

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

NÜKLEON GİRİŞLİ BAZI NÜKLEER REAKSİYONLARIN TESİR
KESİTLERİNİN HESAPLANMASI

Osman KARABUDAK

EYLÜL 2012

Fizik Anabilim Dalında Osman KARABUDAK tarafından hazırlanan “Nükleon Girişli Bazı Nükleer Reaksiyonların 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.

Doç. Dr. Abdullah AYDIN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Abdullah KAPLAN
Üye : Doç. Dr. Abdullah AYDIN
Üye : Yrd. 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

NÜKLEON GİRİŞLİ BAZI NÜKLEER REAKSİYONLARIN TESİR KESİTLERİNİN HESAPLANMASI

KARABUDAK, Osman

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Abdullah AYDIN

Eylül 2012, 63 sayfa

Bu tez çalışmasında, bazı medikal radyoizotopların üretim tesir kesitleri nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak hesaplandı. Bu radyoizotopların üretimleri için gerekli en uygun enerji aralıkları belirlendi. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılarak nükleer reaksiyon modellerinin uygunluğu tartışıldı.

Anahtar Kelimeler: Radyoizotop, nükleer reaksiyon modelleri, exciton model, hibrid model, geometri bağımlı hibrid model.

ABSTRACT

THE CALCULATION OF THE CROSS-SECTIONS FOR SOME NUCLEON- INDUCED NUCLEAR REACTIONS

KARABUDAK, Osman

Kırıkkale University

Institute of Sciences

Department of Physics, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah AYDIN

September 2012, 63 pages

In thesis, the production cross sections for some medical radioisotopes are calculated using the nuclear reaction models. The optimum energy ranges for the production of these radioisotopes are determined. The calculated results are compared with the experimental data in the literature, and the applicability of nuclear reaction models is discussed.

Key Words: Radioisotope, nuclear reaction model, exciton model, hybrid model, geometry dependent hybrid model.

TEŞEKKÜR

Bana tez alıŐma konusunu öneren, gerekli bilgisayar programlarımı sağlayan, kendi kütüphanesindeki kaynaklarını kullandıran ve çalıŐmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendirerek maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam, Doç. Dr. Abdullah AYDIN'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Tezimde gerekli olan TALYS 1.2 hesaplamalarında bana yardımcı olan arkadaşım Hakan PEKDOĞAN'a da teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tezimin her aşamasında büyük fedakârlıklar gösterip, zorluklara göğüs gererek bugünlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Süreyya KARABUDAK, babam Celalettin KARABUDAK ve sevgili ablam Seda VURAL' a teşekkür ederim.

Osman KARABUDAK

Kırıkkale, 2012

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1. Nükleer Reaksiyonlar	4
2.2. Nükleer Reaksiyon Türleri	4
2.2.1. Bileşik Çekirdek Reaksiyonları	5
2.2.2. Direkt Reaksiyonlar	7
2.3. Nükleer Reaksiyon Tesir Kesiti	9
2.4. Diferansiyel Tesir Kesiti	9
2.5. Nükleer Reaksiyon Modelleri	11
2.5.1. Griffin (Exciton) Modeli	11
2.5.2. Hibrid Model	13
2.5.3. Geometri Bağımlı Hibrid Model	15
2.6. Tıpta Kullanılan Radyoizotoplar	16
2.7. Radyoizotopların Kullanım Alanları	17
2.7.1. Tek Foton Bilgisayarlı Tomografi (SPECT)	17
2.7.2. Pozitron Emisyon Tomografisi (PET)	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. ALICE/ASH Bilgisayar Programı	23
3.2. TALYS 1.2 Bilgisayar Programı	24

4. ARAŞTIRMA BULGULARI	25
4.1. $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ Reaksiyonu	25
4.2. $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ Reaksiyonu	28
4.3. $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ Reaksiyonu	31
4.4. $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu	34
4.5. $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ Reaksiyonu	37
4.6. $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ Reaksiyonu	40
4.7. $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ Reaksiyonu	42
4.8. $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$ Reaksiyonu	44
4.9. $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ Reaksiyonu	47
4.10. $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ Reaksiyonu	50
4.11. $^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$ Reaksiyonu	52
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	55
KAYNAKLAR	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. $^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdeği için farklı çıkış kanalları	5
2.2. Zn bileşik çekirdeğinin oluşmasıyla sonuçlanan farklı reaksiyonlar için tesir kesitleri	6
2.3. Çekirdeğin yüzeyinde meydana gelen doğrudan reaksiyonların geometrisi	7
2.4. Bileşik çekirdek oluşumu aşaması ve doğrudan reaksiyon türleri	8
2.5. $d\Omega$ katı açısı içinde saçılan demeti gösteren reaksiyon geometrisi	10
2.6. Griffin modelinde, bir reaksiyonun ilk evrelerinin şematik temsili	13
2.7. Hibrid modeldeki reaksiyonun ilk birkaç durumunun şematik temsili	14
2.8 Tek Foton Yayınlanmalı Bilgisayarlı Tomografi (SPECT) cihazının genel görünümü	18
2.9 Pozitron Yayınlanmalı Tomografi (PET) cihazının genel görünümü	19
4.1. ^{119}Sn radyoizotopunun bozunum şeması	26
4.2. $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ reaksiyonu tesir kesiti	27
4.3. ^{169}Tm radyoizotopunun bozunum şeması	29
4.4. $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ reaksiyonu tesir kesiti	30
4.5. ^{61}Cu radyoizotopunun bozunum şeması	32
4.6. $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ reaksiyonu tesir kesiti	33
4.7. ^{124}I radyoizotopunun bozunum şeması	35
4.8. $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu tesir kesiti	36
4.9. ^{111}In radyoizotopunun bozunum şeması	37
4.10. $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ reaksiyonu tesir kesiti	39
4.11. ^{19}F izotopunun bozunum şeması	40
4.12. $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ reaksiyonu tesir kesiti	41
4.13. ^{64}Cu izotopunun bozunum şeması	42
4.14. $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ reaksiyonu tesir kesiti	43
4.15. ^{66}Ga izotopunun bozunum şeması	45
4.16. $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$ reaksiyonu tesir kesiti	46

4.17.	^{198}Au izotopunun bozunum şeması	48
4.18.	$^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ reaksiyonu tesir kesiti	49
4.19.	^{62}Cu izotopunun bozunum şeması	50
4.20.	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ reaksiyonu tesir kesiti	51
4.21.	^{74}As izotopunun ^{74}Se izotopuna bozunum şeması	53
4.22.	^{74}As izotopunun ^{74}Ge izotopuna bozunum şeması	53
4.23.	$^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$ reaksiyonu tesir kesiti	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Parçacık hızlandırıcılarının kullanım alanları	2
2.1. Nükleer Tıp alanında kullanılan bazı radyoizotoplar	20
4.1. $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	25
4.2 $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	28
4.3 $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	31
4.4 $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	34
4.5 $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	37
4.6 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	40
4.7 $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	42
4.8 $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	44
4.9 $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	47
4.10 $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	50
4.11 $^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi	52
5.1 Bu çalışmada incelenen nükleon girişli nükleer reaksiyonların Q değerleri, eşik enerjileri ile üretilebilecek radyoizotopların maksimum tesir kesitleri ve optimum enerji aralıkları	56

SİMGELER DİZİNİ

E_i	: Gelen parçacığa ait ilk enerji.
A_i	: Çekirdeğin kütle numarası.
N	: Çekirdeğin nötron sayısı.
E_F	: Fermi enerjisi.
τ	: Etkileşme süresi.
E	: Bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi.
U	: Residual çekirdeğin uyarılma enerjisi.
$\varepsilon, \varepsilon'$: Gelen ve giden parçacıkların kütle merkezi sistemindeki enerjileri.
$P_\nu(\varepsilon)d\varepsilon$: Enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ olan ve sürekli bölgeye yayınlanan ν tipi parçacıkların (nötron ve proton) sayısı.
n_0	: Başlangıç exciton sayısı.
p	: Parçacık sayısı.
h	: Deşik sayısı.
Δn	: Exciton sayısındaki değişim.
\bar{n}	: Denge konumundaki (en muhtemel) exciton sayısı.
${}_n\mathcal{X}_\nu$: Bir n exciton durumundaki ν türündeki parçacıkların sayısı.
$N(\varepsilon, U)$: Bir exciton ε kanal enerjisiyle yayınlandığında kalan çekirdeğin U uyarılma enerjisinin diğer $n-1$ excitonları arasında paylaşılacak şekilde n excitonunun uygun bir biçimde düzenlenme sayısı.
$N_n(E)$: E uyarılma enerjisinde n parçacık artı deşik toplam birleştirim sayısı.
$\lambda_c(\varepsilon)$: Bir parçacığın (ε) kanal enerjisiyle sürekli bölgeye yayınlanma hızı.

$\lambda_+(\varepsilon)$: ε enerjili bir parçacığın sürekli bölgeye yayınlanmış olduğu zamanki çekirdek içi geçiş hızı.
D_n	: Bir n- exciton zincirinde başlangıç popülasyon kesiti.
σ_R	: Reaksiyon tesir kesiti.
σ_i	: İnelastik tesir kesiti.
g	: Tek – parçacık düzey yoğunluğu.
$\tau(n)$: n exciton durumunda ortalama ömür.
$q(n, t=0)$: Başlangıç şartı.
$\tau(n)$: Sistemin $n(n=p+h)$ excitonlu bir durumda kalma zamanı.
W_I	: n excitonlu durumun birim zamandaki toplam bozunum ihtimali.
λ^+	: $n \rightarrow n+2$ durumu geçiş ihtimali.
λ^-	: $n \rightarrow n - 2$ durumu için geçiş ihtimali.

1. GİRİŞ

Atom çekirdeği üzerindeki ilk bilgiler, 1926 yıllarına kadar 10^{-12} cm mertebesinde bir çapa sahip olduğu ve pozitif yüklü protonlardan oluştuğundan ibaretti. Ayrıca çekirdeğin etrafında, 10^{-8} cm mertebesindeki yörüngeler üzerinde dolanan elektronun yükü ölçülmüştü. Protonun yükünün de aynı değerde fakat pozitif olduğu ve elektronun kütesinin yaklaşık 2000 katı daha büyük bir kütleyle sahip olduğu biliniyordu. Çekirdekte protonlarla birlikte kütleleri yaklaşık protonunki kadar fakat elektrik yükü bulunmayan parçacıkların yani nötronların mevcut olduğu ancak altı yıl sonra 1932'de Chadwick tarafından gösterilmiştir. Bunların hepsi tarihte nükleer fizikçilerin masum devresi olarak adlandırılır. Gerçekten çekirdek hakkında daha temel bilgilerin elde edilebilmesi için bazı hızlı parçacıkların kullanılarak, çekirdeklerin bombardıman edilmesi ve bu nükleer reaksiyon sonucu oluşan durumun incelenmesi gerekiyordu. Hızlı parçacığın proton olabileceği fakat hedef çekirdeğin pozitif yükünden dolayı ortaya çıkan Coulomb itmesi sebebiyle protonun belirli bir enerjiye yani eşik enerjisine sahip olması gerekliliği ortaya çıkmıştı. Bu hızlandırmayı temin eden sistemlere parçacık hızlandırıcıları denmiştir. Hızlandırıcı yarışında ilk adım, 1926 yıllarında daha enerjik ve daha şiddetli X-ışınları elde etmek amacıyla geliştirilmeye başlanan elektron hızlandırıcıları ile atılmıştır.

Katot ışınları tüpü olarak bilinen ilk hızlandırıcı, aralarında yüksek voltaj farkı uygulanmış katot ve anot elektrotlarına sahip bir lambadan ibaretti. Günümüzde var olan parçacık hızlandırıcılarının gelişimi 1920'li yıllara kadar uzanmaktadır. 1920'lerde, John Douglas Cockcroft ve Ernest Thomas Sinton Walton bir vakum teknesine konulmuş iki elektrot arasına 100 KeV'luk gerilim uygulayarak, ilk yüksek voltaj parçacık hızlandırıcısını yaptılar. Takip eden yıllarda, parçacıkların zamanla değişken potansiyele sahip bir dizi geçitler üzerinde hızlandırılması düşüncesi doğdu. Bu düşünce doğrultusundaki çalışmalar neticesinde; Rolf Wideröe 1929 yılında ilk modern lineer elektron hızlandırıcısını (Linac), Ernest O. Lawrence ise 1932 yılında manyetik alanı da kullanarak, dairesel tipte olan siklotronu tasarlayıp hayata geçirdiler. Cockcroft-Walton proton hızlandırıcısı ile hızlandırılan protonlar Li çekirdekleri üzerine gönderilerek iki He çekirdeği ortaya çıkarılmıştır. Daha yüksek elektrostatik hızlandırma potansiyelleri ise Van de Graaff jeneratörü ile elde

edilmiştir. Bu hızlandırıcı ile enerji olarak MeV düzeyine ulaşılmıştır. İndüksiyon doğrusal hızlandırıcıları ile yine birkaç MeV enerjiye ulaşmak aynı tarihlerde söz konusu olmuştur (Krane, 2001).

1940'lı yılların sonlarından başlayarak gelişen teknoloji ile ortalama her yedi yılda bir hızlandırıcılarla ulaşılan enerjinin üst sınırı 10 kat arttırılmış ve günümüzde TeV (10^{12} eV) boyutlarındaki enerjilere ulaşılmıştır.

Parçacık fiziğinin ve nükleer fiziğin vazgeçilmez deneysel aygıtları olan hızlandırıcılar günümüzde temel parçacıkların üretimi, serbest elektron lazerlerinin üretimi ve başta temel araştırmalar olmak üzere, endüstriyel ve teknolojik ürünlerin üretilmesinde, tıpta teşhis ve tedavi amaçlı kullanılan radyoizotopların üretilmesinde ve özellikle gelişmiş ülkelerde temel bilimlerin, mühendisliğin ve teknolojinin gelişmesinde kilit rol oynayarak makro ekonominin bir parçası haline almıştır.

Günümüzde yaklaşık olarak 15000 parçacık hızlandırıcısı, değişik alanların hizmetinde faaliyet göstermektedir. Bunlardan, çekirdek ve temel parçacık fiziği araştırmalarında kullanılan hızlandırıcıların, sayılarının 100 civarında olması dikkat çekicidir. Radyoterapi amaçlı tasarlanmış hızlandırıcıların, 5000 adet ile en yaygın çeşit olduğu söylenebilir. Tıbbi izotop üretiminde kullanılan siklotron hızlandırıcı sayısı 200 civarındadır. Dünya nüfusuna oranladığımızda, 30 milyon insan başına 1 siklotron düşmektedir. Buradan, dünya ortalamasını tutturabilmemiz için 2 adet siklotron hızlandırıcısına sahip olmamız gerektiği ortaya çıkmaktadır (Ercan, 2001).

Çizelge 1.1 Parçacık hızlandırıcılarının kullanım alanları

İyon impalamentasyonu ve yüzey modifikasyonları	7000
Endüstrideki hızlandırıcılar	1500
Radyoterapi	5000
Tıbbi izotop üretimi (Siklotron)	200
Hadronterapi	20
Sinkrotron radyasyonu kaynakları	70
Nükleer olmayan araştırmalardaki hızlandırıcılar	1000
Nükleer ve parçacık fiziği araştırmaları	110

Yukarıda da bahsedildiği gibi, teşhis ve tedavi amaçlı tıbbi radyoizotopların üretimi, nükleer teknoloji ve nükleer fiziğin önemli bir uygulama alanıdır. Söz konusu izotoplar, nötronlar ile oluşturulan nükleer reaksiyonlar ile nükleer reaktörlerde veya yüklü parçacıklarla oluşturulan nükleer reaksiyonlar ile hızlandırıcılarda üretilirler. Tıbbi uygulamaların amacı, yapay radyoizotoplar kullanılarak, insan organizmasını araştırmak, hastalıklara tanı koyabilmek ve tedavi edebilmektir. Bu bakımdan radyoizotoplarla ilgili nükleer reaksiyon tesir kesiti verilerinin önemi, radyoizotop üretim programlarında iyi bilinmelidir.

