde edilmesi. ....	14
Şekil 4.4 Döteryum ile uyarılmış $^{62}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{62}\text{Cu}$ elde edilmesi.....	15
Şekil 4.5 Proton ile uyarılmış $^{62}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{62}\text{Cu}$ elde edilmesi. ....	16
Şekil 4.6 Döteryum ile uyarılmış $^{64}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{64}\text{Cu}$ elde edilmesi.....	17
Şekil 4.7 Proton ile uyarılmış $^{64}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{64}\text{Cu}$ elde edilmesi. ....	18
Şekil 4.8 Alfa ile uyarılmış $^{64}\text{Ni}$ hedef çekirdeğinden $^{67}\text{Cu}$ elde edilmesi.....	19

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1</b> Nükleer tıpta kullanılan bakır radyoizotopunun üretim şekli, reaksiyonu ve kullanım alanları .....	11
---	----

## 1. GİRİŞ

Nükleer fizik, teknolojinin gelişmesine paralel olarak önemi artan bir bilim dalıdır. Nükleer fizik temel ve uygulamalı araştırmalar için önemlidir. Nükleer fizik radyasyondan koruma malzemesi tasarımları (zırhlama), radyoterapide insan vücudunda radyasyon miktarı hesaplamaları, nükleer tıp, nötron üretimi, atık dönüşümü, tıbbi malzemelerin sterilizasyonu ve enerji üretimi gibi önemli alanlarda kullanılır (Krane 2006).

1896 yılında Henri Becquerel'in uranyum tuzlarında ışıltama olayı üzerinde çalışırken radyoaktiviteyi bulması, 1934 yılında Ernest Orlando Lawrence'in siklotronu keşfetmesiyle yüklü parçacıkların hızlandırılabilmeye başlanması ve 1937 yılında bulunan tıbbi görüntüleme de yaygın olan <sup>99m</sup>Tc radyoizotopunun 1965 yılında ticari amaçlı üretilip 1970 yılında ABD'de tıbbi görüntüleme amacıyla ilk defa kullanılmaya başlanması tıp alanında birçok hastalığın tanı ve tedavisinde önemli gelişmelere yol açmıştır. Son yüzyıldaki teknolojik gelişmeler, radyoizotop kullanılarak görüntüleme ve tedavi yapılmasını uygulanabilir hale getirmiştir ve günümüzde önemi giderek artmaktadır.

Tıpta görüntüleme yöntemlerinin bazıları;  $\gamma$ -ışını kameraları, tıbbi radyoizotopların üretimi için kullanılan özel hızlandırıcılar ve vücudun bazı bölgelerindeki görüntüleri elde etmek için kullanılan radyofarmasötik maddelerin vücuda enjekte yöntemleridir. Tüm bu araştırma yöntemleri nükleer tıp olarak adlandırılır (Savaş 2013).

Görüntüleme sonuçları tıp alanında iskelet sistemiyle ilgili sorunlar için tanının konulmasından önemli bir yeri vardır. X-ışınları sayesinde insanın iskelet yapısı hakkında ayrıntılı analizler yapılabilmektedir. Özellikle kanser hastalığının teşhis edilmesi, hastalığın boyutu, hastalığın ilerleme düzeyinin belirlenebilmesi için görüntüleme çok önemlidir. Radyoizotopların X-ışınlarına göre organ veya hasarlı bölgeye nüfuz etmesinden elde edilen görüntüleme daha ayrıntılıdır. Örnek olarak dokuyu canlı veya cansız, dokunun yumuşaklığına göre ayırt edilebilir (Savaş 2013).

## 1.1 Nükleer Tıp

Nükleer tıp, birçok yönteme göre hastalıkları önceden hızlı ve doğru bir şekilde görüntülemenin kullanıldığı bir alandır. Nükleer tıpta kullanılan radyoizotoplar vücuda verilerek ilgili organın ve hücrenin üç boyutlu olarak görüntülerini elde edilebilmektedir.

Radyoizotopların yaklaşık %95'i teşhis, %5'i tedavi amacıyla kullanılmaktadır. Radyoaktif maddelerin tedavide kullanılmasında temel yöntem; hedefte bulunan hücreye gönderilen radyoizotop madde hücre ölümü oluşturarak çevre dokularda ise hasarı en az seviyede tutarak vücudu radyasyonun zararlı etkilerinden korumaktadır. Bakır (Cu) radyoizotopların pozitron yayınlama özellikleri vardır. Bu sebepten dolayı tanısal görüntüleme ve radyasyon tedavisinde kullanımı amacıyla büyük çapta inceleme ve araştırmalar yapılmaktadır (Akça *et al.* 2013).

Bu nedenle güvenirliliği ve tedavideki önemi kanıtlanmış radyoizotop maddeler tanı ve tedavi amaçlı nükleer tıpta kullanılmaktadır. Radyoizotoplar genellikle tanı amaçlı kullanılır ve günümüzde bu alanda en çok kullanılan radyoizotop Teknesyum-99'dur. Teknesyum radyoizotopunun yarı ömrü 6 saattir ve vücuttan tamamen atılımı 24 saati bulur. Bazı radyoizotopların vücuttan temizlenmesi 15 günü bulabilir.

Nükleer tıp tedavilerinde işlem dışı radyasyona maruz kalınmaması, vücutta gelişmekte olan dokuların radyasyondan etkilenme olasılığı fazla olacak olmasından radyoizotopun cinsine ve yarılanma sürelerine göre etkili korunma yöntemlerinden yararlanılması gerekir. Nükleer tıp alanında radyofarmasotikler çeşitli teşhis ve tedavi amacıyla kullanılmaktadır. Uygulanma amaçları aşağıda sunulmuştur.

Radyofarmasotikler;

1. Organa ait hücrelerin canlılık sürelerini saptamak,
2. Organın veya kanın hacmini tespit etmek,
3. Organda bir tümör veya kitle olup olmadığını belirlemek,
4. Organdaki doku kayıpları, infarktlar, nekrozlar ve abseleri tespit etmek,

5. Organda meydana gelmesi muhtemel olan yer deęiřtirme, eksiklik, dönme gibi durumları belirlemek,
6. Herhangi bir tümöral dokuyu tedavi etmek,
7. Herhangi bir metastatik oluşumun önlenmesi konularında yararlanılmaktadır.

Sonuç olarak nükleer tıp uygulamaları yapay radyoaktiflik üzerine yapılan çalışmalar ile birlikte, görüntüleme ve tedavi amaçlı kullanılan radyoizotoplar yapay olarak üretilebilmeye başlanmıştır. Nükleer fizikte teknolojik gelişmelerin artmasıyla, nükleer tıpta görüntüleme alanı da gelişmeye başlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte nükleer tıp hem güvenli hem de tedavideki önemi kanıtlanmıştır.

## **1.2 Radyoizotop Üretimi**

Radyofarmasötiklerin hazırlanması için öncelikle radyoizotop maddelerin üretilmesi gerekir. Üretilen radyofarmasötik maddeler için kullanılarak radyoizotopların kullanılabilir fiziksel ve kimyasal yapıda olması gerekir (Seyrek 2007).

Radyoizotop üretimi için genellikle;

1. Reaktör sisteminde radyoizotop üretimi
2. Hızlandırıcı sistemlerinde radyoizotop üretimi
3. Jeneratör sistemlerinde radyoizotop üretimi kullanılır (Savaş 2013).

## **1.3 Radyoizotop Hazırlanması**

Bir radyoizotopun hazırlanması karışık kimyasal işlemleri gerektirir. Kullanılacak bileşik ve maddenin uygulanabilir saflıkta, temizlikte olması gerekir. Ortamın ve bileşik oluşturulacak kabın steril olması gerekir.

## 1.4 Radyoizotop Kalite Kontrolü

Radyoizotop üretiminin en önemli noktalarından biri de kalitesidir. Radyoizotopun radyasyonu, kimyasal yapısı, bekleme ve nakil sırasında bileşimin bozulmaması önemlidir. Kalite kontrolü için;

1. Uygulama yerinde deney uygunluğunun laboratuvar hayvanları üzerinde incelenmesi
2. Safsızlık miktarlıklarının araştırılması
3. Radyonüklidlik safsızlığının araştırılması
4. Steriliteğin kontrolü
5. Radyoaktiviteye uygun ve çevreye zarar vermeyecek nakil şeklinin kontrolü

Gibi uygulama alanları vardır (Seyrek 2007).