Bu çalışmada; ^{119}Sb , ^{169}Yb , ^{61}Cu , ^{124}I , ^{111}In , ^{18}F , ^{64}Cu , ^{66}Ga , ^{74}As , ^{198}Au , ^{62}Cu gibi radyoizotopların üretim tesir kesitleri hesaplandı. Bu hesaplamalarda farklı nükleer reaksiyon modellerini kullanan bilgisayar programlarından yararlanıldı. Elde edilen sonuçlar, uluslararası atom enerji kurumundan ve literatürden alınan deneysel tesir kesiti verileri ile karşılaştırıldı. Nükleer reaksiyon modellerinin bu verilere uygunluğu araştırıldı ve ayrıca tezde konu edilen radyoizotopların üretiminde gerekli olan en uygun proton enerji aralıkları belirlendi.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Nükleer Reaksiyonlar

Bir reaktörden veya bir hızlandırıcıdan ya da bir radyoaktif kaynaktan yayınlanan, enerji taşıyan parçacıklar, kütleli bir hedef malzeme üzerine düşürülürse, bu hedef içerisindeki elementlerin atomları ile enerji bombardıman parçacıkları arasında nükleer reaksiyonlar oluşabilir.

Nükleer reaksiyonlar, enerji taşıyan bu bombardıman parçacıklarının kütle numaralarına ve enerjilerine göre üç ayrı kategoride toplanabilir. Kütle numarası $A \leq 4$ ve nükleon başına enerjisi 10 MeV ya da daha az olan bombardıman parçacıkları için klasik düşük enerjili nükleer reaksiyon kuralları geçerlidir ve nükleer fizik kapsamında genellikle bu reaksiyonlar incelenir. Son zamanlarda üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı, $A < 40$ olan bombardıman parçacıkları ile oluşturulan nükleer reaksiyonlar, ağır iyon reaksiyonları olarak adlandırılır. Kinetik enerjisi 100 MeV–1GeV aralığında olan bombardıman parçacıkları orta enerjili reaksiyon sınıfındadır ve bu reaksiyonlarda proton ve nötronlar birbirlerine dönüşebilirken, mezon oluşumu gözlenir. 1 GeV üzerinde enerjiye sahip parçacıklar için, nükleonları oluşturan kuarklar yeniden yapılanabilir ve tüm sihirli (exotic) parçacıklar oluşturulabilir. Bu tür reaksiyonlar, yüksek enerjili reaksiyonlar grubundadır (Krane, 2001).

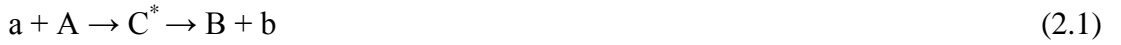
2.2. Nükleer Reaksiyon Türleri

Nükleer reaksiyonlar, gelen bombardıman parçacığının nükleon başına enerjisi (MeV/A) ve reaksiyon zamanına bağlı olarak yavaş (Bileşik Çekirdek Reaksiyonları) ve hızlı (Direkt Reaksiyonlar) olmak üzere ikiye ayrılabilir.

2.2.1 Bileşik Çekirdek Reaksiyonları

Bombardıman parçacığı, çekirdek yarıçapına göre, küçük bir çarpma parametresi ile hedef çekirdeğe girdiğinde, gelen nükleonun hedef çekirdek nükleonlarıyla ardışık etkileşim yapma ihtimali vardır. Birkaç ardışık etkileşmeden sonra bombardıman parçacığının enerjisi, bombardıman parçacığı ve hedef çekirdekten oluşan bileşik sistemin nükleonları arasında paylaşılır. Bu etkileşimlerin sonucunda nükleonlar arası enerjilerdeki istatistiksel dağılımla çekirdekten bir nükleonun salıverilme olasılığı artar. Bombardıman parçacığının soğurulması ve çıkan parçacığın yayınlanmasından önceki bu süreç, bir ara durumu oluşturur ve bu duruma bileşik çekirdek denir (Hauser ve Feshblach, 1952).

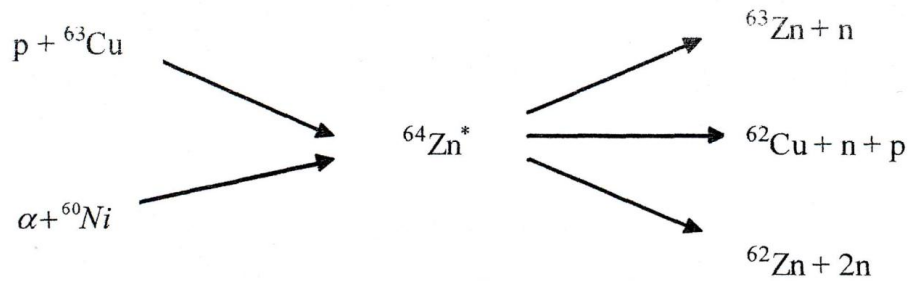
Bileşik çekirdek, buharlaşma modeli ile açıklanan parçacık salınımı yolu ile bozunur. Bileşik çekirdeğin oluşumu ve bozunumu sembolik olarak ;



şeklinde gösterilir. Burada, C^* , bileşik çekirdeği ifade eder. Bileşik çekirdeğin bozunma olasılığı bileşik çekirdeğin oluşum sürecinden bağımsızdır.

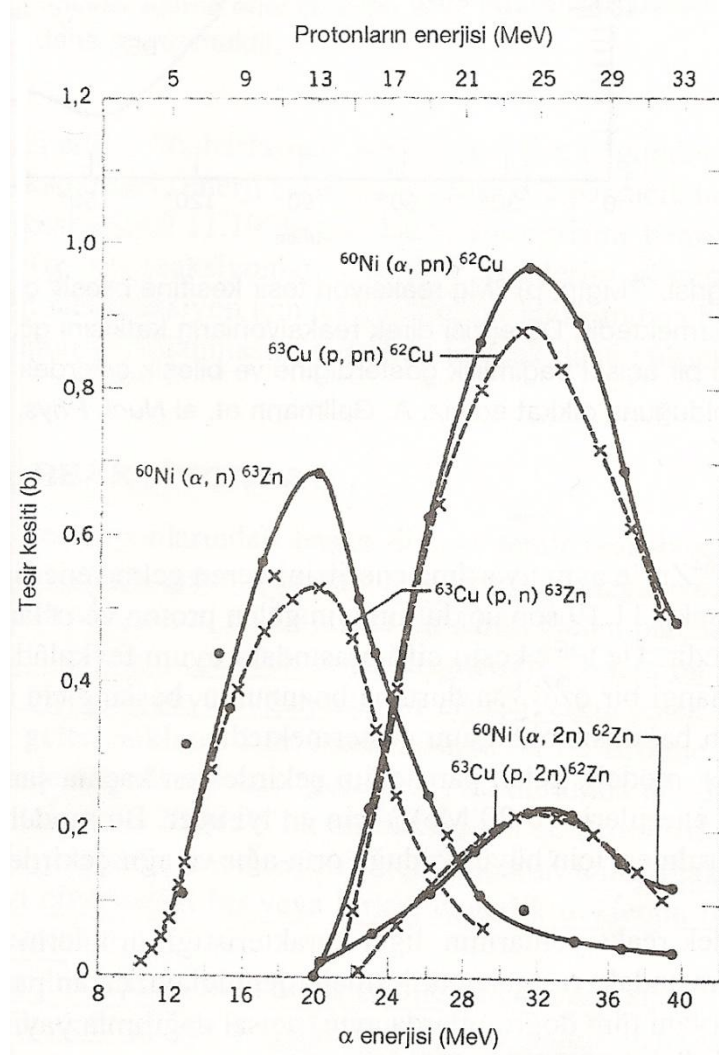
Dolayısıyla; çıkış kanalı olasılığı, Bohr bağımsızlık hipotezi gereği, giriş kanalı olasılığından bağımsızdır. Bileşik çekirdek bir kez oluştuğunda, oluşum sürecini unutarak farklı çıkış kanallarına belirli olasılıklarla bozunur.

Bu durum ${}^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdeği için örnek olarak Şekil 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 ${}^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdeği için farklı çıkış kanalları

Bileşik çekirdeğinin oluşumu sonrasında farklı çıkış kanallarına karşılık gelen reaksiyon tesir kesitleri $^{64}\text{Zn}^*$ bileşik çekirdeği için Şekil 2.2’ de verilmiştir. Bu reaksiyon tesir kesitleri, bileşik çekirdek modelinin temel varsayımlarıyla uyumlu, benzer özellikler göstermektedir.

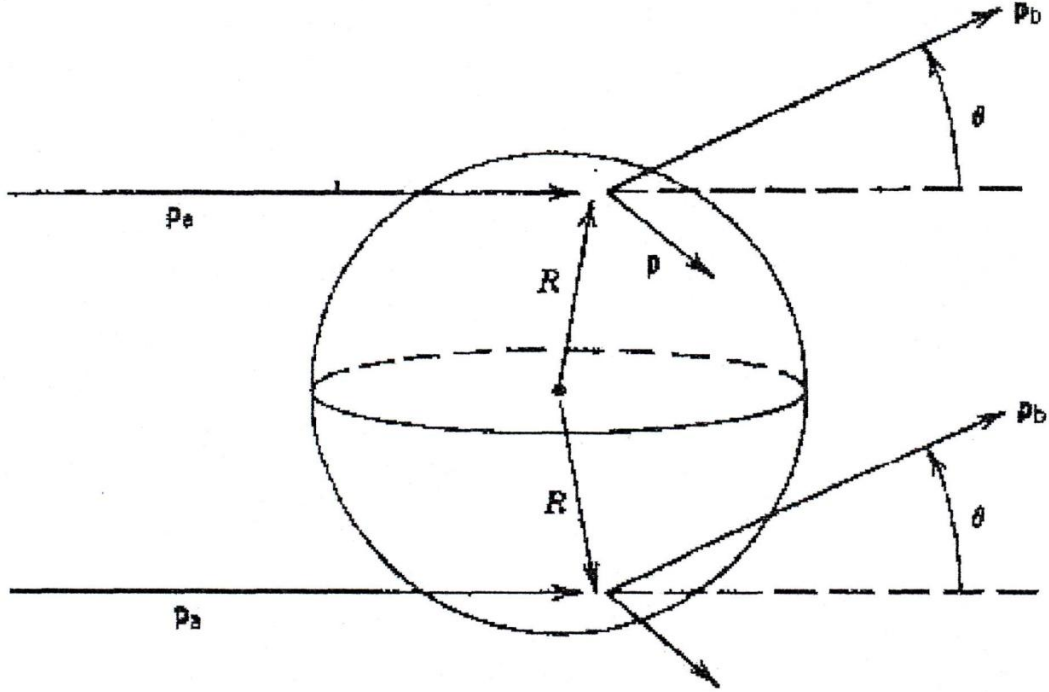


Şekil 2.2 Zn bileşik çekirdeğinin oluşmasıyla sonuçlanan farklı reaksiyonlar için tesir kesitleri

Bu bileşik çekirdeği oluşturmak için geçen zaman 10^{-16} ile 10^{-18} sn arasında değişmektedir (Krane, 2001).

2.2.2 Direkt Reaksiyonlar

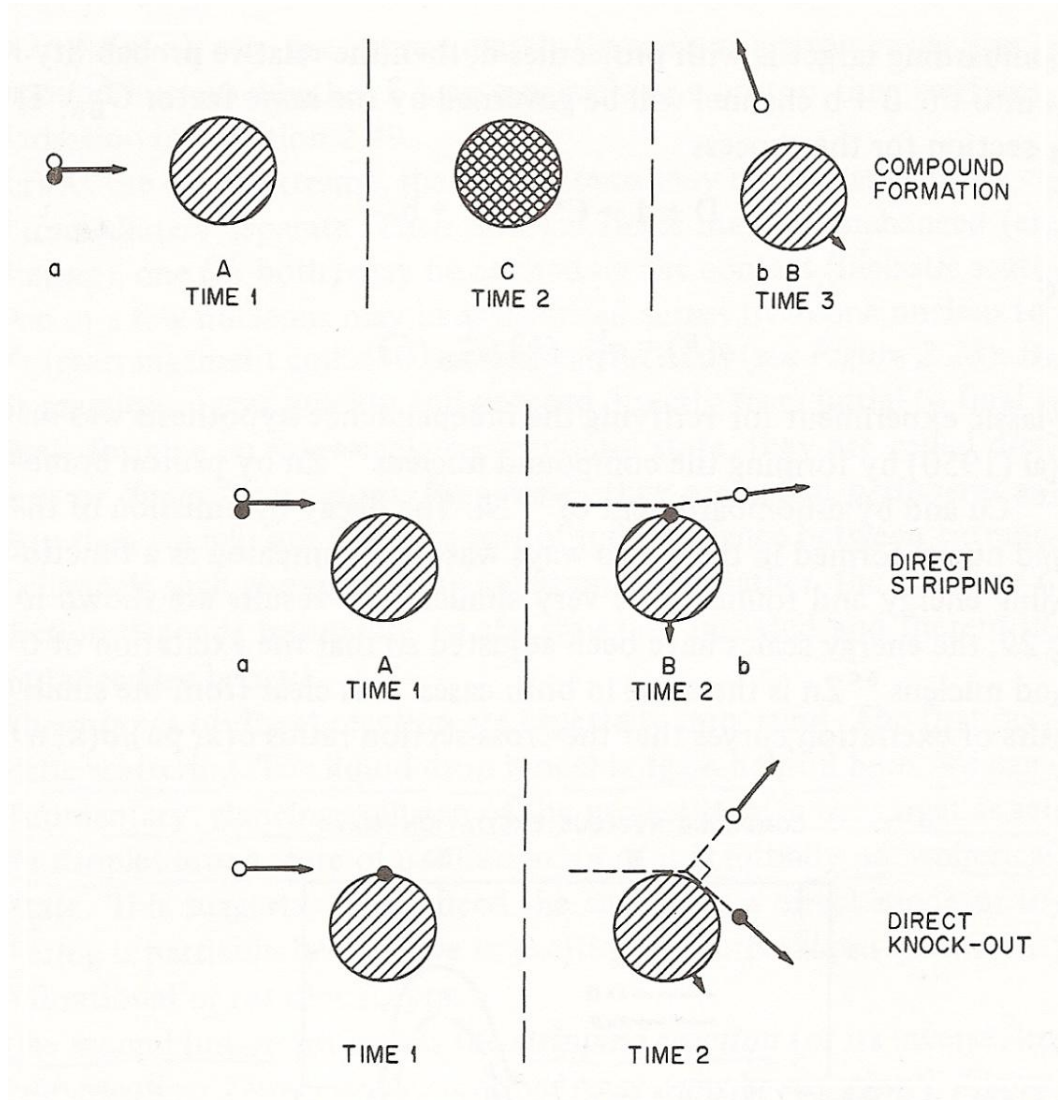
Bu reaksiyonda gelen bombardıman parçacığının enerjisi arttıkça parçacığının dalga boyu, çekirdek içi nükleonla etkileşecek kadar düşer. Bu durumda bombardıman parçacığı öncelikli olarak çekirdeğin yüzeyindeki nükleonlarla etkileşir. Bu etkileşme Şekil 2.3' de gösterilmektedir. Bu reaksiyon, direkt reaksiyonları oluşturur. Bu reaksiyonla, bir kabuk durumuna bir nükleon eklenip, koparıldığı için çekirdeğin kabuk yapısının incelenmesine katkıda bulunulur. Aynı zamanda ürün çekirdeğin birçok uyarılmış durumuna bu reaksiyonla ulaşılır.



Şekil 2.3 Çekirdek yüzeyinde meydana gelen direkt reaksiyonların geometrisi (Krane, 2001)

Direkt reaksiyonları, bileşik reaksiyonlardan ayıran temel fark direkt reaksiyonların 10^{-22} sn mertebesi kadar kısa bir zamanda meydana gelmesidir. İki reaksiyon için belirlenen açısal dağılımda ise direkt reaksiyonların daha keskin piklere sahip olduğu gözlenmiştir.

İnelastik saçılma, büyük ölçüde gelen parçacığın enerjisine bağlı olarak, ya bir direkt reaksiyon veya bir bileşik çekirdek reaksiyonu ile meydana gelebilir. Bu reaksiyonların şematik gösterimi Şekil 2.4’ de verilmiştir. (d,n) döteron direkt soyulma (stripping) reaksiyonu her iki reaksiyonla da oluşabilir. Ama bir (d,p) döteron direkt soyulma stripping reaksiyonu ancak direkt reaksiyonla oluşabilir. Çünkü bileşik reaksiyonda, döteron, hedef çekirdeğe girdikten sonra istatistiksel dağılımının ardından, protonun coulomb engelini aşarak buharlaşması güçtür.



Şekil 2.4 Bileşik çekirdek oluşumu aşaması ve direkt reaksiyon türleri

2.3 Nükleer Reaksiyon Tesir Kesiti

Mikroskobik fizik alanında teoriler genellikle kesinlik ifade etmez. Farklı çekirdek reaksiyonlarının meydana gelme ihtimallerini ölçmek veya hesaplamak çok önemlidir. Radyoizotop üretiminde, soğurulmada, saçılmada veya herhangi bir nükleer reaksiyonda gelen parçacıklar hedefe çarptıkları zaman neler olabileceğini ifade etmenin yolları bilinmelidir. Genel olarak, tesir kesiti, reaksiyonun meydana gelme ihtimalinin bağlı bir ölçüsünü verir (Krane, 2001). Nükleer reaksiyon modeline göre birbirlerine doğru gelen iki küre ancak birbirlerine değerse reaksiyon gerçekleşir. Bu canlandırmada reaksiyon olasılığı her iki kürenin yüzey alanları ile orantılıdır. Örneğin, bir nötronun hedef ile etkileşme olasılığı çekirdek yüzeyinin alanı ile orantılıdır ve hedef ile etkileşen nötronun büyüklüğü yaklaşık 1 barn kadardır ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Nükleer bir reaksiyonun enerjisi, coulomb engeli ile Q değerini aşmak için gereken enerjiden düşük ise (tünelleme olayı hariç) nükleer reaksiyon oluşmaz. Engelin altındaki enerjilerde reaksiyon olasılığı düşüktür. Nükleer reaksiyon için ihtiyaç duyulan enerji, hedef malzemenin atom numarası arttıkça artmaktadır. Küçük atom numaralı hedef malzemeler düşük enerjili hızlandırıcılar kullanılabilir ancak yüksek atom numaralı hedefler için parçacık enerjisi yüksek olmalıdır (Yalçınar, 2008).

Bir nükleer reaksiyonun meydana gelme ihtimalini belirleyen ölçülebilir niceliklere tesir kesiti adı verilir. Gelen parçacıkların hedef çekirdekleriyle doğrudan etkileştikleri belirli etkin alanları vardır. Tesir kesitinin birimi barn'dır. Barn b, daha sık kullanılan milibarn ise, mb sembolü ile gösterilir ($1 \text{ b} = 10^3 \text{ mb} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) (Yalçınar, 2008).

2.4. Diferansiyel Tesir Kesiti

Gelen parçacıklar hedef çekirdekle etkileştiklerinde, her zaman tek tip bir nükleer reaksiyon meydana gelmez. Eğer birden fazla nükleer reaksiyon meydana gelirse, her bir reaksiyon için tesir kesitleri farklı olacaktır. Bu özel tesir kesitlerine diferansiyel (kısmi) tesir kesitleri denir ve toplam tesir kesiti bunların toplamından oluşur. Nükleer reaksiyondan veya saçılmadan sonra meydana gelen parçacıkların çoğu, anizotropik dağılıma gösterirler ve aynı zamanda farklı açılarda farklı enerjilere

sahip olurlar. Geliş yönüyle θ açısı yaparak $d\Omega$ katı açısı içine birim zamanda saçılan parçacıkların sayısının bilinmesi önemlidir. Böylece açığa bağımlı başka bir tesir kesitine gerek duyulur ve birim katı açı başına düşen tesir kesiti olarak tarif edilerek,

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır. Böylece toplam tesir kesiti ise,

$$\sigma_T = \int_{\Omega} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.3)$$

olacaktır. $d\Omega$ katı açısının değeri, Şekil 2.5 yardımıyla,

$$d\Omega = \frac{\text{alan}}{(\text{mesafe})^2} = \frac{dA}{r^2} = \frac{(rd\theta)(r\sin\theta d\phi)}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.4)$$

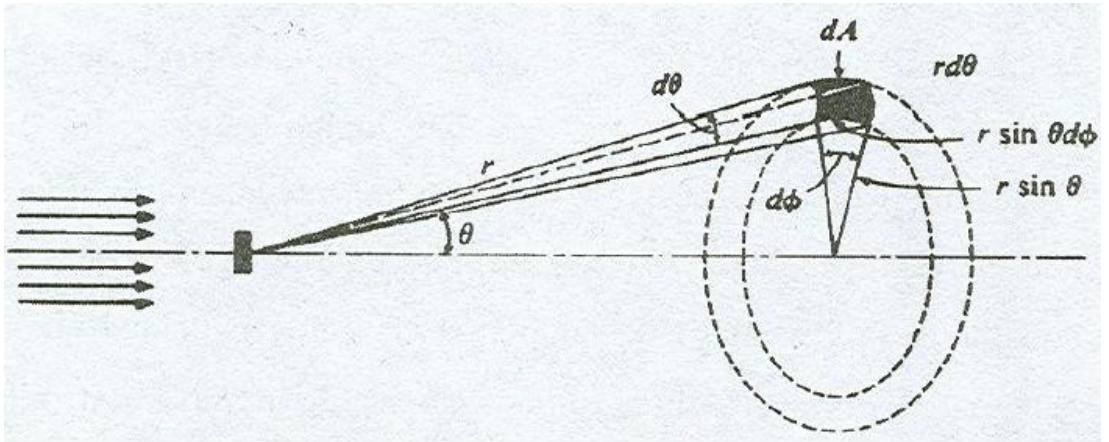
ifadesiyle verilir. Toplam katı açı ,

$$\Omega = \int_{\Omega} d\Omega = \iint \sin\theta d\theta d\phi = 4\pi \quad (2.5)$$

olup katı açı kesri ise ,

$$\frac{d\Omega}{\Omega} = \frac{A}{r^2} \frac{1}{4\pi} = \frac{A}{4\pi r^2} \quad (2.6)$$

dir. σ_T , toplam tesir kesiti iki bağıntı birleştirilerek,



Şekil 2.5 $d\Omega$ katı açısı içinde saçılan demeti gösteren reaksiyon geometrisi

$$\sigma_T = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.7)$$

ifadesiyle bulunabilir.

Şayet diferansiyel tesir kesiti ϕ 'den bağımsız ise tesir kesiti (ϕ üzerinden integral alındıktan sonra) ;

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

olacaktır. Burada $d\sigma/d\Omega = \sigma(\theta)$ diferansiyel tesir kesitidir. Diferansiyel tesir kesiti ölçümünün, sadece enerjiye bağımlı olmayıp, aynı zamanda tesir kesitinin yöne bağımlılığının nükleer reaksiyonun cinsine göre olduğu gerçeğinin bulunmasında da faydası vardır. Bir nükleer kuvvet tipi kabullenerek, farklı nükleer reaksiyonların açısız dağılımını ifade etmek mümkündür. Teori ile deney arasındaki uygunluk, farz edilen nükleer kuvvet şeklinin doğruluk derecesini verecektir (Yalçın, 2008).

2.5. Nükleer Reaksiyon Modelleri

2.5.1. Griffin (Exciton) Modeli

Nükleer reaksiyonlar için Griffin (veya exciton) denge öncesi model (Williams F.C., (1971)) ilk kez 1966 yılında Griffin tarafından ileri sürülmüştür. Daha sonra birçok araştırmacı tarafından genişletilip, düzeltilerek hem yayınlanan parçacıkların açı integralli spektrumlarının hesaplanmasında hem de çekirdeklerin uyarılma fonksiyonlarının elde edilmesinde büyük bir başarıyla kullanıldı. Ancak ne Griffin modeli ne de Blann tarafından geliştirilen Hibrid Model (Fu C.Y., (1984)) yayınlanan parçacıkların açısız dağılımlarını açıklamayı başarmıştır. Denge öncesi modeller arasında ilk olarak yalnız "Intranuclear cascade" (INC) yayınlanan parçacıkların açısız dağılımlarını açıklayabilmiştir. Ancak bu modelin başarı düzeyi sınırlıdır.

Griffin Modeli'ne göre bir reaksiyonun ilk birkaç evresi şematik olarak Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Nükleer potansiyel, eşit aralıklı tek parçacık durumları olarak

gösterilmiştir. Mermi parçacık, hedef çekirdeğe girdikten sonra $1p-0h$ (1 parçacık – 0 deşik) durumu oluşturur. Daha sonra hedef nükleonlardan biriyle etkileşerek $2p-1h$ (2 parçacık–1 deşik) durumunu meydana getirir. Bunu takip eden etkileşmeler daha fazla parçacık–deşik çiftini oluşturur. Sonuç olarak yeteri kadar parçacık – deşik oluşunca, geriye doğru çift–yok olma süreci başlar ve bu olay, tekrar kararlı duruma gelinceye kadar devam eder. Sistemin durumu, parçacık ve deşik derecelerine göre sınıflandırılır. Denge süreci, çeşitli tek parçacık durumlarından ziyade, farklı nükleer durum gruplarının yerleşme ihtimallerinin hesaplanması ile takip edilir. Nükleer durumların her biri için parçacık yayınlanması yapabilen bağlı olmayan durumlar oluşacaktır. Bu durum Şekil 2.6’ da görülmektedir. Bu modele göre, her bir duruma ait parçacık yayınlanma hızı hesaplanabilir ve bu bilgiler, denge öncesi yayınlanma spektrumunu elde etmek için bulunma ihtimalleri ile birleştirilebilir (Griffin, 1966, Blann, 1968, Oblozinsky ve Ribansky, 1974).

Açıklandığı gibi bu model, denge süreci izlenirken ve parçacık yayınlanması hesaplanırken, sadece uyarılmış parçacık sayısı ve deşikleri dikkate alır. Ayrıca, denge sürecinin takibi için basit ve çözümü kolay olan birtakım denklemler kullanır. Denge öncesi işlemler, 10 MeV’ in üzerindeki hafif parçacıklar ile oluşturulan nükleer reaksiyonlarda önemli bir yer tutar. Exciton model, Cline ve Ribansky tarafından verilen master denklemlerinin çözümüne dayanır (Cline C.K., (1972)), (Ribansky I., Oblozinsky P., Betak E., (1973)).

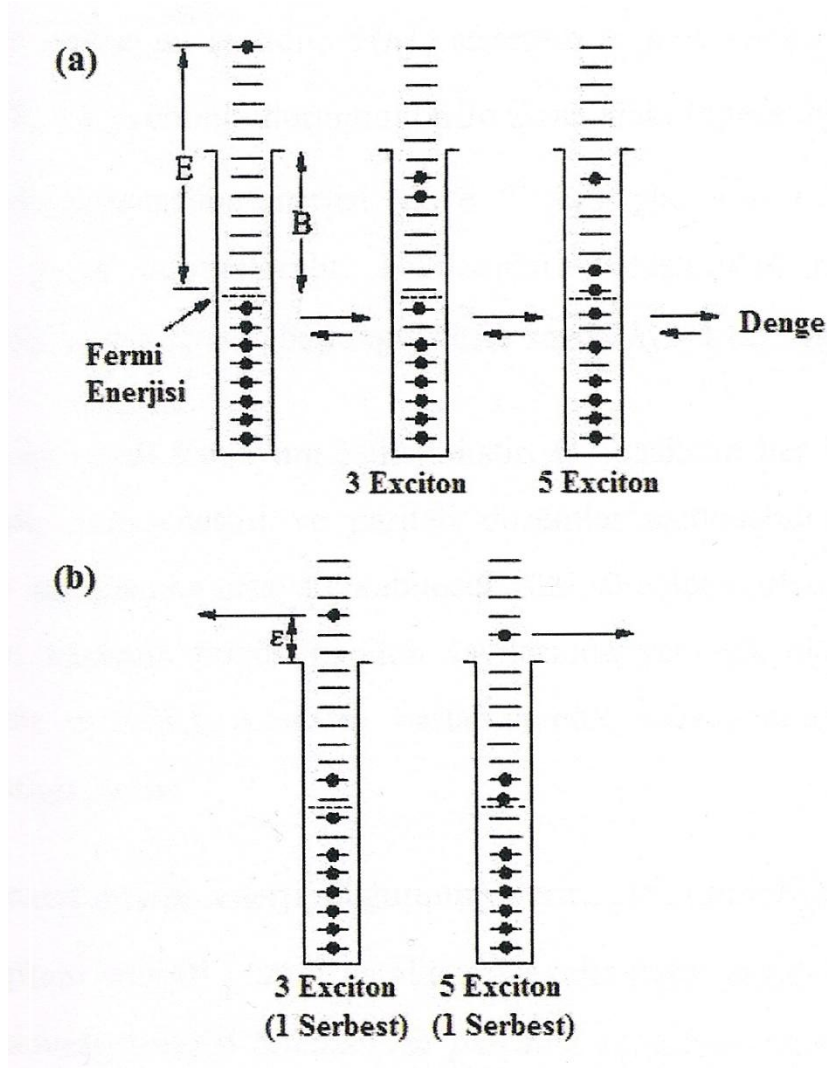
$$-q(n, t = 0) = \lambda^+(E, n + 2) \tau(n + 2) + \lambda^-(E, n - 2) \tau(n - 2) - [\lambda^+(E, n) + \lambda^-(E, n) + W_1(E, n)]\tau(n) \quad (2.9)$$

Burada $q(n, t = 0)$; başlangıç şartıdır, $\tau(n)$; sistemin $n(n = p+h)$ excitonlu bir durumda kalma zamanı, W_1 ; n excitonlu durumun birim zamandaki toplam bozunum ihtimali, E; bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi, λ_+ ve λ_- sırasıyla ; $n \rightarrow n + 2$ ve $n \rightarrow n - 2$ durumları için geçiş ihtimalleridir.

Master denklem sistemi için başlangıç koşulu,

$$P(p, h, 0) = \delta(p, p_0)\delta(h, h_0) \quad (2.10)$$

nükleonlarla oluşturulan reaksiyonlar için başlangıç parçacık sayısı $p_0 = 2$, başlangıç deşik sayısı $h_0 = 1$ dir.



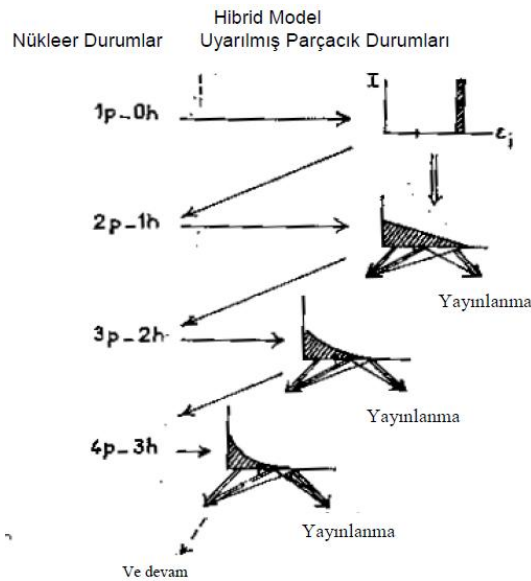
Şekil 2.6 Griffin modelinde, bir reaksiyonun ilk evrelerinin şematik temsili. Yatay çizgiler, potansiyel kuyusundaki eşit aralıklı tek parçacık durumlarını göstermektedir. Uyarılmış parçacık ve deşiklerin serbestlik derecesi, her konfigürasyon için listelenmektedir.