## 1.5 Tesir Kesiti

Tesir kesiti uyarılma fonksiyonu olarak da adlandırılır. Tesir kesiti reaktör ve hızlandırıcı da üretilen radyoizotop sayısı ve hedef maddenin diğer radyoizotoplara dönüştürülme seviyesini belirler. Gönderilen parçacık ile hedef çekirdeğin tepkimeye girerek reaksiyonun oluşma olasılığını kısacası ifade eder.

Tesir kesiti, radyoizotop üretiminde herhangi bir nükleer reaksiyonda gönderilen parçacık ile hedef çekirdeğe çarptığında hangi durumlarla karşılaşacağımızı yorumlama imkanı buluruz. Tesir kesiti alan boyutunda bir büyüklüktür, birimi barn (b) dır ve  $1b = 10^{-24}cm^2$  dir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu başlık altında nükleer tıp alanında tedavi ve tanı amaçlı kullanılan radyoizotoplarla ilgili tesir kesitleriyle nükleer reaksiyonlarının üretim olasılıklarının daha önce yapılmış hesaplama ve karşılaştırmaları özetlenmiştir.

Nükleer tıp 1950'lerde doktorlar tarafından endokrin bir vurgu ile geliştirilmiştir. Başlangıçta tiroid hastalığını teşhis ve tedavi etmek için iyot-131 kullanılmıştır. Son yıllarda radyoloji uzmanlarının katkısıyla kurulan çift bilgisayarlı tomografi/pozitron emisyon tomografisi (CT/PET) prosedürleri radyoizotop üretiminde hızlandırıcıların rolünü arttırmıştır. 2001 yılında Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency-IAEA) tarafından pozitron emisyon tomografisi radyoizotoplarının üretimi için yüklü parçacık içeren reaksiyonların tesir kesiti veri tabanının doğrulama ve geliştirilmesi yapılmıştır. Çoğu durumda yeni derlenmiş deneysel veriler önceki önerilen verileri destekliyor ancak bazı durumlarda yeni seçilen tesir kesiti veri setlerinde önce yapılan kararları etkilemiş ve bu kararların değişmesinde etkili olmuştur. Seçilen veri setleri için uygun bir eğri yöntemi uygulanmış ve bu gibi durumlarda önerilen veri güncellemeleri yapılmıştır. Literatürde deneysel alanda mevcut verilerle yeni önerilen tesir kesitlerinin kritik karşılaştırmalarından sonuçlar çıkarılmıştır (Takacs *et al.* 2003, Savaş 2013).

Radyoizotop üretim tesir kesitlerinin teorik hesaplanması ve literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılması amacıyla yapılan çalışmalar her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu amaçla kullanılan farklı simülasyon metotları ile tıpta farklı radyoizotopların üretilmesi konusunda yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Döteryum parçacığının  $^{64}\text{Cu}$  üretimi için kullanıldığı reaksiyonlar,  $E_d= 20,5$  MeV kadar doğal nikel hedefleri üzerine katmanlı-ince folyo tekniği kullanılarak radyoizotopun tesir kesitleri incelenmiştir. Nükleer tıpta tanı ve tedavi amaçlı  $^{61}\text{Cu}$  ve  $^{64}\text{Cu}$  üretimi için kullanılan reaksiyonlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Uyarma fonksiyonları,  $^{64}\text{Ni}(d, 2n)$   $^{64}\text{Cu}$  ve  $^{nat}\text{Ni}(d,x)^{61}\text{Cu}$  reaksiyonları için ALICE-IPPE, EMPIRE II ve GNASH



model kodları kullanılarak elde edilen tesir kesiti değerleri literatürde var olan deneysel tesir kesiti değerleri karşılaştırılmıştır (Hermanne *et al.* 2007).

Babes Bolyai Üniversitesi Biyomedikal Fizik Bölümünde  $^{64}\text{Cu}$  üretiminin amacı, nükleer tıpta PET görüntüleme ve radyoimmünoterapi uygulamaları için radyoizotop kullanmaktır. Görüntüleme ve tedavi amaçlı kullanılan radyoizotopların üretim tesir kesitleri denge ve denge öncesi modellerde hesaplamalar yapılmıştır.  $E_d=20,5$  MeV'e kadar zenginleştirilmiş  $^{64}\text{Ni}$  hedefine Döteryum bombardımanı uygulanarak  $^{64}\text{Ni}(d,p)^{65}\text{Ni}$  ve  $^{64}\text{Ni}(d,2n)^{64}\text{Cu}$  reaksiyonları için tesir kesiti ölçümleri yapılmıştır. Hedef verimleri elde edilen değerler, EMPIRE, ALICE, ve GNASH program kodları kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Daraban *et al.* 2009)

$F_p / F_n$  miktarı, istatistiki bölgede nükleer reaksiyonlardan proton ve nötron emisyonu için olasılıklar oranı, 48'den 71'e olan kütleli çekirdeklerin 21,5-MeV'lik protonların bombardımanı tarafından uyarılan (p,n) ve (p,2n) tesir kesitlerinin ölçümleri ile belirlenir. Elde edilen sonuçlar düşük enerjili proton ve 14 MeV'lik nötronlar tarafından uyarılan reaksiyonlar  $F_p/F_n$  miktarı ile karşılaştırılmıştır. Mutlak  $F_p / F_n$  değerlerini enerji bombardımanı ile varyasyon olağan nükleer reaksiyon teorileri ile açıklamak çok zordur (Cohen *et al.* 1955).

Mannhart vd. (2005) tarafından 10 ile 13 MeV nötron enerji aralığında  $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Zn}(n,2n)^{63}\text{Zn}$ ,  $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$  reaksiyonları için tesir kesiti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan döteryum bileşeninin TOF (Seviye Ölçüm Cihazı) ölçümleri ile bir arada döteryum nötron kaynağının kullanılması bu aralık da hassas tesir kesit verilerinin belirlenmesini sağlamıştır. Tüm reaksiyon ürünleri, güçlü pozitron yayıcılar olmak üzere radyoaktivite sayma işlemi ile imha radyasyon mükemmel bir kayıt için optimize edilmiştir (Mannhart *et al.* 2005).

Cogneau vd. (1967) tarafından  $^{58}\text{Ni}(d,n)^{59}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Ni}(d,n)^{62}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Ni}(d,2n)^{62}\text{Cu}$ ,  $^{60}\text{Ni}(d,n)^{61}\text{Cu}$  ve  $^{58}\text{Ni}(d,t)^{57}\text{Ni}$  reaksiyonlarının yoğunlaştırılmış katmanlı-ince folyo ışınlama tekniği ile tesir kesiti ölçümleri gerçekleştirilmiş ve uyarma fonksiyonları

belirlenmiştir. Deneysel uyarma fonksiyonları optik modele dayalı F. Perey teorik hesaplamalarıyla karşılaştırılmıştır (Cogneau *et al.* 1967).

Günümüzde  $^{64}\text{Cu}$  radyoizotopu nükleer tıpta kullanımı artan bir ilgi ile devam ediyor. Bu radyoizotopun nükleer tıpta hem teşhis hem de tedavi amaçları için kullanımı uygundur. Bu özelliği nedeniyle, Rebeles vd. (2009) ince folyo tekniği kullanarak zenginleştirilmiş  $^{64}\text{Ni}$  hedefini 24 MeV enerjili protonlar ile bombardıman etmek suretiyle  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$  reaksiyonu üzerine reaksiyon aktivasyon kesitleri çalışılmışlardır. Reaksiyon sonuçlarına göre tesir kesitlerinin kesikli ölçüm değerlerine dayanılarak hesaplanır ve optimum üretim parametrelerinin daha iyi tahminine olanak tanır. Tesir kesitlerindeki ölçüm değerlerine göre hedefteki verim hesaplanmış ve deneysel tesir kesiti değerleri literatürde mevcut verilerle karşılaştırılmıştır (Rebeles *et al.* 2009).