2.5.2. Hibrid (Melez) Model

Hibrid modeli, Fermi-gaz-denge modeli ile Griffin (Exciton) modellerinin temel özelliklerinin birleşiminden meydana gelmektedir. Şematik olarak Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Hibrid model; Griffin modelinde olduğu gibi tek parçacık durumlarını eşit aralıklı bir yerleşim olarak kabul eder. Çekirdek durumlarını,

uyarılmış parçacık ve deşikleri içerecek şekilde sınıflandırılır (Blann, 1971), (Cline, 1972).

Daha önce söylendiği gibi gelen nükleon, hedef çekirdekle $1p - 0h$ durumu oluşturur. Sonra $2p - 1h$ durumu oluşturmak için hedef nükleonla etkileşme yapar. Böylece iki-cisim etkileşmeleri daha fazla parçacık-deşik çifti oluşumuna sebebiyet verirler. Bu model her bir nükleer durum için uyarılmış parçacıkların uyarılma enerjilerinin dağılımını hesaplar. Şekil 2.7' deki küçük grafikler, Fermi enerjisinin üzerinde bulunan, ϵ_i enerjili tek parçacık durumundaki uyarılmış parçacığın bulunma ihtimalini gösterir. Her parçacık uyarılma enerjisi için, yeni parçacık-deşik oluşumuna bağlı olarak kısmi parçacık yayınlanma oranları hesaplanır. İlk olarak $2p - 1h$ konfigrasyonu ile başlanırken, sıra ile bütün durumlar düşünülür. Parçacık yayınlanmasını tüm süreçler denge öncesi spektrumuna katkıda bulunur. Bu süreç, denge sistemindeki en muhtemel eksiton sayısına ulaşılan kadar devam eder. Daha sonra reaksiyonun denge kısmı için standart bir bileşik çekirdek modeli hesabına devam edilir. Bunu takiben nükleer dengede, sadece uyarılmış parçacıklar ve deşikler önemlidir. Parçacık yayınlanma oranlarını incelerken tek tek parçacıkların uyarılma enerjileri önem kazanır. Bu sadece kapalı tip hesaplamalar için geçerlidir. Griffin modelinde olduğu gibi Hibrid modelinde de mermi olarak kompleks parçacıklar kullanılabilir. Ancak parçacık yayınlanması, Fermi-gaz-denge modelindeki gibi ele alındığında; nükleonların yayınlanma hesabı mümkün olur.



Şekil 2.7 Hibrid modeldeki reaksiyonun ilk birkaç durumunun şematik temsili

Küçük grafikler, uyarılmış parçacıkların enerji dağılımını göstermektedir. Aralarındaki oklar da parçacık yayınlanma ve parçacık-deşik çifti oluşumu için geçiş ihtimallerini temsil etmektedir. Enerji skalasının sıfır noktası fermi enerjisidir ve eksen üzerindeki işaret ise yayınlanma eşiğini göstermektedir.

2.5.3. Geometri Bağımlı Hibrid Model

Denge öncesi bozunma için hibrid model formülü Blann ve Vonach (Blann, Vonach, 1983), (Blann, Mignerey, Scobel,1976) tarafından

$$\frac{d\sigma_v(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \sigma_R P_v(\varepsilon) \quad (2.11)$$

ve

$$P_v(\varepsilon)d\varepsilon = \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=+2}}^{\bar{n}} [{}_n\chi_v N_n(\varepsilon,U) / N_n(E)] g d\varepsilon [\lambda_c(\varepsilon) / (\lambda_c(\varepsilon) + \lambda_+(\varepsilon))] D_n \quad (2.12)$$

olarak verilmiştir. Burada σ_R ; reaksiyon tesir kesiti, ${}_n\chi_v$; n exciton durumundaki v tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısı, $P_v(\varepsilon)d\varepsilon$; enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında sürekli bölgeye yayılan v tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısını gösterir. Ayrıca, $\lambda_c(\varepsilon)$; bir parçacığın ε kanal enerjisi ile sürekli bölgeye yayınlanma hızı, $\lambda_+(\varepsilon)$; ε enerjili bir parçacığın çekirdek içi geçiş hızı, E bileşik sisteminin uyarılma enerjisi, $N(\varepsilon,U)$ bir exciton ε kanal enerjisiyle yayınlandığında kalan çekirdeğin $U = E - B_v - \varepsilon$ uyarılma enerjisinin diğer n-1 excitonları arasında paylaşılacak şekilde n excitonun uygun bir biçimde düzenlenme sayısı, $N_n(E)$ E uyarılma enerjisinde n parçacık artı deşik toplam birleştirim sayısı, D_n bir n-exciton zincirinde başlangıç popülasyon kesiti, g tek-parçacık düzey yoğunluğudur. Denklem (13)' deki köşeli parantez içindeki nicelik sürekli bölgede enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında olan parçacık sayısını verir. İkinci parantez içindeki ifade ise sürekli bölgeye geçiş hızının toplam geçiş hızına oranıdır.

2.6. Tıpta Kullanılan Radyoizotoplar

Radyoizotopların biyolojik bilimlerde kullanılması 1923 yılında Von HEVESY' nin çalışmalarıyla başlar (Hevesy, 1923). Hevesy bu tür çalışmalar için gerekli radyasyon miktarının çok küçük olması gerektiğini göstermiştir. O zaman bu tür çalışmalar için gerekli radyoizotoplar henüz mevcut değildi. Bu problem Curie ve Jeliotun, 1934' de radyoizotopların suni olarak üretilebileceğini keşfetmeleriyle çözümlendi (Curie, Foliot, 1934). Birçok bilim adamı yeni radyonüklid üretimi çalışmalarına kendilerini adadı. Ve kısa bir sürede çok sayıda radyonüklid biyolojik bilimcilerin kullanımı için hazırlandı.

Herz ve arkadaşları 1938 yılında tavşan üzerinde yaptıkları deneylerle tiroid bezinin ^{131}I izotopunu tuttuğunu gösterdi (Blann, Vonach, 1983). Hamilton ve Soley 1939' da insanda ^{131}I ' in tiroiddeki tutulumunu basit bir Geiger-Muller sayacı ile ölçtüler (Blann, Mignerey, Scobel, 1976). Nükleer tıp bilimi adı altında toplanılan bu çalışmalarla teşhis ve tedavide uygulanacak sayısız metod bulundu.

Radyoizotopların biyomedikal araştırmada en büyük katkıları, şüphesiz canlı organizmadaki biyolojik ünitelerin sürekli bir değişim halinde olduğunu göstermeleridir (Colobetti, (1979)). Radyoizleyiciler sistemdeki dengeyi bozmazlar, ama kendileri sisteme verildiklerinde denge halinde olmadıkları için bu maddelerin dinamiği, taşınma mekanizması, yerleşmeleri, metabolizması ve yıkılımı zamanın bir fonksiyonu olarak çalışabilir.

Radyofarmakoloji bilim dalında toplanılan bu çalışmalar tıpta fizyolojik problemlerin aydınlatılmasına yardımcı olur. Radyoformasötiklerin gelişmesine paralel pozitron kamera, tek-foton emisyon tomografisi gibi hayli gelişmiş bilgisayarlı cihazlar da piyasaya sürülmüştür. Wagner tarafından (radyoizotopların bedene girdikten sonra hangi dokularda ve ne konsantrasyonda biriktiklerini gösteren) "biyolojik dağılım bilimi" olarak tarif edilen nükleer tıp, hem bölgesel, hem de global fonksiyon imajlaması yönünde gelişmektedir (Wagner, Heidelberg, 1980).

Medikal amaçlarla kullanılan radyoizotoplar genellikle hızlandırıcılarda ve reaktörlerde üretilmektedir. Radyoizotopların hangi yöntem ile üretileceğini, üretimde kullanılan ışınlayıcı parçacıkların enerjisi ve hedef çekirdek belirler.

Nükleer tıpta kullanılan radyoizotopların hemen hemen hepsi yapaydır. Radyoizotopların üretimi üç farklı yoldan gerçekleştirilmektedir. Bunlar nükleer reaktörler, hızlandırıcılar ve radyoizotop jeneratörleridir. Radyoizotop üretimindeki en önemli kriter zamandır. Kısa yarı ömürlü izotoplar kullanılacakları yerlere zamanında ulaştırılamayabilirler, bu nedenle üretim noktasından uzakta bulunan ve özellikle kısa yarı ömürlü radyoizotop ihtiyacı olan tesislerin taleplerini karşılamak için radyoizotop jeneratörleri kullanılmaktadır.

Nükleer tıpta kullanılan radyonüklidler üretim şekline göre şöyle sınıflandırılabilir.

a) Siklotron ürünleri

- Siklotron ürünleri : ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F
- Gamma yayınlayan izotoplar : ^{57}Co , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{123}I , ^{201}Tl

b) Jeneratör ürünleri : ^{68}Ga , $^{81\text{m}}\text{Kr}$, ^{82}Ru , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{113\text{m}}\text{In}$

c) Nükleer reaktör ürünleri : ^{133}Xe , ^{99}Mo , ^{131}I

2.7. Radyoizotopların Kullanım Alanları

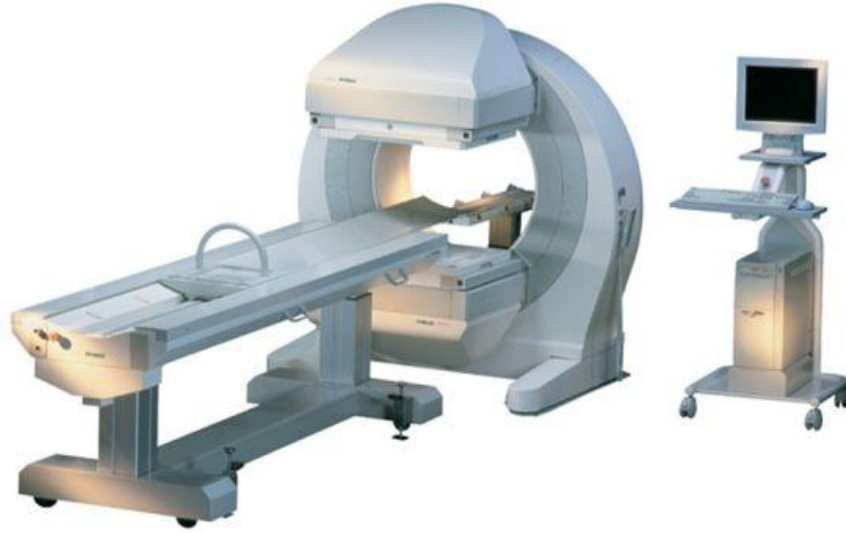
Tıpta ve endüstride kullanılan radyoizotoplar reaktör ve hızlandırıcılar kullanılarak üretilmektedir. Ticari anlamda SPECT ve PET radyoizotoplarının üretimi için hızlandırıcı olarak siklotronlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hem PET hem de SPECT radyoizotopları katı, sıvı veya gaz formundaki hedeflerin, siklotrondan hızlandırılan parçacık veya iyonlarla ($p, d, ^3\text{H}, ^3\text{He}, ^4\text{He}$) bombardıman edilmesi sonucunda elde edilmektedir.

2.7.1 Tek Foton Yayınlanmalı Bilgisayarlı Tomografi (SPECT)

SPECT'in temeli 1917 yılında Avusturyalı matematikçi J. Radon tarafından yayınlanan bir makale ile atılmıştır. Bu yayında J. Radon iki ya da üç boyutlu bir objenin çeşitli açılar altındaki görünümünün yeniden elde edilebileceğini vurgulamıştır.

1922’de radyolojide x-ışını tüpü hasta üzerinde döndürülerek tomografi denemeleri yapılmıştır. Fakat objenin üç boyutlu yapısının oluşturulması ancak bilgisayarlı tomografinin geliştirilmesi ile anlam kazanmıştır. J. Radon’un yayınının klinik uygulamaya geçebilmesi Oldendorf’un 1961’de ¹³¹I ile gama ışınlarının transmisyon görüntülerinin alınmasına kadar sürmüştür. 1963’de Kuhl ve Edvard emisyon tomografisini geliştirmişlerdir. Bu araştırmacılar 1966’ da osiloskop kamera ile elde ettikleri projeksiyon görüntülerini depolamayı başardılar. Buna rağmen görüntülerin yeniden elde edilmesi (imaj rekonstrüksiyon) modern bilgisayarların geliştirilmesine kadar mümkün olmadı. Gama kamerayı icat eden Hal Anger 1967’ de hastanın etrafında dönebilen bir kamera tezini ortaya attı. Bu düşüncenin uygulamaya geçebilmesi de 10 yıllık bir zaman aldı (Cantez, Gorpe, 1992).

SPECT teknikleri, Şekil xxx’de g r ld ğu gibi, iki boyutlu görüntülerin her setinde üç boyutlu görüntülerin elde edilmesine olanak sağlar. Kamera hastanın etrafında döndükçe planer imajın oluşumuna yarayan bilgileri toplayarak bilgisayara gönderir. Bu veriler her dönüş açısında toplanır. Elde edilen veriler sayısal değerlere çevrilerek piksellere kaydedilir.



Şekil 2.8 Tek Foton Yayınlamalı Bilgisayarlı Tomografi (SPECT) cihazının genel görünümü

2.7.2 Pozitron Yayınlamalı Tomografi (PET)

PET, nükleer tıp görüntüleme yöntemleri içinde en gelişmiş olanıdır. PET’de görüntüleme maddesi olarak radyoaktif bileşikler (radyofarmosötik) veya bir radyoaktif maddenin kendisi (radyonüklid), görüntülenecek yere uygun bir şekilde verilerek görüntüleme yapılır. Radyonüklidlerin üretildiği hızlandırıcı, genellikle bir siklotron, görüntülemenin yapıldığı alet ise PET tarayıcısıdır. PET, daha çok kanser hastalarının teşhisinde, kanserin evresinin saptanmasında ve tedavisinin takibinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra bazı santral sinir sistemi ve kalp-damar sistem hastalıklarının teşhisinde de PET tetkikinden faydalanılmaktadır.



Şekil 2.9 Pozitron Yayınlamalı Tomografi (PET) cihazının genel görünümü

Son yıllarda ülkemizde teşhis amacıyla nükleer tıpta kullanılmakta olan PET görüntüleme tekniği yaygınlaşmaktadır. Bu görüntüleme tekniği özellikle tekrarlanan kanser vakalarının erken teşhisi başta olmak üzere beyin ve kalp ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır. Günümüzde özellikle PET uygulamaları için ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O pozitron yayan izotopları üretilmektedir. Ancak son zamanlarda ise ^{55}Co , ^{60}Cu , ^{61}Cu , ^{64}Cu ve ^{67}Cu gibi diğer kısa yarı ömürlü radyoizotopların kullanılmasına ilişkin çalışmalar da artarak devam etmektedir. Bu radyoizotoplardan ^{55}Co , kanser tedavisinde kullanılan ilaçların etiketlenmesinde ve ayrıca PET tekniği ile kalp ve beynin görüntülenmesinde; ^{60}Cu ve ^{61}Cu radyoizotopları tümörün yapısında bulunan

hipoksik dokular ile beyin ve kalbin görüntülenmesinin yanı sıra protein ve peptitlerin etiketlenmesinde; ^{64}Cu beyin ve kalp perfüzyon çalışmalarında PET tekniği ile görüntüleme ve ^{67}Cu ' nun ise endoterapi amaçlı kullanılmasına ilişkin çalışmalar devam etmektedir. ^{57}Co ise gama spektrometreleri ve SPECT (tek foton emisyon tomografisi) sistemleri için kalibrasyon kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılan bir radyoizotoptur.

Nükleer tıp alanında kullanılan bazı radyoizotopların yarı ömürleri ve uygulama alanları Çizelge 2.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Nükleer Tıp alanında kullanılan bazı radyoizotoplar

İZOTOP	YARI ÖMÜR	UYGULAMA ALANLARI
^{72}As	26 saat	Düzlemsel görüntüleme, SPECT veya PET uygulaması.
^{74}As	17,8 gün	Pozitron yayımlayıcı izotop.
^{198}Au	2,69 gün	Karaciğer incelemesi, prostat ve beyin kanseri tedavisi
^{75}Br	98 dakika	Düzlemsel görüntüleme, SPECT veya PET uygulaması.
^{77}Br	57 saat	Hücre dışı sıvı miktarı tayini.
^{11}C	20,3 dakika	Beyin fonksiyonlarının incelenmesinde kullanılan PET uygulamalarında.
^{14}C	5730 yıl	Göğüs kanseri tümörlerinin belirlenmesi.
^{47}Ca	4,7 gün	Kalsiyum metabolizması.
^{51}Cr	27,7 gün	Kan hacminin tayini, kırmızı yuvarların ömrünün tayini, dalak sintigrafisi.
^{61}Cu	3,35 saat	Düzlemsel görüntüleme, SPECT veya PET uygulaması.
^{62}Cu	4,7 dakika	Pozitron yayımlayıcısı, beyin ve kalpteki kan akışının izlenmesi
^{64}Cu	12,7 saat	Hormon metabolizmasında yağların sindirimini incelenmesi.

Çizelge 2.1. (devam)

^{67}Cu	61,9 saat	Kanser teşhis ve tedavisi.
^{18}F	110 dakika	Beyin ile ilgili uygulamalarda iz izotopu olarak.
^{66}Ga	9,49 saat	Pozitron yayımlayıcı.
^{123}I	13,1 saat	Beyin, tiroid, böbrek ve kalp görüntüleme.
^{124}I	4,17 gün	Tiroid ve karaciğer tümörlerinin belirlenmesi.
^{111}In	2,81 gün	Kalp hastalıklarının ve beyaz kan hücrelerinin görüntülenmesi, tümörlerin teşhis edilmesi.
^{63}Zn	38,47 dakika	Beyin ve kalpteki kan akışının izlenmesi.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Nükleonlarla oluşturulan reaksiyon tesir kesitleri özellikle nükleer fizikte ve radyoizotop üretim programlarında önemli yer tutar. Bu tür reaksiyonların oluşturulması sırasında materyallerin yapısını etkileyecek değişimler oluşabilmektedir. Bu problemlerin öneminin anlaşılabilmesi ve sorunların giderilebilmesi için tesir kesitlerinin ve yayınlanma spektrumlarının deneysel olarak ölçülmesi ve önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için de teorik hesaplamaların yapılabilmesi gerekir. Örnek olarak, gönderilen parçacığa göre hangi enerji aralığında maksimum tesir kesiti olabileceğini, ya da gönderilen parçacığın enerjisinin hangi aralıkta olması gerektiğini görmek için bu hesaplamaların önemi ortaya çıkmaktadır. Diğer bir açıdan da, nükleer fiziğin sahip olduğu temel problemlerinin aşılabilmesi için bu modellerin nükleer reaksiyonlarda oynadığı rolü teorik olarak kestirmek ve deneysel olarak gözlemek gereklidir. Nükleer reaksiyonların daha detaylı olarak enerji bağımlılığı bilinmediğinden çok sayıdaki farklı enerjiler için tesir kesitlerinin ve spektral yayınlanma şeklinin incelenmesi önemlidir. Örneğin, reaktörlerde üretilen geçici çekirdekler genellikle kısa yarı ömürlüdür. Dolayısıyla, bu çekirdeklerin tesir kesitlerinin ve yayınlanma spektrumlarının doğrudan ölçülmesi pek mümkün olamamaktadır. Bu sebeple, zaman kazanılması açısından yapılacakların en önemlisi bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanmasıdır.

Nükleer fizik biliminin uygulama alanları hayatımızda önemli yerlere sahip olması nedeniyle bu bilim üzerine araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Teoriksel çalışmaların da katkısıyla (önceden tahmin etme, beklenen değerlerin bilinmesi ve deneysel çalışmalara yön verme gibi), nükleer uygulama alanları artmakta ve hayatımızı kolaylaştırmaya devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında, denge-öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$, $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$, $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$, $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$, $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$, $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$, $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$, $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$, $^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$, $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$, $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ reaksiyonları yoluyla üretilebilen ^{119}Sb , ^{169}Yb , ^{61}Cu , ^{124}I , ^{111}In , ^{18}F , ^{64}Cu , ^{66}Ga , ^{74}As , ^{198}Au ve ^{62}Cu medikal radyoizotopların üretim tesir kesitleri

hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, literatürde güvenilirliği kabul edilmiş olan ALICE/ASH ve TALYS 1.2 bilgisayar programları kullanılmıştır. Tezde ele alınan her bir reaksiyon için deneysel tesir kesiti verileri Uluslar arası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA)'nun EXFOR kütüphanesinden alınmıştır. ALICE/ASH ve TALYS 1.2 bilgisayar programları ile yapılan tesir kesiti hesapları, EXFOR kütüphanesinden alınan deneysel tesir kesiti verileri ile karşılaştırılmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 bilgisayar programlarının özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

3.1. ALICE/ASH Bilgisayar Programı

ALICE/ASH (Broeders, 2006) programı ALICE program ailesinin geliştirilmiş ve değiştirilmiş bir sürümüdür. ALICE/ASH-2006 programı, 300 MeV' lik gelme enerjisine kadar, uyarılma fonksiyonu, ikincil parçacıkların açısal dağılımı ve enerjisi hesaplamaları için uygulanabilir. Başlangıç exciton sayısı $n_0 = 3$ olarak alınır ve n -exciton durumundaki ν tipi parçacık sayısı X_ν^n , gelen nötron için,

$${}_3X_n = 2 \frac{(\sigma_{np} / \sigma_{nn})Z + 2N}{2(\sigma_{np} / \sigma_{nn})Z + 2N}, \quad (3.1)$$

$${}_3X_p = 2 - {}_3X_n$$

ve gelen proton için

$${}_3X_p = 2 \frac{(\sigma_{pn} / \sigma_{pp})Z + 2N}{2(\sigma_{pn} / \sigma_{pp})Z + 2N}, \quad (3.2)$$

$${}_3X_n = 2 - {}_3X_p$$

şeklindedir.

3.2. TALYS 1.2 Bilgisayar Programı

TALYS 1.2 (Koning, Hilaire ve Duijvestijn, 2009), Linux işletim sisteminde çalışan ve fortran programlama diline sahip, nükleer reaksiyonların analizi ve tahmini için oluşturulmuş bir bilgisayar programıdır. Simülasyon reaksiyonlarda, nötron, proton, döteryum, trityum, 3-He, α parçacıkları ve gama ışınları 1 keV – 200 MeV enerji bölgesinde çalışabilir. Hedef çekirdek kütleleri için 12 ve daha ağır kütleli olması şarttır (Koning ve Duijvestijn, 2007).

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 katlı diferansiyel tesir kesitleri,
- Tekli ya da çoklu emisyon tesir kesitleri,
- Ürün çekirdeklerin oluşum tesir kesitleri,
- Ürün çekirdeklerin oluşum tesir kesiti sonuçları

elde edilebilir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada; $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$, $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$, $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$, $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$, $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$, $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$, $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$, $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$, $^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$, $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$, $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ reaksiyonlarının tesir kesitleri hesaplandı. Hesaplamalar ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları kullanılarak yapıldı. ALICE/ASH programı ile yapılan hesaplamalarda tesir kesitlerinin seviye yoğunluk parametresine olan bağılılığı da incelendi. Her bir reaksiyon için ALICE/ASH programının kabul ettiği varsayılan $a=A/9$ değerinin yanı sıra $a=A/18$ değeri için de hesaplamalar yapıldı. Bu hesaplamalarda, Hibrid Model ve Geometri Bağımlı Hibrid Model öngörülleri dikkate alındı. Elde edilen tüm teorik sonuçlar literatürden alınan deneysel verilerle karşılaştırıldı.

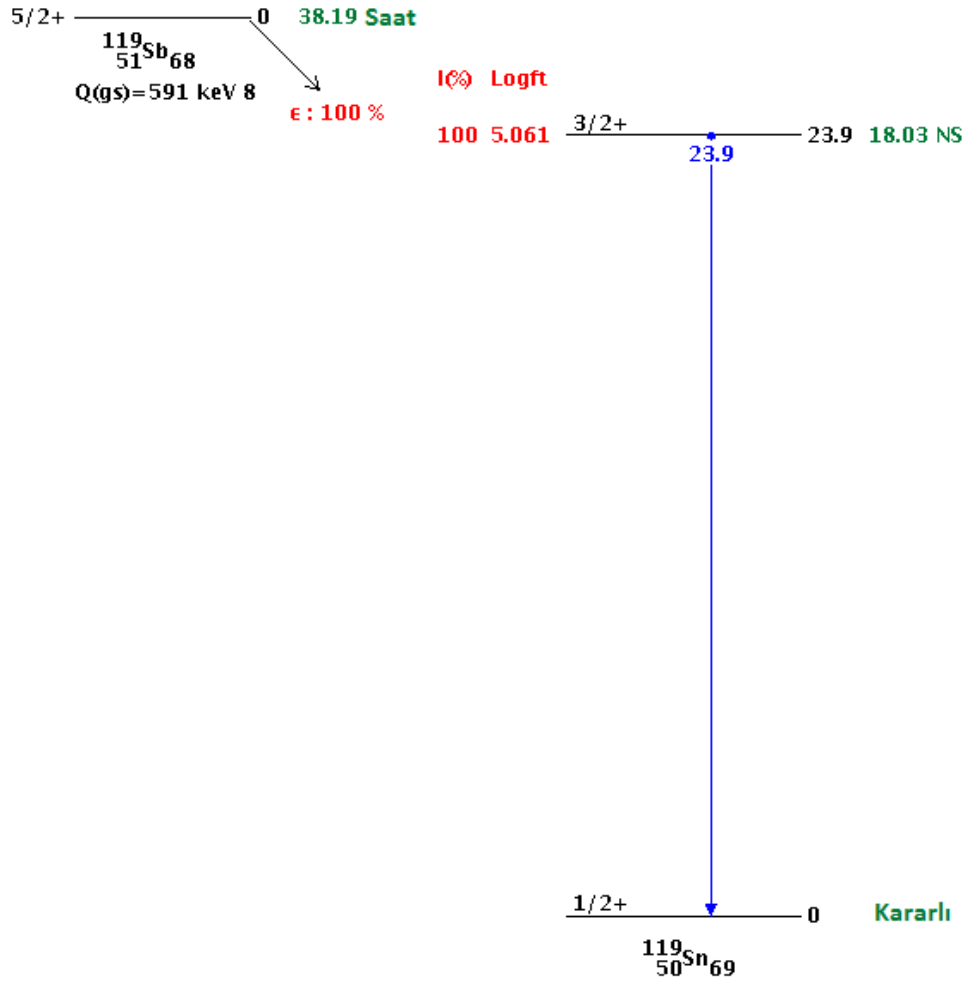
4.1. $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 8,9 saat olan ^{119}Sb çekirdeği, yüksek dozda radyasyon ile tümör hücreleri üzerinde kanser tedavisine olanak sağlar. Bu tedavide aynı zamanda normal dokudaki hasar en aza indirgenir. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{119}Sn izotopuna bozunur.

Çizelge 4.1 $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ Reaksiyonu' nun Q değeri ve eşik enerjisi

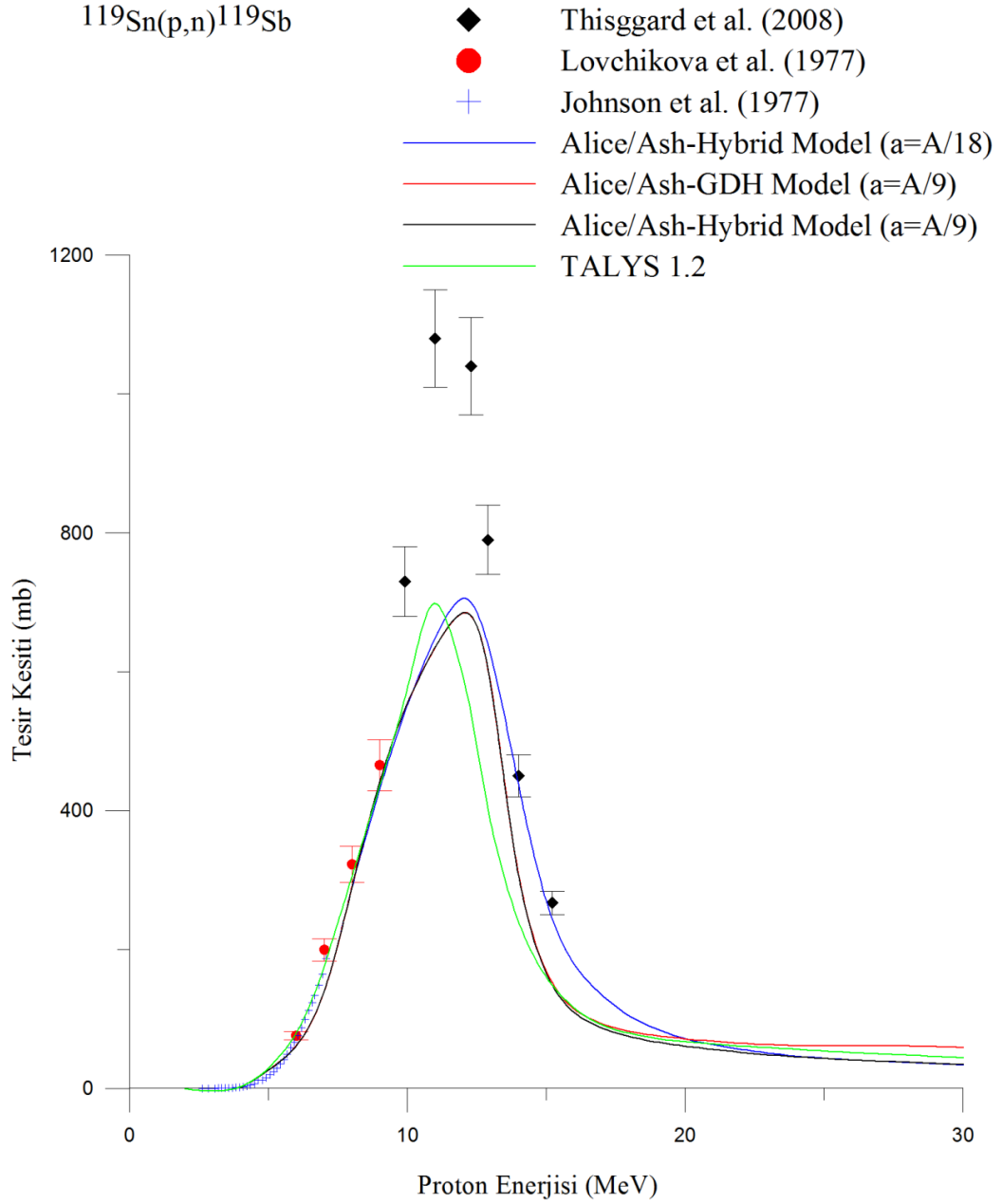
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{119}Sn	p	^{119}Sb	n	-1,373	1,384

^{119}Sb izotopunun bozunum şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 ^{119}Sn radyoizotopunun bozunum şeması

$^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesisir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS1.2 ile yapılan hesaplamalar birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Ve deneysel sonuçlarla da iyi bir uyum sağlanmıştır. Maksimum tesisir kesitine çıktığında ALICE/ASH ve TALYS 1.2 ile yapılan teorik hesaplamalar, deneysel verilere göre biraz düşük sonuçlar vermiştir. Ancak Şekil 4.2'

de görüldüğü gibi teorik hesaplamalar, spektrum olarak deneysel veriler ile gayet uyumlu sonuçlar göstermiştir. Edinilen bilgilerin değerlendirilmesi ile ^{119}Sb üretimi için en uygun enerji aralığının 6-13 MeV arası olduğu görülmüştür. Bu da ^{119}Sb 'nin düşük enerjili bir siklotronda elde edilebilir olduğunu göstermiştir.