Tingwell vd. (1988) 1,05-3,98 MeV enerji aralığında  $^{61}\text{Ni}(p,\gamma)^{62}\text{Cu}$  ve  $^{61}\text{Ni}(p,\gamma)^{61}\text{Ni}$  reaksiyonları ve 3,08- 4,66 MeV enerji aralığında da  $^{61}\text{Ni}(p, n)^{61}\text{Cu}$  reaksiyonu için uyarma fonksiyonları ölçümü yapmıştır.  $^{61}\text{Ni}(p,\gamma)^{62}\text{Cu}$  ve  $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$  reaksiyonları için elde edilen tesir kesiti verileri ile istatistiksel model hesaplamaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları gözlenmiştir (Tingwell *et al.* 1988).

$^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$  nükleer reaksiyonları için eşik enerjisinden 40 MeV'e kadar uyarma fonksiyonları katmanlı-ince folyo tekniği kullanılarak Szelecsényi vd. (2009) tarafından ölçülmüştür. Güvenilir tesir kesit elde etmek amacıyla dokuz adet metal folyo ışınlanarak oldukça zengin  $^{68}\text{Zn}(>98\%)$  elde edilmiş ve tüm folyolar aktivite ölçümleri yapılmadan önce yüksek verimli radyokimyasal ayırımına tabi tutulmuştur.  $^{67}\text{Cu}$  ve daha uzun ömürlü bakır radyoizotoplarının ( $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ) 100 MeV'e kadar güvenilir literatür sonuçları kullanılarak hesaplanmıştır (Szelecsényi *et al.* 2009).

$^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Ni}(p,n)^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ ,  $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$ ,  $^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$ ,  $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$  reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonlarında yeni hesaplamalar 5-30 MeV proton enerji aralığında yapılmıştır. Hesaplamalar; Cascade Exciton Model,

Preequilibrium Nükleer Reaksiyon Modeli ve Exciton Modellerinde yapılmış ve literatürden alınan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Tel *et al.* 2007).

$^{203}\text{Pb}$  radyoizotopu son 10 yılda nükleer tıpta kendine önemli bir yer buldu. Daha önce gerçekleştirilen uyarma fonksiyonları, bu izotopun farklı tepkilerden kaynaklı değişkenlikler göstermiştir. Bilgisayar modelleri TALYS 1.4 (a Nuclear Reaction Program) ve EMPIRE 3.1 ile uyarma fonksiyonları döteryum, helyum, trityum ile Tl ve Hg hedeflerine gönderilmiştir. Farklı modellerden alınan değerlerle deneysel veriler karşılaştırılmıştır (Azzam *et al.* 2014).

$^{122-125}\text{I}$  tıbbi radyoizotopların proton, alfa ve döteryum ile indüklenen reaksiyonlarla üretilmesi için uyarma fonksiyonları, iki farklı seviye yoğunluk modeli geliştirilmiş süper akışkan model ve Fermi-gaz modeli ile TALYS 1.6 kodu kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, geliştirilmiş süper akışkan modelin deney sonuçlarını açıklarken Fermi-gaz modelinden daha başarılı olduğunu göstermiştir (Artun ve Aytekin 2015).

(p,n) ve (d,2n) reaksiyonlarının sistematik olarak karşılaştırılmasının bir parçası olarak,  $^{167}\text{Er}(d,2n)^{167}\text{Tm}$  üretim reaksiyonunun uyarma fonksiyonları ve Tm radyo-saf reaksiyon hareketsizliği 20 MeV' a kadar ince folyo ışınlama tekniği ve g-ışını spektroskopisi kullanılarak araştırılmıştır. Ölçülen uyarılma fonksiyonları, ALICE-D, EMPIRE-D ve TALYS reaksiyon modeli sonuçları ile ve doğal Er hakkındaki daha önceki araştırmalardan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Kalın hedef verimleri ve kontaminasyon seviyeleri tartışılmıştır.  $^{167}\text{Tm}$  için diğer yüklü parçacık üretim yollarıyla bir karşılaştırma, döterondan kaynaklanan reaksiyonların rekabetçi olmadığını gösterir (Hermanne *et al.* 2011).

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Benzetim Programlarının Fizik İçin Önemi

Nükleer fizik alanında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri deneylerin maliyetli olmasıdır. Bu durumda yapılacak olan deneyin verimlerinin yüksek olması gerekmektedir. Maliyeti dışında da malzeme veya hızlandırıcıların hazırlanmasında tüm hesaplamaların ve güvenlik tedbirlerinin alınması gerekir. Nükleer tıp içinde bu hesaplamalar ve tedbirler çok önemlidir. Yapılan hesaplamaların deneysel verilerle karşılaştırılması teorik çalışmaların geliştirilmesi yönünden büyük katkı sağlar.

Benzetim programı;

1. Kurulacak deney sistemlerine karar verebilmek için,
2. Deneysel sonuçlarla teorik verilerin karşılaştırılması ve sonuçların analiz edilebilmek için,
3. Simülasyon verileri ve deneysel verileri karşılaştırıp teoriyi test edebilmek için kullanılmaktadır.

#### 3.2 TALYS 1.6

Nükleer reaksiyonların sonuçlarının analizini ve olasılığını daha rahat yorumlamak için geliştirilmiş bir bilgisayar kod programıdır. LINUX işletim sistemine sahip ve FORTRAN programlama diliyle yazılmış bir kod programıdır.

Simülasyon reaksiyonlarda, proton, nötron, döteryum, trityum, alfa parçacıkları ve gama ışınları 1 keV – 1 GeV enerji bölgesinde çalışabilir. Nükleer reaksiyonlar ve birleşik çekirdek modeli, optik model gibi nükleer modeller bu programlama dilinde yapılabilmektedir. Üretilen parametreler ile TALYS 1.6 ile izotop üretimi 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

verileri elde edilir.

### 3.3 Ana Anahtar Kelime

**projectile:** Gelen parçacığı gönderilen parçacığı gösteren parametre ifadesidir. Proton, alfa, döteryum gibi parçacıklardır.

**element:** hedef çekirdeği ifade eder. Elementin simgesi ile inputa yazılır.

**mass:** hedefte bulunan çekirdeğin atom numarasını temsil eder.

**energy:** gelen parçacığın MeV cinsinden enerjisini belirten değişkendir.

### 3.4 Talys Çıktı Dosyası

TALYS kod programının çıktı dosyası çok geniş kapsamlıdır. TALYS çıktı dosyaları ile parçacıkların oluşum tesir kesitleri, elastik saçılma açısal dağılımları, çoklu kanalların tesir kesitleri, reaksiyon türlerine ait tesir kesitleri, ürün çekirdeklerin oluşum tesir kesitleri gibi birçok hesaplama farklı dosya isimleri ve uzantıları ile ulaşılabilir.

### 3.5 Nükleer Tıpta Bakır Radyoizotopu

$^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{67}\text{Cu}$  : Metalik radyoizotoplarla etiketlenen radyofarmasötiklerin kullanımına olan ilgi son yıllarda artmaktadır. Bakır radyoizotopların özellikle pozitron yayınlama özellikleri nedeniyle hem tanısal görüntüleme hem de radyasyon tedavisinde kullanılmasına ilişkin geniş çapta araştırmalar yapılmaktadır. Bu izotoplardan  $^{62}\text{Cu}$ ( $t_{1/2}=9,7$  dak) PET’de hipoksi görüntülenmesinde kullanılır.  $^{64}\text{Cu}$  ( $t_{1/2}=12,7$  saat) teşhis ve tedavi uygulamalarına sahipken,  $^{60}\text{Cu}$  ( $t_{1/2}=23,7$  dak),  $^{61}\text{Cu}$ ( $t_{1/2}=3,33$  saat) ve  $^{67}\text{Cu}$ ( $t_{1/2}=61,9$  saat) teşhis

radyoizotopu olarak beyin ve kalbin yanı sıra tümörün yapısındaki dokunun ve kan akışının görüntülenmesinde kullanılır.  $^{64}\text{Cu}$  radyoizotopu hem  $\beta^-$  hem de  $\beta^+$  yayınlaması özelliğiyle tümörlerin hedeflediği radyoterapide ve PET görüntülemeye radyofarmasötiklerin büyük bir kısmının etiketlenmesi için uygundur. Tanı ve tedavi amaçlı kullanılan radyoizotoplar görüntüleme ve tedavi özelliği yönünden kullanım yeri ve amacı değişim göstermektedir. Nükleer tıpta kullanılan bakır radyoizotopları ve kullanım alanları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Nükleer tıpta kullanılan bakır radyoizotopunun üretim şekli, reaksiyonu ve kullanım alanları