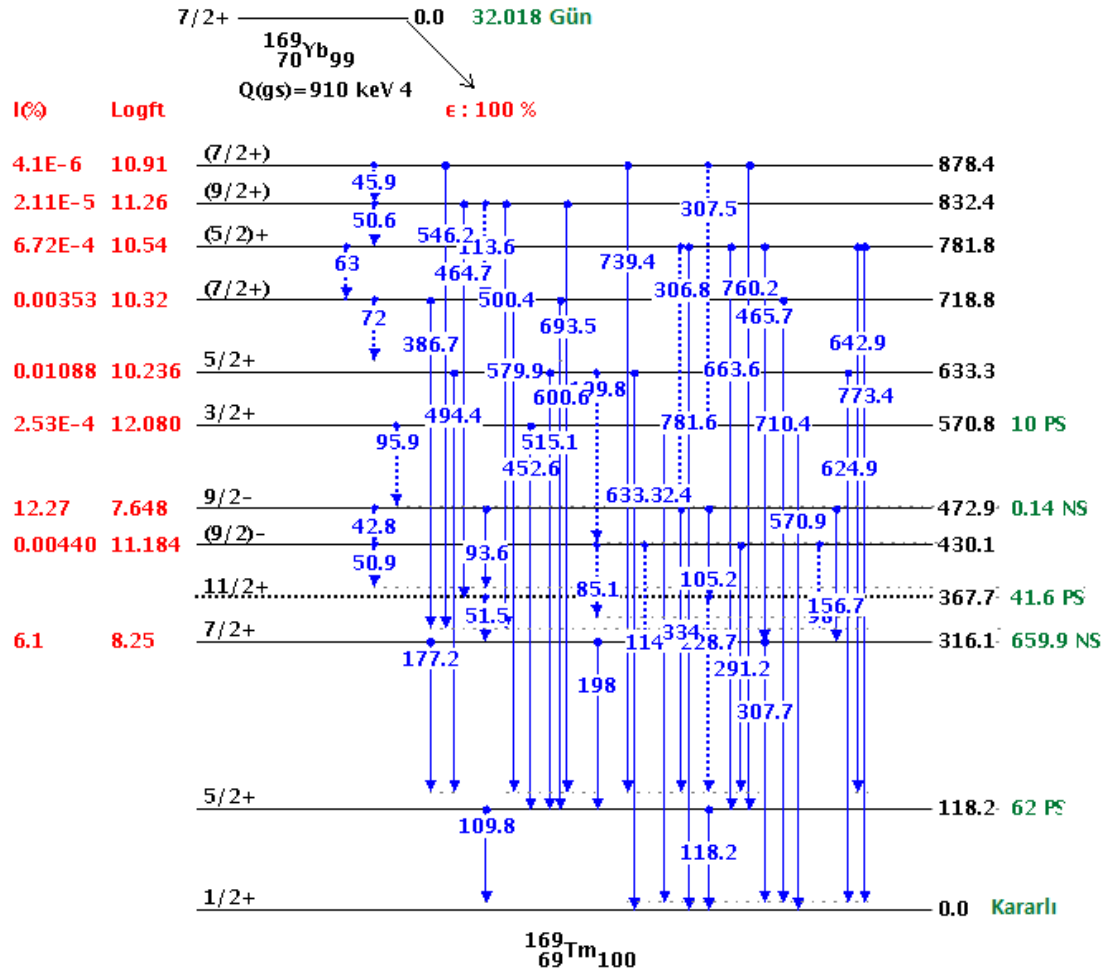
4.2. $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 32.018 gün olan ^{169}Yb çekirdeği , beyin omurilik sıvısı incelemelerinde ve gerekli olan yüksek kalitede röntgen elde edilmesinde kullanılır. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{169}Tm izotopuna bozunur.

Çizelge 4.2 $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{169}Tm	p	^{169}Yb	n	-1,692	1,702

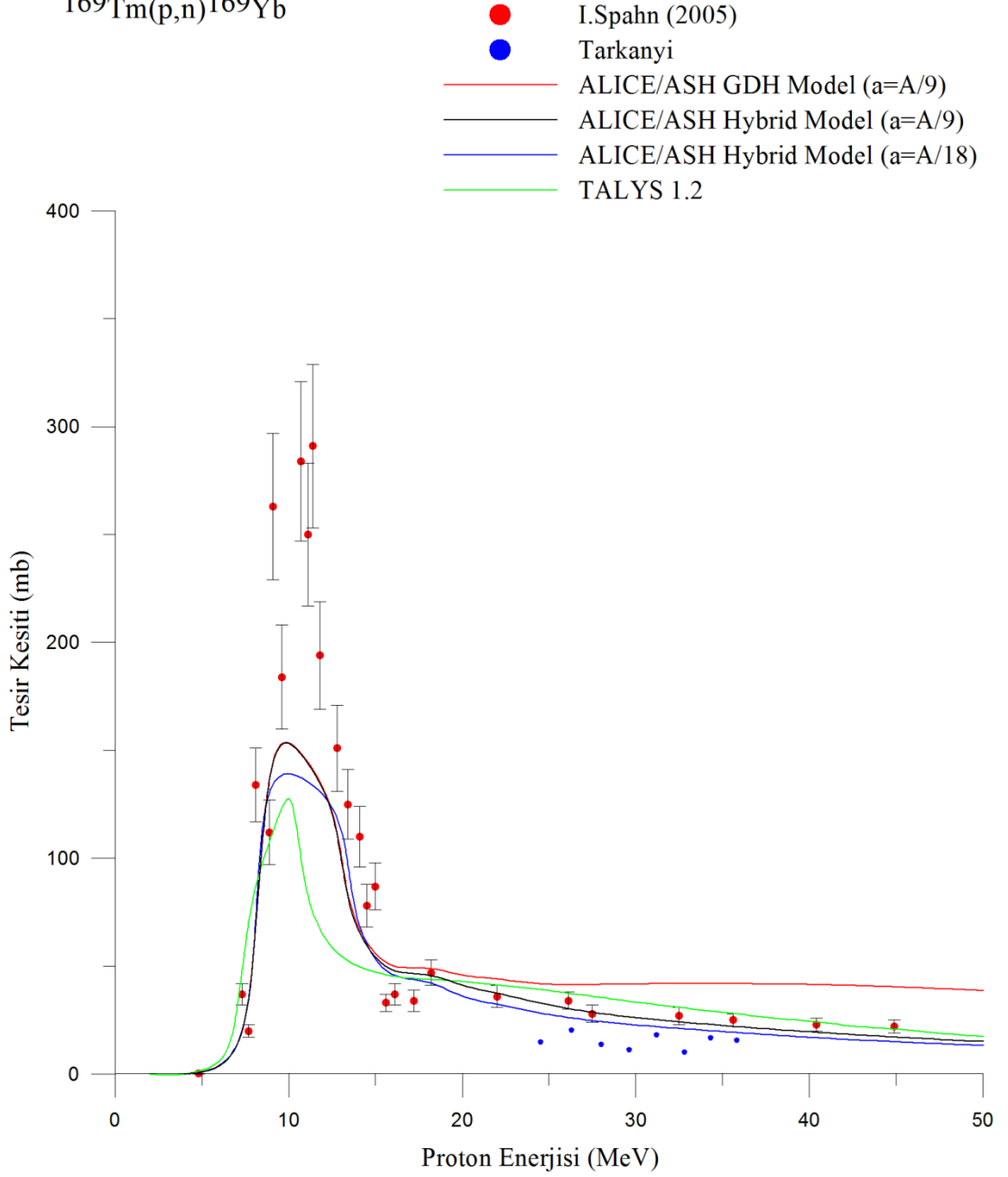
^{169}Yb izotopunun bozunum şeması Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 ^{169}Yb radyoizotopunun bozunum şeması

$^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.4’ de gösterilmiştir.

$^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$



Şekil 4.4 $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gözlenmesine karşın, ALICE/ASH GDH (Geometri Bağımlı Hibrid) Model hesabı yüksek enerjilerde diğer hesaplamalara göre az da olsa yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. Maksimum tesir

kesitinde ise hesaplamalar, I.Spahn (2005) deneysel verileri ile spektrum olarak uyuşsa da daha düşük sonuçları göstermiştir. ^{169}Yb radyoizotopunun üretimi için en uygun enerji aralığı 8-13 MeV aralığında olduğundan orta ölçekli bir siklotronda gerçekleştirilebileceği görülür.

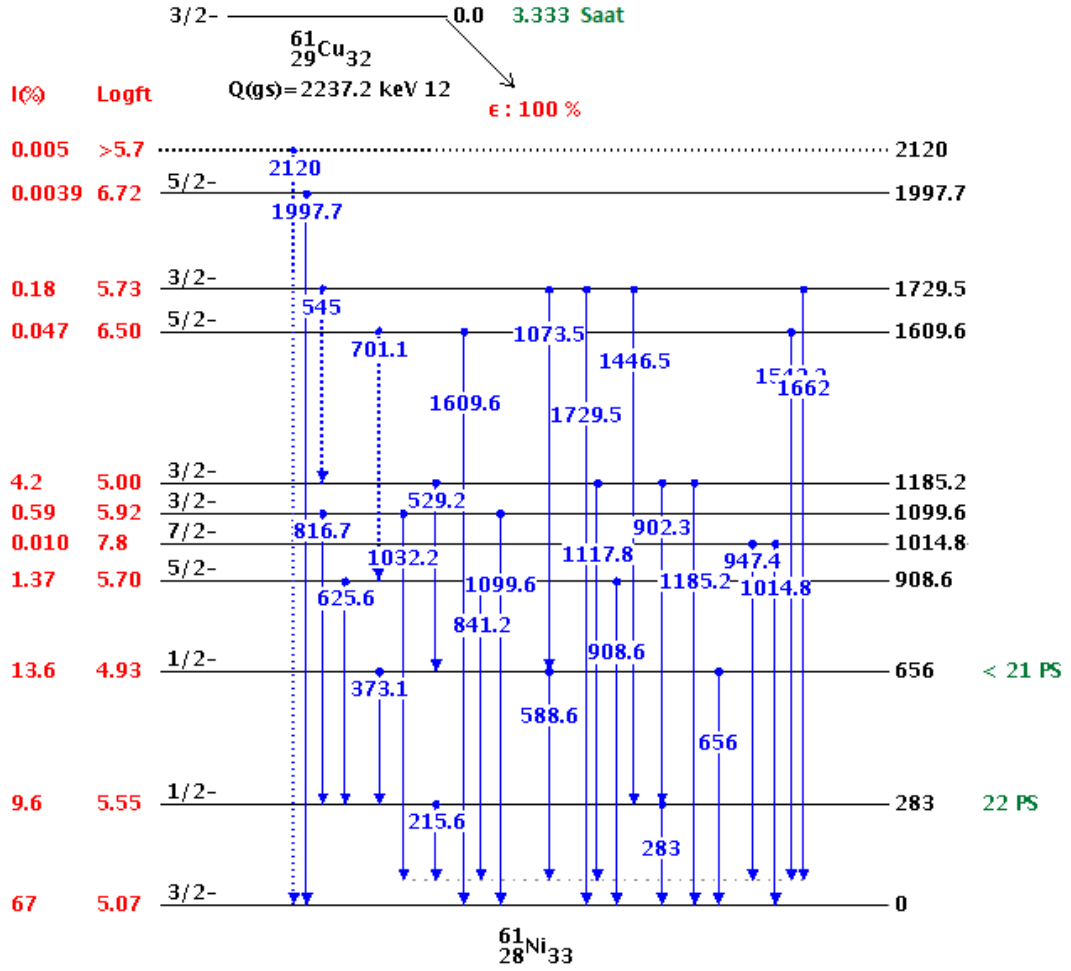
4.3. $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 3.33 saat olan ^{61}Cu çekirdeği SPECT veya PET uygulamaları ile birlikte düzlemsel görüntüleme için kullanılan bir izotoptur. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{61}Ni izotopuna bozunur.

Çizelge 4.3 $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

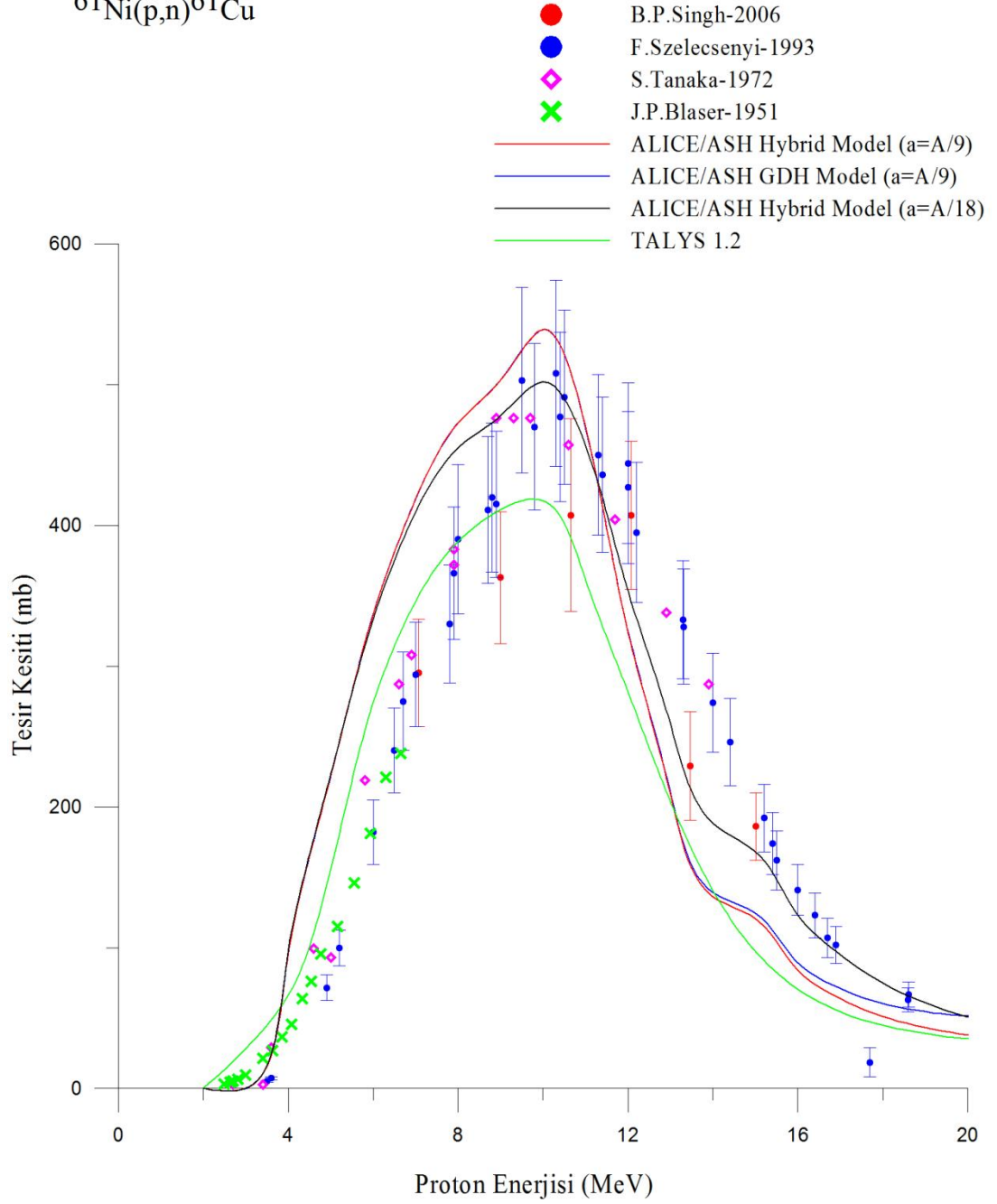
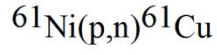
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{61}Ni	p	^{61}Cu	n	-3,019	3,069

^{61}Cu radyoizotopunun bozunum şeması Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 ^{61}Cu radyoizotopunun bozunum şeması

$^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.6' da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. TALYS 1.2 teorik hesabı Şekil 4.6' da görüldüğü gibi ALICE/ASH hesaplamalarına göre biraz daha düşük sonuçları göstermiştir. ^{61}Cu

radyoizotopunun üretimi için en uygun enerji aralığının 8-12 MeV aralığında olduğu ve bununda orta ölçekli bir siklotrona gerçekleştirilebileceği görülmektedir.