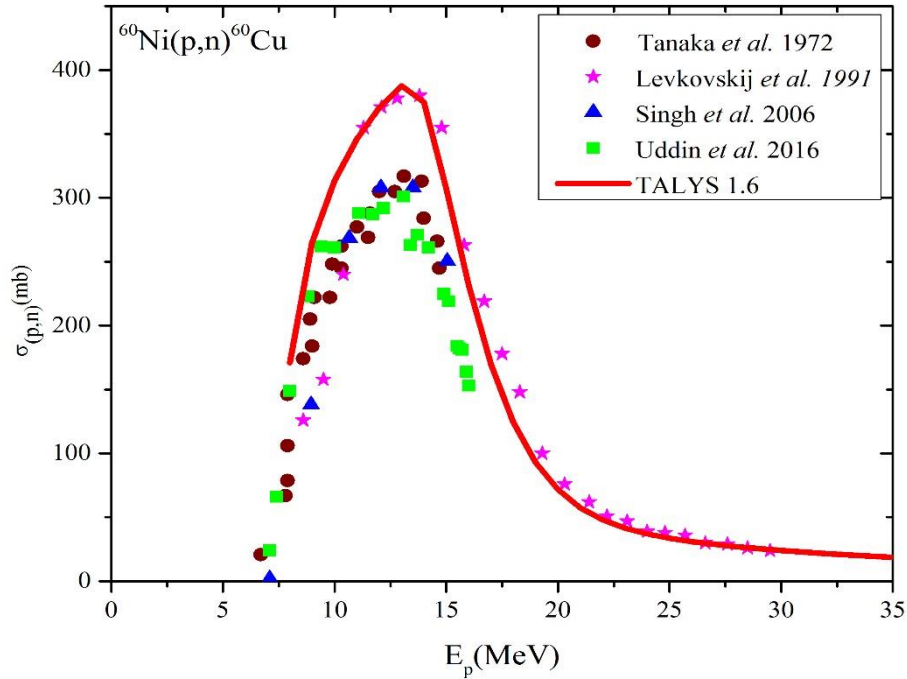
Radyoizotop	Üretim şekli/Yarı ömrü	Reaksiyonu	Kullanım alanı
<b>Bakır (<math>^{60}\text{Cu}</math>)</b>	Siklotron/23,7 dk	$^{60}\text{Ni}(p,n)^{60}\text{Cu}$	Tümörün yapısında bulunan dokular ile beyin ve kalbin görüntülenmesinde
<b>Bakır (<math>^{61}\text{Cu}</math>)</b>	Siklotron/3,33 saat	$^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ $^{62}\text{Ni}(p,2n)^{61}\text{Cu}$ $^{61}\text{Ni}(d,2n)^{61}\text{Cu}$	Wilson hastalığı olan hastalarda bakır dağılımının incelenmesi için PET’ten izleyici olarak kullanılır.
<b>Bakır (<math>^{62}\text{Cu}</math>)</b>	Siklotron/9,74 dk	$^{62}\text{Ni}(p,n)^{62}\text{Cu}$ $^{62}\text{Ni}(d,2n)^{62}\text{Cu}$	PET’te hipoksi görüntülenmesinde kullanılır.
<b>Bakır (<math>^{64}\text{Cu}</math>)</b>	Siklotron, Reaktör/12,70 saat	$^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ $^{64}\text{Ni}(d,2n)^{64}\text{Cu}$	PET’te colon, kolorektal, lenfoma, melanom, pankreas, prostat kanserlerinin görüntülenmesinde kullanılır.
<b>Bakır (<math>^{67}\text{Cu}</math>)</b>	Siklotron, Reaktör/2,58 gün	$^{68}\text{Zn}(p, \alpha)^{67}\text{Cu}$ $^{64}\text{Ni}(\alpha, p)^{67}\text{Cu}$ $^{68}\text{Zn}(p, 2p)^{67}\text{Cu}$ $^{68}\text{Zn}(\alpha, p)^{67}\text{Cu}$	Radyoterapide kullanılır. (Çapı 4 mm’ye kadar olan kitlelerde uygulanır)

## 4. BULGULAR

Kullanılabilirlik ve üretim maliyeti nedeniyle, radyofarmasötiklerindeki araştırma çabaları, esas olarak, tasarlanan üretkenliğin olasılığını gösteren reaksiyon kesitlerinin hesaplanmasına odaklanmıştır. Bu çalışmada, nükleer tıpta kullanılan  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  ve  $^{67}\text{Cu}$  radyoizotoplarının üretimini destekleyebilecek nükleer reaksiyon tesir kesitleri 0-50 MeV enerji aralığında TALYS 1.6 kullanılarak hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

### 4.1 $\text{Cu}^{60}$ Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti

$^{60}\text{Ni}(p,n)^{60}\text{Cu}$  reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Singh vd (2006), Uddin vd. (2016), Levkovskij vd. (1991) ve Tanaka vd. (1972) tarafından rapor edilen deneysel veriler Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



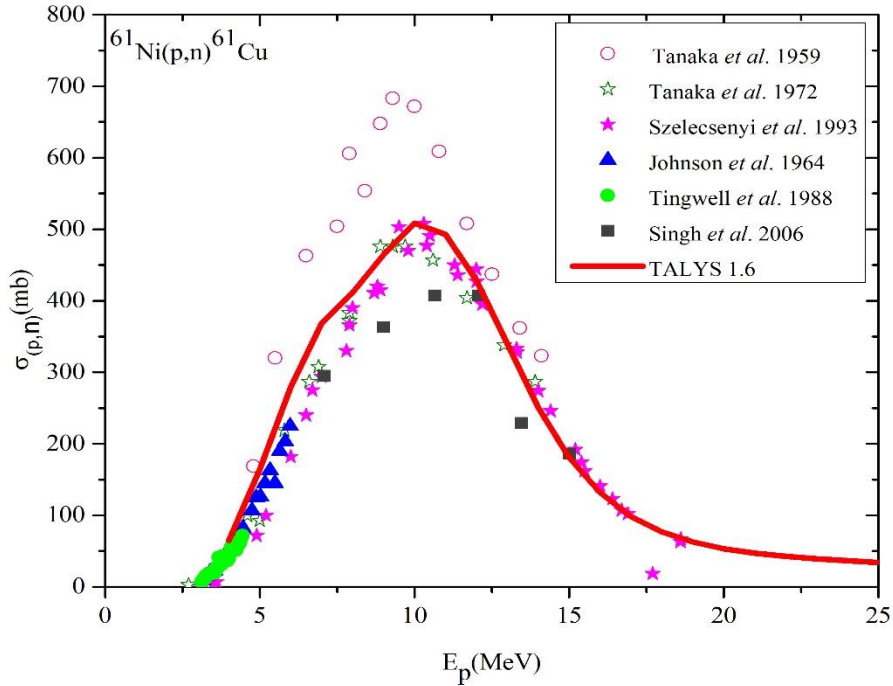
Şekil 4.1 Proton ile uyarılmış  $^{60}\text{Ni}$  hedef çekirdeğinden  $^{60}\text{Cu}$  elde edilmesi.

Şekil 4.1 de görüldüğü gibi,  $^{60}\text{Ni}(p,n)^{60}\text{Cu}$  reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin, Levkovskij vd. (1991) tarafından rapor edilen

deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum içindedir. Tanaka vd. (1972), Singh vd (2006) ve Uddin vd. (2016) tarafından rapor edilen deneysel veriler benzer şekli göstermekle birlikte tesir kesiti büyüklüğü yaklaşık %25 daha düşüktür. Bu reaksiyonda, en büyük tesir kesitine sahip olduğu enerji değeri yaklaşık 14,5 MeV olduğu görülmektedir.

#### 4.2 Cu<sup>61</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti

<sup>61</sup>Ni(p,n)<sup>61</sup>Cu reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Szelecsenyi vd. (1993), Tanaka vd. (1972), Tanaka vd. (1959), Johnson vd. (1964), Tingwell vd. (1988) ve Singh vd. (2006) tarafından rapor edilen deneysel veriler karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2’de verilmiştir.



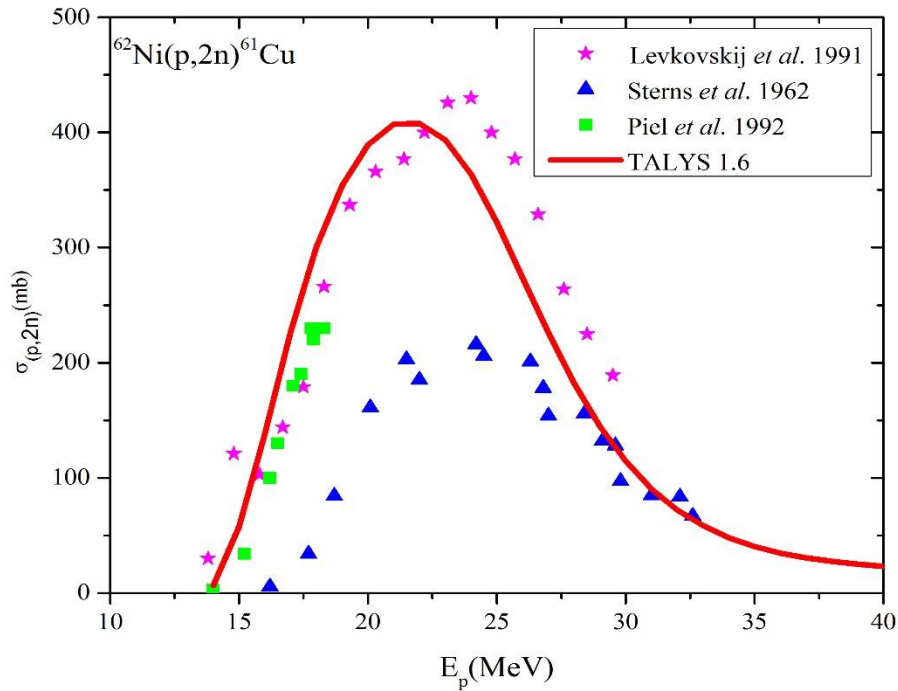
Şekil 4.2 Proton ile uyarılmış <sup>61</sup>Ni hedef çekirdeğinden <sup>61</sup>Cu elde edilmesi.

Şekil 4.2 de görüldüğü gibi, TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerleri, Tanaka vd. (1972), Singh vd. (2006) ve Szelecsenyi vd. (1993) tarafından rapor edilen deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir. Tanaka vd. (1959) tarafından rapor edilen deneysel veriler benzer şekli göstermekle birlikte tesir kesiti büyüklüğü yaklaşık %40 daha büyüktür. Johnson vd. (1964) ve Tingwell vd. (1988) tarafından rapor edilen deneysel veriler benzer şekli göstermekle birlikte denge sonrası veri bulunmadığı için



bir şey söylemek mümkün olamamaktadır. Hem teorik hesaplama, hem de deneysel çalışmalardan elde edilen maksimum reaksiyon tesir kesiti değerin yaklaşık 10 MeV proton gelme enerjisinde mümkün olduğu görülmektedir.

$^{62}\text{Ni}(p,2n)^{61}\text{Cu}$  reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Sterns vd. (1962), Piel vd. (1992) ve Levkovskij vd. (1991) tarafından rapor edilen deneysel değerler Şekil 4.3'te verilmiştir.

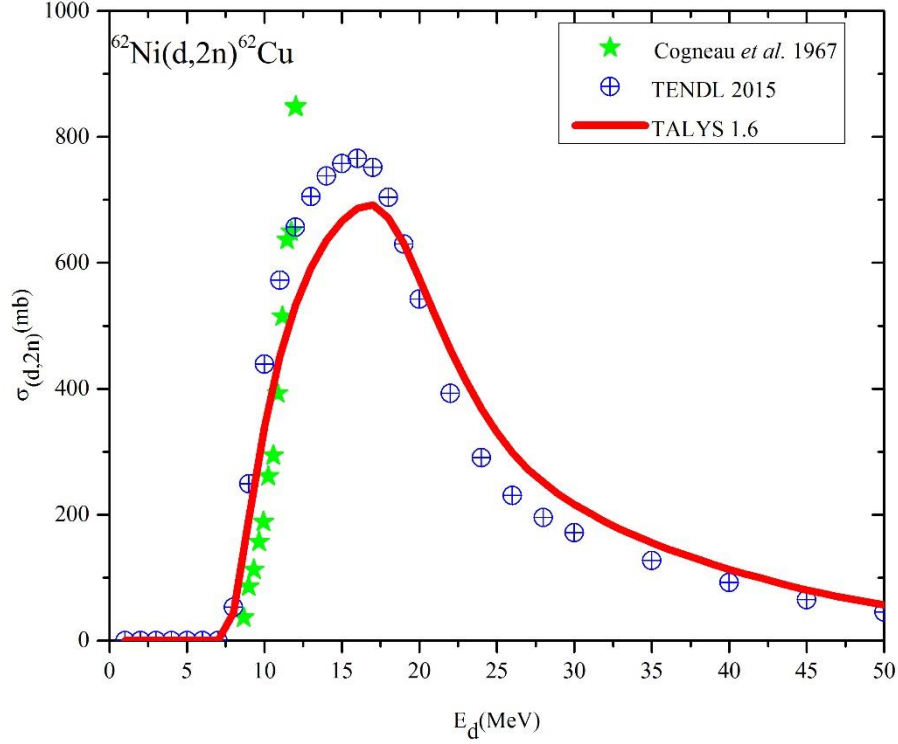


Şekil 4.3 Proton ile uyarılmış  $^{62}\text{Ni}$  hedef çekirdeğinden  $^{61}\text{Cu}$  elde edilmesi.

Şekil 4.3 de görüldüğü gibi, TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin, deneysel olarak Levkovskij vd (1991) tarafından rapor edilen tesir kesiti sonuçlarıyla uyum içinde olduğu, Sterns vd. (1962) tarafından elde edilen veriler benzer şekli göstermekler birlikte tesir kesiti büyüklüğü yaklaşık olarak %50 fark görülmektedir. Piel vd. (1992) tarafından rapor edilen veriler denge öncesi benzer şekli göstermekle birlikte veri bulunmadığından denge sonrası hakkında bir şey söylemek mümkün olamamaktadır. Bu reaksiyon için en büyük tesir kesitine sahip olduğu enerji değerinin teorik hesaplamalarda 21,5 MeV iken, deneysel verilerde 24 MeV olduğu tespit edilmiştir.

### 4.3 Cu<sup>62</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti

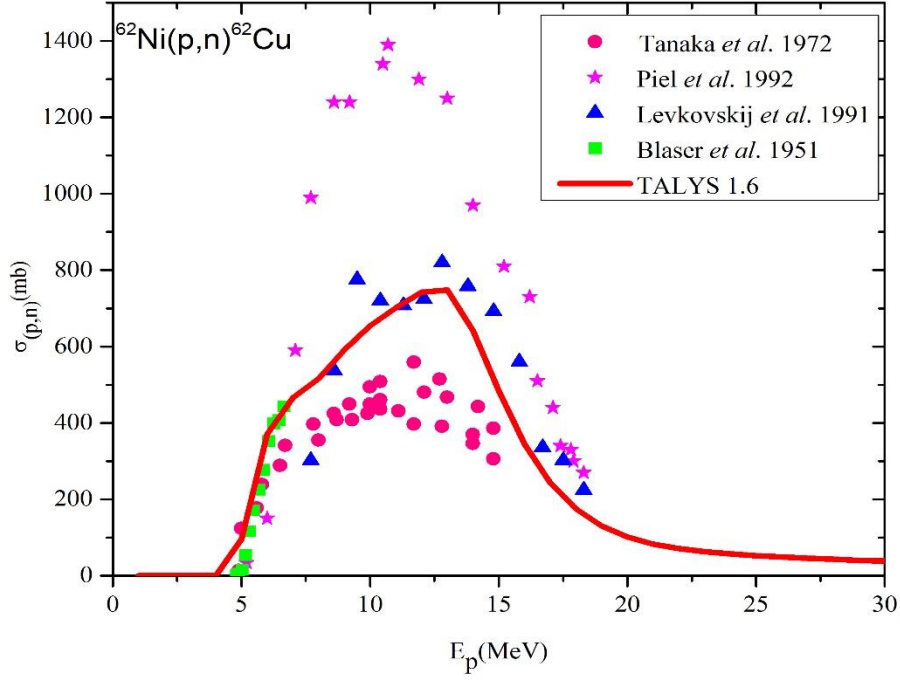
<sup>62</sup>Ni(d,2n)<sup>62</sup>Cu reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Cogneau vd. (1967) tarafından rapor edilen deneysel değerler ve Tendl (2015) raporundan alınan veriler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Döteryum ile uyarılmış <sup>62</sup>Ni hedef çekirdeğinden <sup>62</sup>Cu elde edilmesi.