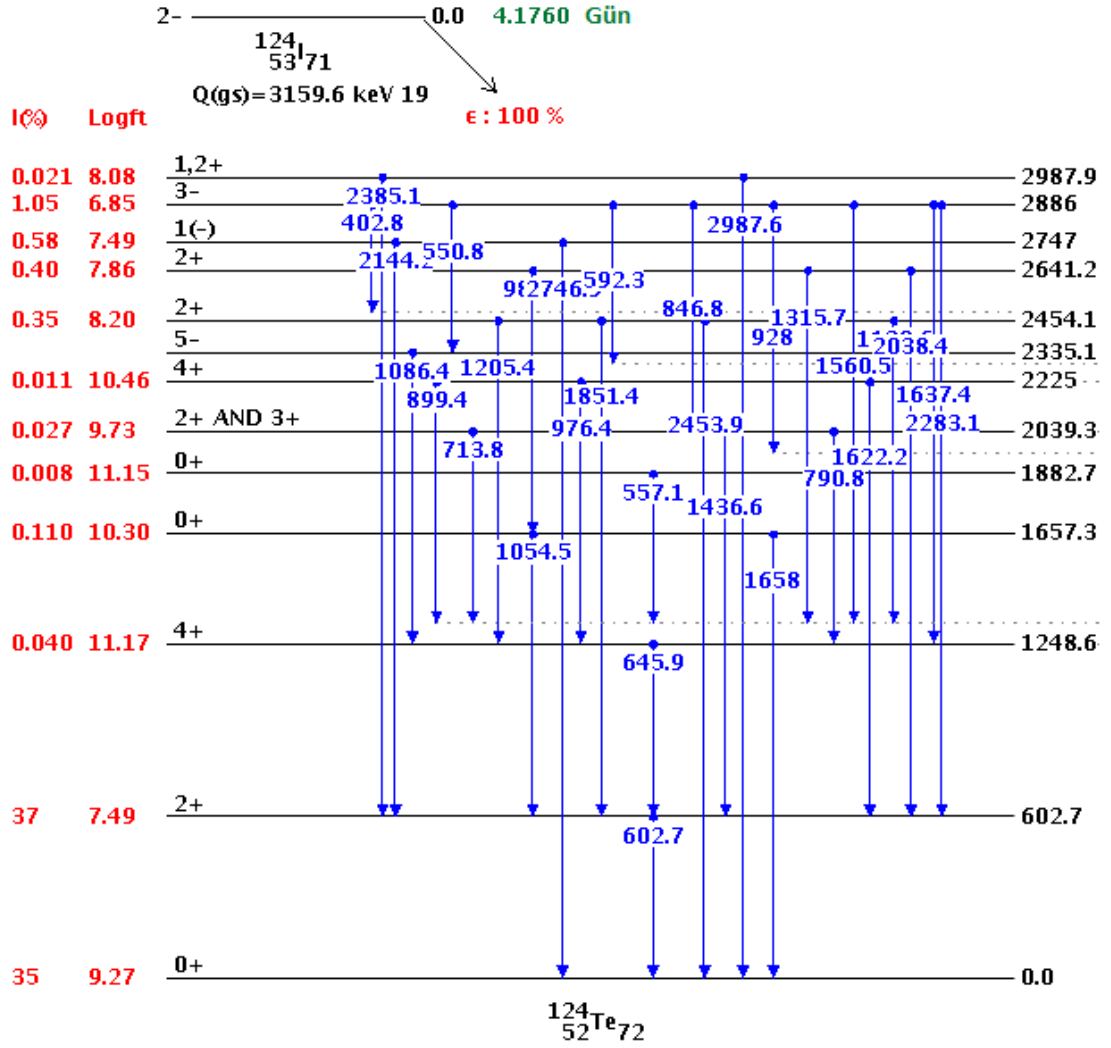
4.4. $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu

^{124}I radyoizotopu yarı ömrü 4,17 gün olan pozitron yayınlıyıcı bir izotopdur. Troid ve karaciğer tümörlerinin belirlenmesinde, kan hacminin tayininde kullanılır. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{124}Te izotopuna bozunur.

Çizelge 4.4 $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

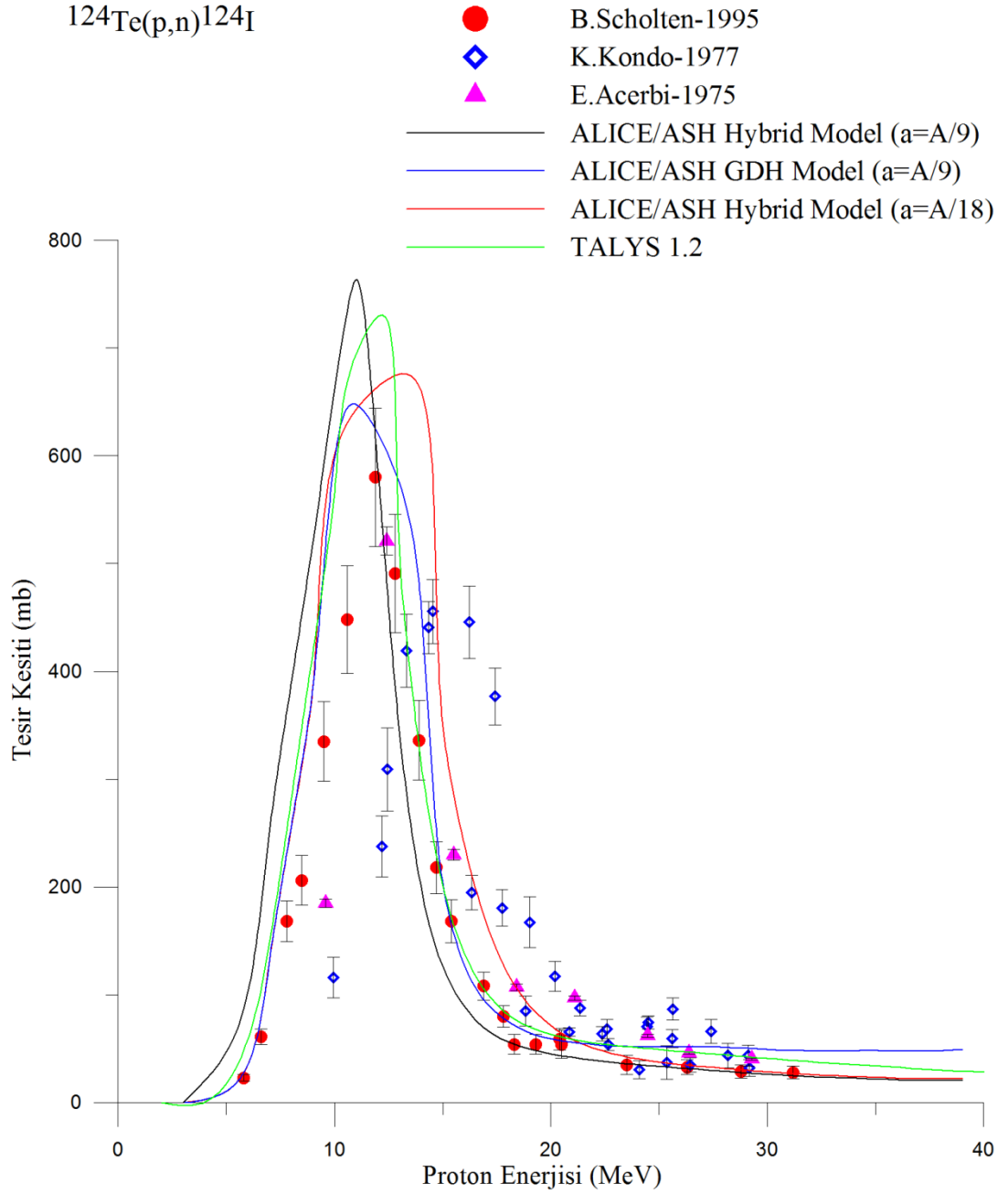
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{124}Te	p	^{124}I	n	-3,941	3,973

^{124}I radyoizotopunun bozunum şeması Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 ^{124}I radyoizotopunun bozunum şeması

$^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.8' de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Teorik hesaplamalar, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlamakla birlikte özellikle 15-30 MeV enerjileri arasında teorik hesapların ve deneysel sonuçların birbirleri ile uyumunun daha iyi olduğu gözlenmiştir. ^{124}I

izotopunun üretimi için en uygun enerji aralığı 8-12 MeV aralığında olduğundan bununda orta ölçekli bir siklotronda üretilebileceği görülmektedir.

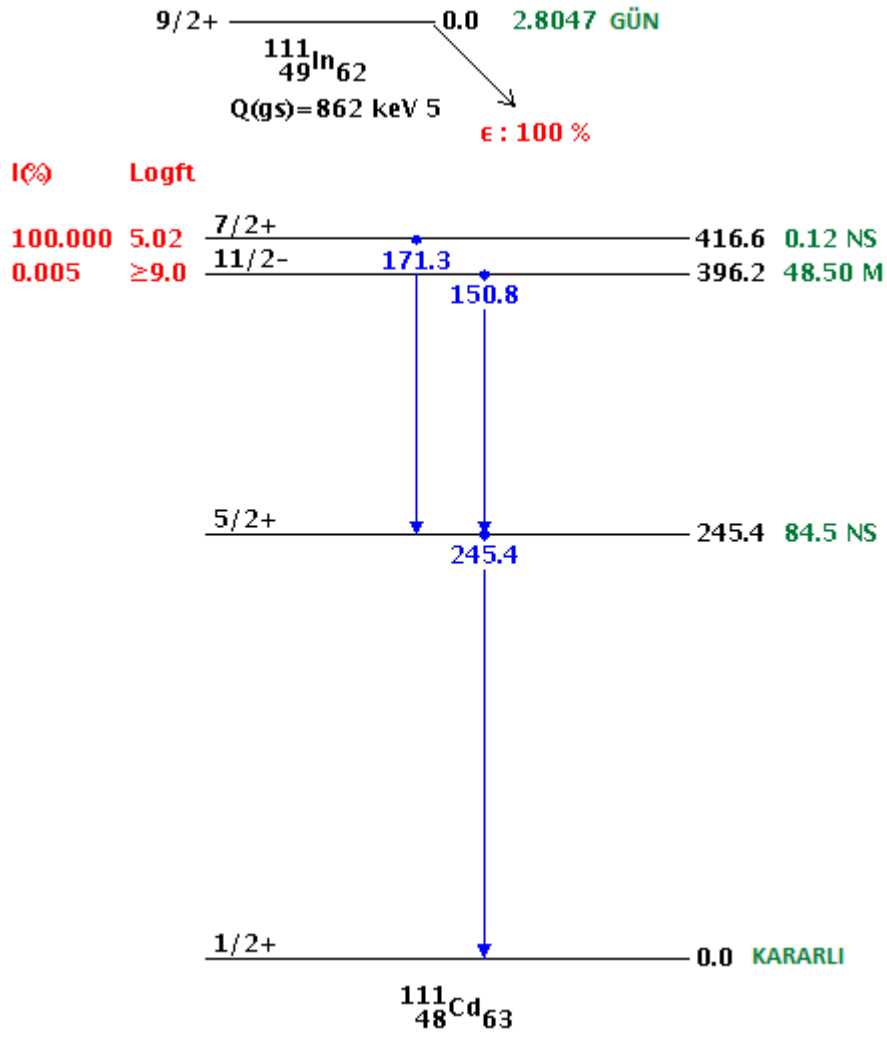
4.5. $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 2,8 gün olan ^{111}In radyoizotopu, kalp hastalıklarının ve beyaz kan hücrelerinin görüntülenmesinde, tümörlerin teşhisinde kullanılır. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{111}Cd izotopuna bozunur.

Çizelge 4.5 $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

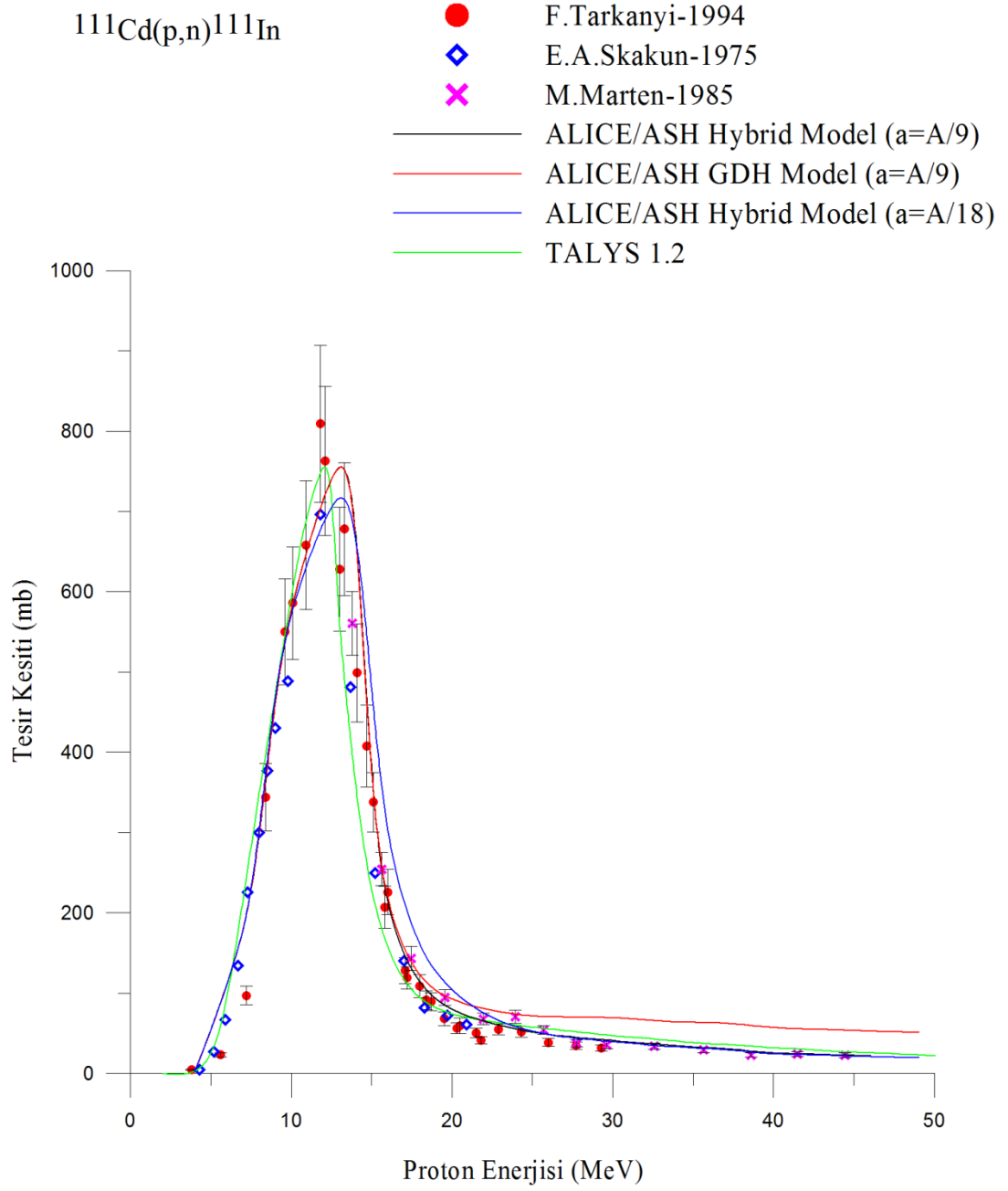
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{111}Cd	p	^{111}In	n	-1,644	1,659

^{111}I radyoizotopunun bozunum şeması Şekil 4.9' da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 ^{111}In radyoizotopunun bozunum şeması

$^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.10' da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesisir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar, birbirleri ile aynı olacak derecede yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca teorik hesaplamalar tüm spektrum boyunca deneysel sonuçlar ile birebir uyum içerisindedir. ^{111}In üretimi için

en uygun proton enerji aralığı 8-18 MeV aralığında olduğu için orta ölçekli bir siklotronda üretilebileceği görülmektedir.