Şekil 4.4 de görüldüğü gibi, TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin, TENDL (2015) tarafından rapor edilen verilerle daha uyum içinde olduğu söylenebilir. Cogneau vd. (1967) tarafından rapor edilen deneysel veriler denge öncesi benzer şekli göstermekle birlikte veri bulunmadığından denge sonrası hakkında bir şey söylemek mümkün olamamaktadır. Bu reaksiyonda, en büyük tesir kesitine sahip olduğu enerji değerinin deneysel veriler için 17 MeV, TALYS 1.6 verileri için 17.5 MeV olduğu görülmektedir.

$^{62}\text{Ni}(p,n)^{62}\text{Cu}$  reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Piel vd. (1992), Tanaka vd. (1972), Levkovskij vd. (1991), Blaser vd. (1951) tarafından rapor edilen deneysel veriler Şekil 4.5'te verilmiştir.

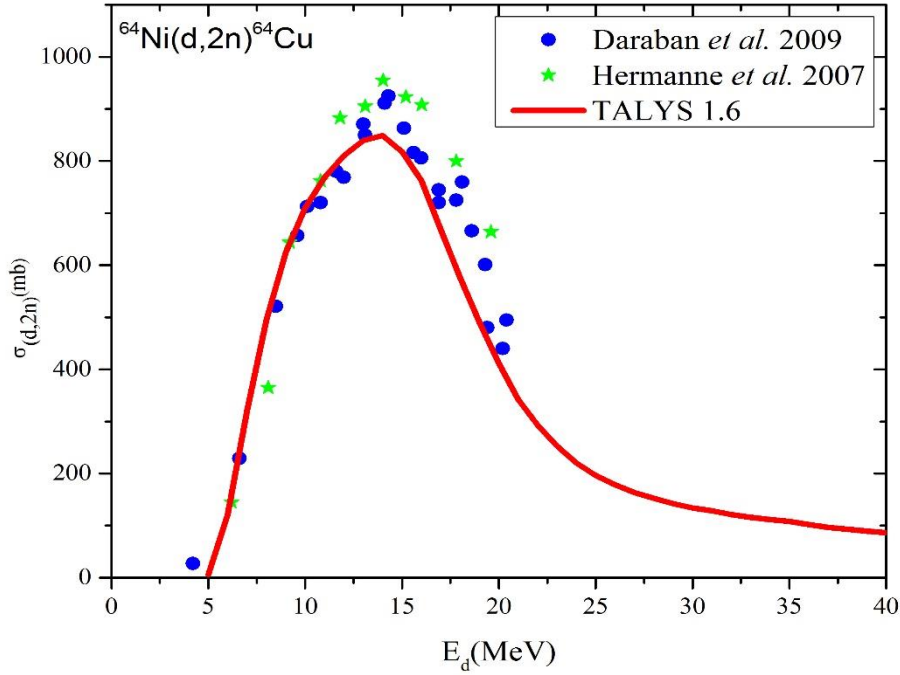


**Şekil 4.5** Proton ile uyarılmış  $^{62}\text{Ni}$  hedef çekirdeğinden  $^{62}\text{Cu}$  elde edilmesi.

Şekil 4.5 de görüldüğü gibi, TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin, Tanaka vd. (1972), Levkovskij vd. (1991) tarafından rapor edilen deneysel verilerle daha uyum içinde olduğu söylenebilir. Piel vd. (1992) tarafından rapor edilen deneysel veriler benzer şekli göstermekle birlikte tesir kesiti büyüklüğü teorik hesaplamaların yaklaşık iki katı ve Tanaka vd. (1972) tarafından rapor edilen değerlerin yaklaşık üç katı kadardır. Blaser vd. (1951) tarafından rapor edilen deneysel veriler denge öncesi benzer şekli göstermekle birlikte veri bulunmadığından denge sonrası hakkında bir şey söylemek mümkün olamamaktadır. Bu reaksiyonda, en büyük tesir kesitine sahip olduğu enerji değerinin Piel vd. (1992) için 11 MeV, Tanaka vd. (1972) için 12 MeV, Levkovski vd. (1991) için 13 MeV ve TALYS 1.6 verileri için 13 MeV olduğu görülmektedir.

#### 4.4 Cu<sup>64</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti

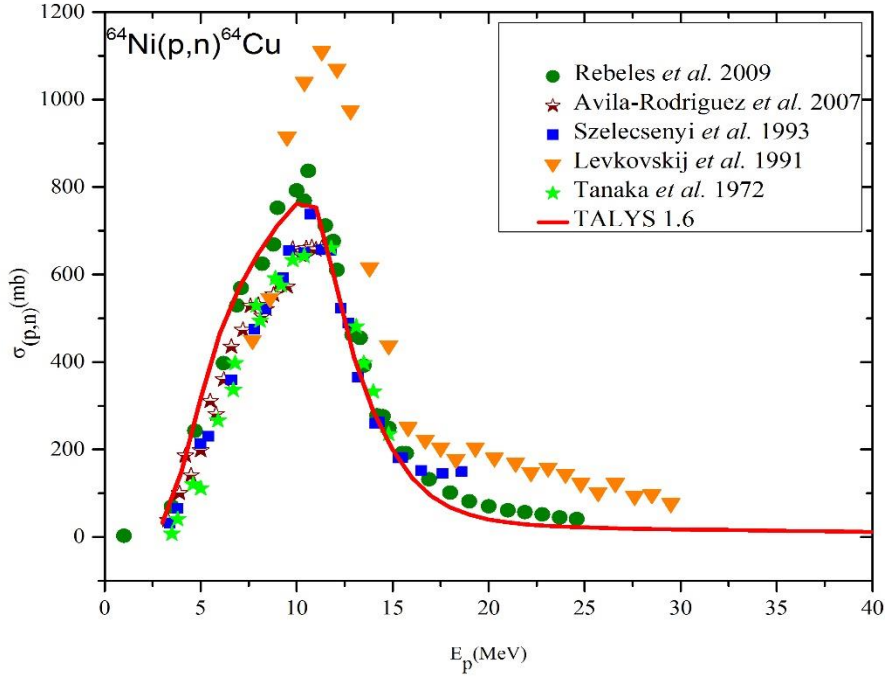
<sup>64</sup>Ni(d,2n)<sup>64</sup>Cu reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Hermanne vd. (2007) ve Daraban vd. (2009) tarafından rapor edilen deneysel veriler Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Döteryum ile uyarılmış <sup>64</sup>Ni hedef çekirdeğinden <sup>64</sup>Cu elde edilmesi.

Şekil 4.6 de görüldüğü gibi, TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin, Hermanne vd. (2007) ve Daraban vd. (2009) tarafından rapor edilen deneysel verilerle denge sonrasında küçük farklılıklar olmakla birlikte çok uyumlu olduğu görülmektedir. Bu reaksiyonda, en büyük tesir kesitinin karşılık geldiği enerji değerinin deneysel veriler ve TALYS 1.6 hesaplamaları için yaklaşık olarak eşit ve 14 MeV civarındadır.

<sup>64</sup>Ni(p,n)<sup>64</sup>Cu reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Rebeles vd. (2009), Avila-Rodriguez vd. (1993), Szelecsenyi vd. (1993), Levkovskij vd. (1991), Tanaka vd. (1972) tarafından rapor edilen deneysel veriler Şekil 4.7’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

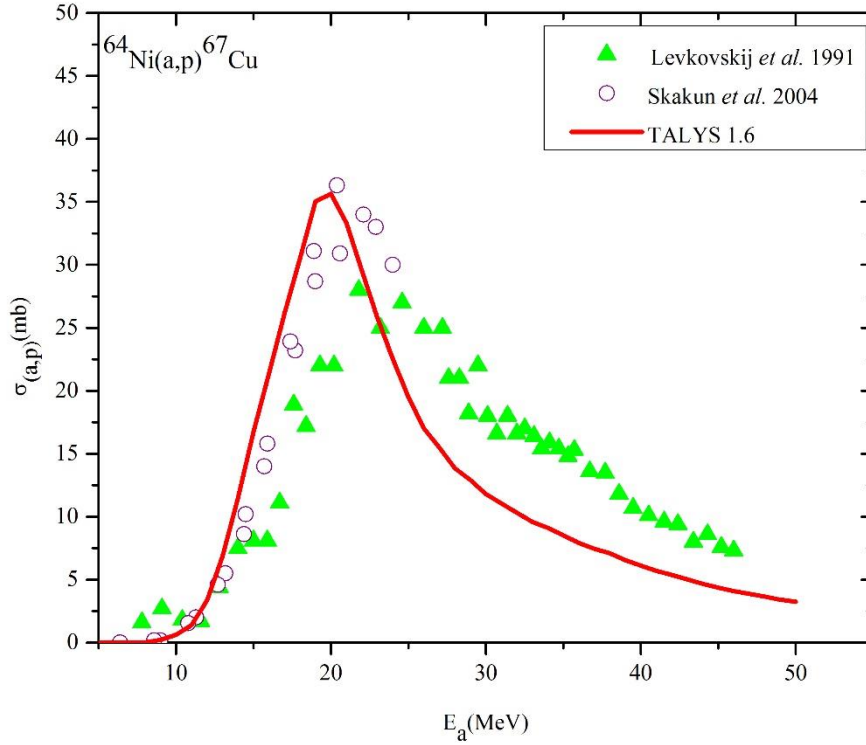


Şekil 4.7 Proton ile uyarılmış  $^{64}\text{Ni}$  hedef çekirdeğinden  $^{64}\text{Cu}$  elde edilmesi.

Şekil 4.7 de görüldüğü gibi, TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerleri ve deneysel arasında oldukça iyi bir uyum gözlenmektedir. En belirgin farklılık, Levkovskij vd. (1991) tarafından rapor edilen deneysel tesir kesiti değerlerinin diğer deneysel değerler ve teorik hesaplama sonuçlarından yaklaşık %40-%50 arasında değişen oranlarda daha büyük olmasıdır. Ayrıca, teorik hesaplama sonuçları ile deneysel sonuçları birebir değerlendirilecek olursa; Rebeles vd. (2009) tarafından rapor edilen deneysel verilerin en uyumlu sonuçlar olduğu, Tanaka vd. (1972) tarafından rapor edilen deneysel değerlerin yaklaşık %15 daha küçük olduğu, Szelecsenyi vd. (1993) tarafından rapor edilen deneysel değerlerin yaklaşık %10 daha küçük olduğu görülmektedir. Öte yandan, Avila-Rodriguez vd. (2007) tarafından denge öncesi durumu için rapor edilen deneysel veriler ile teorik olarak hesaplanan tesir kesiti değerleri uyumludur. Bu reaksiyonda, en büyük tesir kesitine sahip olduğu enerji değerinin deneysel ve teorik veriler için 11-12 MeV aralığında olduğu görülmektedir. Ayrıca 2-30 MeV enerji aralığında ise mevcut deneysel ve teorik verilerden kaynaklanan sapmalar olduğu anlaşılmaktadır.

#### 4.5 Cu<sup>67</sup> Radyoizotopu Üretim Tesir Kesiti

<sup>64</sup>Ni(a,p)<sup>67</sup>Cu reaksiyonu için TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan reaksiyon tesir kesiti değerleri ile Levkovskij vd. (1991) ve Skakun vd. (2004) tarafından rapor edilen deneysel veriler Şekil 4.8’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Alfa ile uyarılmış <sup>64</sup>Ni hedef çekirdeğinden <sup>67</sup>Cu elde edilmesi.

Şekil 4.8 de görüldüğü gibi, TALYS 1.6 kodu ile hesaplanan tesir kesiti değerleri, Levkovskij vd. (1991) tarafından rapor edilen deneysel veriler %25 daha küçük ve Skakun vd. (2004) tarafından rapor edilen deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir. . Bu reaksiyonda, en büyük tesir kesitine sahip olduğu enerji değerinin TALYS 1.6 ve Skakun vd. (2004) tarafından rapor edilen veriler için yaklaşık 37 MeV olduğu görülmektedir. Levkovskij vd. (1991) tarafından rapor edilen veriler için 27.5 MeV olduğu görülmektedir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Deneysel nükleer fizikte meydana gelen gelişmeler ve yapay radyoaktifliğin bulunması, nükleer tıpta görüntüleme ve tedavi amaçlı kullanılan radyoizotoplar yapay olarak üretilebilmesini sağlamıştır. Yapay izotop üretimi, hızlandırılmış olan yüklü parçacıkların, siklotrona monte edilmiş bir reaksiyon ünitesindeki hedef üzerine düşürülmesiyle gerçekleştirilmektedir.

Kullanılabilirlik ve üretim maliyeti nedeniyle, radyofarmasötiklerindeki araştırma çabaları, esas olarak, tasarlanan üretkenliğin olasılığını gösteren reaksiyon kesitlerinin hesaplanmasına odaklanmıştır. Bu çalışmada, nükleer tıpta kullanılan  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  ve  $^{67}\text{Cu}$  radyoizotoplarının üretimini destekleyebilecek nükleer reaksiyon tesir kesitleri 0-50 MeV enerji aralığında TALYS 1.6 kullanılarak hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Tesir kesiti hesaplamaları, proton, döteryum, alfa parçacık girişli reaksiyonlar için nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak yapılmıştır. Bu hesaplamalar, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu'nun EXFOR Kütüphanesi'nden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Bileşik çekirdek modelinin, gelen parçacığın çekirdek ile etkileşme olasılığının en büyük olduğu düşük geliş enerjileri (10-20 MeV) için oldukça başarılı olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, proton ile uyarılma reaksiyonları için gelen parçacık enerji aralığı 10-13 MeV, döteryum ile uyarılma reaksiyonları için gelen parçacık enerji aralığı 15-18 MeV olarak elde edilmiş olup, bakır radyoizotoplarının üretim reaksiyonları için bileşik çekirdek modeliyle uyumlu ve benzer özellik göstermiştir. Bakır radyoizotopların yaptığımız çalışmalarda en büyük enerji aralığına sahip olduğu tesir kesitleri için bileşik çekirdek modeli ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Bileşik çekirdek modelinin bakır radyoizotopları üretim reaksiyonları için ortaya koyduğu yaklaşım ile  $^{62}\text{Ni}(p,2n)^{61}\text{Cu}$  reaksiyonu için gelen parçacık enerjisinin 22,5 MeV olarak elde edildiği sonuç arasında farklılık görülmektedir. Bunun nedeni ise aynı anda iki nötronun koparılacak olmasıdır. Bu sonuca göre, belirtilen üretim yolu öncelikli tercih edilmesi gereken bir seçenek değildir.

Bu çalışma ve benzeri tesir kesiti hesaplamaları, başta nükleer fizik alanında olmak üzere, birçok alanda kullanışlıdır. Hatta yüksek enerjilerde deneysel çalışmaları zor olan veya yapılamayan deneysel çalışmalar için bir yol gösterici niteliği taşıması açısından önemlidir.



## 6. KAYNAKLAR

- Artun, O. ve AYTEKİN, H. (2015). Calculation of excitation functions of proton, alpha and deuteron induced reactions for production of medical radioisotopes  $^{122-125}\text{I}$ . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **345**: 1-8.
- Akça, S., Tel, E., Kara, A. ve Aydın, A. (2013). Calculation of excitation functions for the production of Cu and Co medical isotopes. *Kerntechnik*, **78**: 484-488.
- Avila-Rodriguez, M. A., Nye, J. A. and Nickles, R. J. (2007). Simultaneous production of high specific activity  $^{61}\text{Cu}$  and  $^{60}\text{Co}$  with 11.4 MeV protons on enriched  $^{64}\text{Ni}$  nuclei. *Applied Radiation and Isotopes*, **65**:1115-1120.
- Azzam, A., Said, S. A. and Al-abyad, M. (2014). Evaluation of different production routes for the radio medical isotope  $^{203}\text{Pb}$  using TALYS 1.4 and EMPIRE 3.1 code calculations. *Applied Radiation and Isotopes*, **91**: 109-113.
- Blaser, J.P., Boehm, F., Marmier, P., Scherrer, P. (1951). Anregungsfunktionen und wirkungsquerschnitte der (p,n) reaktion (II). *Helvetica Physica Acta*, **24**: 441
- Cogneau, M., Gilly, L. J. and Cara, J. (1967). Absolute cross sections and excitation functions for deuteron-induced reactions on the nickel isotopes between 2 and 12 MeV. *Nuclear Physics*, **99**: 686-694.
- Cohen, B. L. and Newman, E. (1955). (p,pn) and (p,2n) Cross sections in medium weight elements. *Physical Review*, **99**: 718-723.
- Daraban, L., Rebeles, R. A. and Hermanne, A. (2009). Study of the excitation function for the deuteron induced reaction  $^{64}\text{Ni}(d,2n)$  for the production of the medical radioisotope  $^{64}\text{Cu}$ . *Applied Radiation and Isotopes*, **67**: 506-510.
- EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data File) Database Version of April 03.2017, Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center.
- Hermanne, F., Tarkanyi, S., Takacs, S.F., Kovalev, A. and Ignatyuk, A. (2007). Activation cross sections of the  $^{64}\text{Ni}(d,2n)$  reaction for the production of the medical radionuclide  $^{64}\text{Cu}$ . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **258**: 308-312.

- Hermanne, A., Rebeles, R. A., Tarkanyi, F., Takacs, S., Spahn, I. and Ignatyuk, A.V. (2011). High yield production of the medical radioisotope  $^{167}\text{Tm}$  by the  $^{167}\text{Er}(d,2n)$  reaction. *Applied Radiation and Isotopes*, **69**: 475-481.
- Johnson, C. H., Trail, C. C. and Galonsky, A. (1964). Thresholds for (p,n) reactions on 26 intermediate weight nuclei. *Physical Review*, **136**: 1719-1729.
- Krane, K.S (2006), Introductory Nuclear Physics, (Çeviri Editörü: B. Şarer), Nükleer Fizik 1. Cilt, II. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Koning A., Hilaire, S. and Goriely, S. (2013). TALYS 1.6 ‘Nuclear Research and Consultancy Group (NRG) Westerduinweg 3, P.O. Box 25, NL-1755 ZG, Petten, The Netherlands December 23, 2013.
- Levkovskij, V. N., Reutov, V. F. and Botvin, K. V. (1991). Formation of hydrogen in zirconium, niobium, and molybdenum during irradiation with alpha particles in the energy interval from 10 to 46 MeV. *Translated From Atomnaya Energiya*, **69**: 101-102.
- Mannhart, W. and Schmidt, D. (2005). Measurement of neutron reaction cross sections between 8 and 14 MeV. *American Institute of Physics*, **759**: 609-612.
- Mcgee, T., Rao, C. L., Saha, G. B. and Yaffe, L. (1970). Nuclear interactions of  $^{45}\text{Sc}$  and  $^{68}\text{Zn}$  with protons of medium energy. *Nuclear Physics*, **150**: 11-29.
- Piel, H., Qaim, S. M. and Stöcklin, G. (1992). Excitation functions of (p,xn)-reactions on  $^{nat}\text{Ni}$  and highly enriched  $^{62}\text{Ni}$ : Possibility of production of medically important radioisotope  $^{62}\text{Cu}$  at a small cyclotron. *Radiochimica Acta*, **57**: 1-5.
- Rebeles, R. A., Van den Winkel, Hermanne, A. and Tárkányi, F. (2009). New measurement and evaluation of the excitation function of  $^{64}\text{Ni}(p,n)$  reaction for the production of  $^{64}\text{Cu}$ . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **267**: 457-461.
- Savaş, F. (2013). Medikal Fizikte Kullanılan Bazı Radyonüklidlerin Nükleer Reaksiyon Tesir Kesitlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Seyrek, E. (2007). Radyoizotopların Üretimi Ve Radyoterapide Kullanılması, Lisans Bitirme Tezi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Ankara.
- Singh, B. P., Sharma, M. K., Musthafa, M. M., Bhardwaj, H. D. and Prasad, R. (2006). A Study of pre-equilibrium emission in some proton and alpha induced reactions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **562**: 717-720.
- Skakun, Y. and Qaim, S. M. (2004). Excitation function of the  $^{64}\text{Ni}(\alpha,p)^{67}\text{Cu}$  reaction for production of  $^{67}\text{Cu}$ . *Applied Radiation and Isotopes*, **60**: 33-39.
- Szelecsényi, F., Steyn, G. F., Dolley, S. G., Kovács, Z., Vermeulen, C. and Van Der Walt, T. N. (2009). Investigation of the  $^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$  nuclear reaction: New measurements up to 40 MeV and compilation up to 100 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **267**: 1877-1881.
- Szelecsényi, F., Blessing, G. and Qaim, S. M. (1993). Excitation Functions of Proton Induced Nuclear Reactions on Enriched  $^{61}\text{Ni}$  and  $^{64}\text{Ni}$ : Possibility of Production of No-carrier-added  $^{61}\text{Cu}$  and  $^{64}\text{Cu}$  at a Small Cyclotron, *Applied Radiation and Isotopes*, **44**: 575-580.
- Takacs, S., Tarkanyı, F., Hermanne, A. and Pavıottı De Corcuera, R. (2003). Validation and upgrading of the ecommended cross section data of charged particle reactions used for production of PET radioisotopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **211**:169-189.
- Tanaka, S., Furukawa, M. and Chiba, M. (1972). Nuclear reactions of nickel with protons up to 56 MeV. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **34**: 2419-2426.
- Tel, E., Aydın, A. ve Şarer, B. (2007). New calculation of excitation functions of proton-induced reactions in some medical isotopes of Cu, Zn, and Ga. *Applied Radiation and Isotopes*, **65**: 367-370.
- Tingwell, C. I. W., Hansper, V. Y., Tims, S. G., Scott, A. F. and Sargood, D.G. (1988). Cross sections of proton induced reactions on  $^{61}\text{Ni}$ , *Nuclear Physics*, **480**: 162-744.

Uddin, M. S., Sudár, S., Spahn, I., Shariff, M. A. and Qaim, S. M. (2016). Excitation function of the  $^{60}\text{Ni}(p,\gamma)^{61}\text{Cu}$  reaction from threshold to 16 MeV. *Physical Review*, **93**: 1-5.

### **İnternet Kaynakları**

1. <http://www.talys.eu/tendl-2012/>, 15.11.2016

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Niyazi BALÇIN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Araklı / 08.08.1991  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0(531) 3217570 / niyazibalcin@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Araklı Anadolu Lisesi, (2005-2009)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü (2009-2014)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği Uzmanlığı Anabilim Dalı (Tezsiz), (2014-2015)  
Pedagojik Formasyon: Afyon Kocatepe Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, (2014-2015)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: İhsaniye Turizm Otelcilik Meslek Lisesi Ücretli Öğretmenlik (2014-2015)  
Çayırbağ İmam Hatip Ortaokulu Ücretli Öğretmenlik (2015-2016)

### Bilgisayar Bilgisi :

Linux İşletim Sistemi (Orta Seviyede)  
Microsoft Office Programları (İyi Seviyede)  
Tallys1.6 Teorik Fizik Simülasyon Programları (Orta Seviyede)  
Teorik Fizik Grafik Programı (Origin 9.0) (İyi Seviyede)