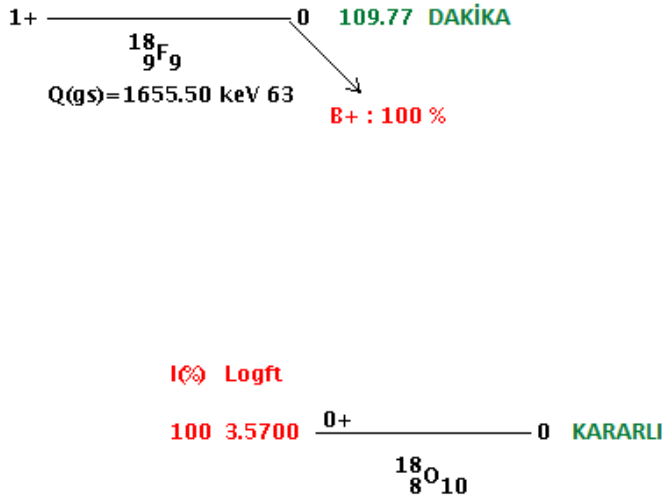
4.6. $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 110 dakika olan ^{18}F çekirdeği, beyin ile ilgili uygulamalarda izotopu olarak kullanılır. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{18}O izotopuna bozunur.

Çizelge 4.6 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

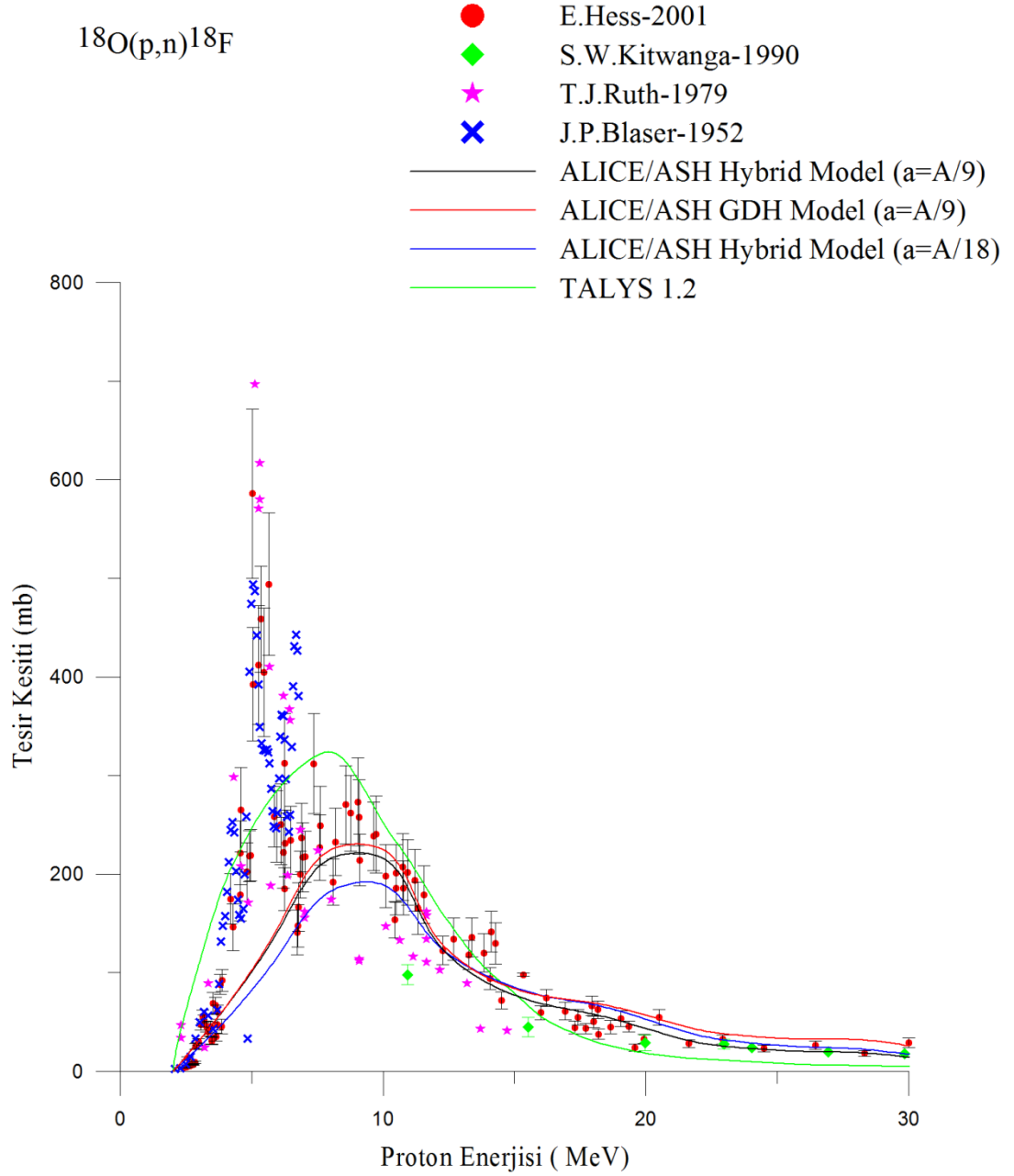
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{18}O	p	^{18}F	n	-2,437	2,574

^{18}F izotopunun bozunum şeması Şekil 4.11' de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 ^{18}F izotopunun bozunum şeması

$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR’ dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar birbirleri ile yakın ve deneysel verilerle de uyumlu bir sonuç elde etmiştir. Ortalama 2 – 10 MeV enerjileri arasında TALYS 1.2 programı ile hesaplanan veriler, ALICE/ASH hesaplarına göre biraz daha yüksek sonuçlar göstermiştir. Ayrıca, ortalama 5 – 7 MeV enerjileri arasında deneysel verilerin daha yüksek tesir kesitlerine ulaştığı da gözlenmiştir.

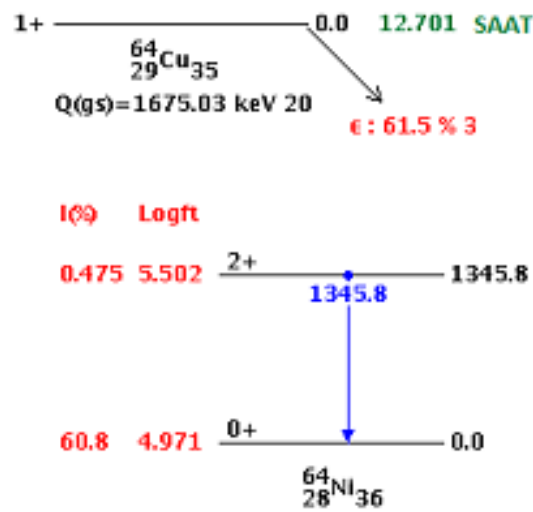
4.7. $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 12,7 saat olan ^{64}Cu izotopu hormon metabolizmasında, yağların sindiriminin incelenmesinde kullanılır. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{64}Ni izotopuna bozunur.

Çizelge 4.7 $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

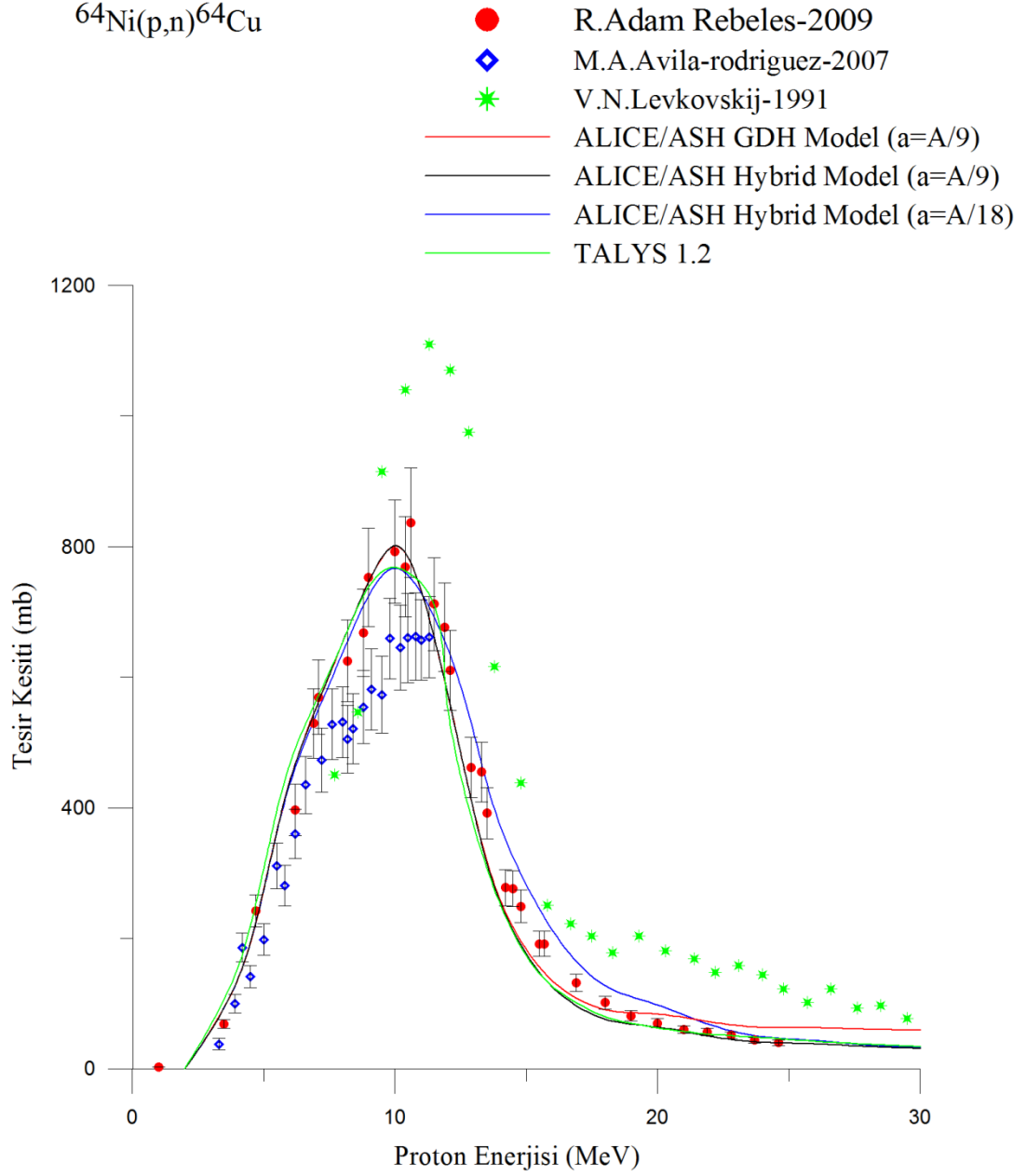
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{64}Ni	p	^{64}Cu	n	-2,457	2,496

^{64}Cu izotopunun bozunum şeması Şekil 4.13' de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 ^{64}Cu izotopunun bozunum şeması

$^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.14' de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile hesaplanan veriler birbirleri ile oldukça yakın sonuçlar göstermişlerdir. V.N. Levkovskij (1991) deneysel verilerine göre biraz daha düşük sonuçları gösteren teorik hesaplar, diğer deneysel verilerle iyi bir uyum elde etmiştir.

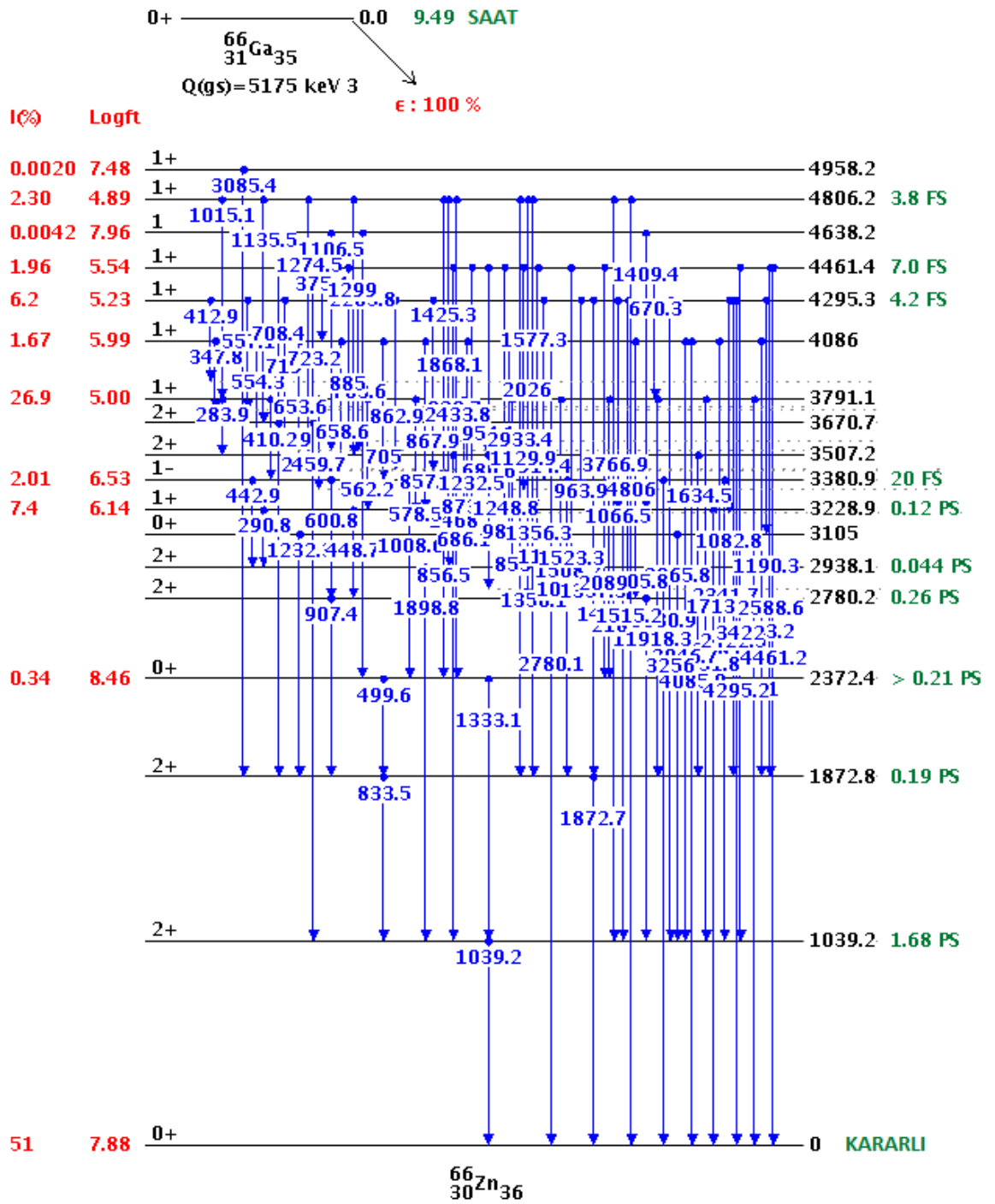
4.8. $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 9,49 saat olan ^{66}Ga bir pozitron yayınlıdır. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla kararlı olan ^{66}Zn izotopuna bozunur.

Çizelge 4.8 $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

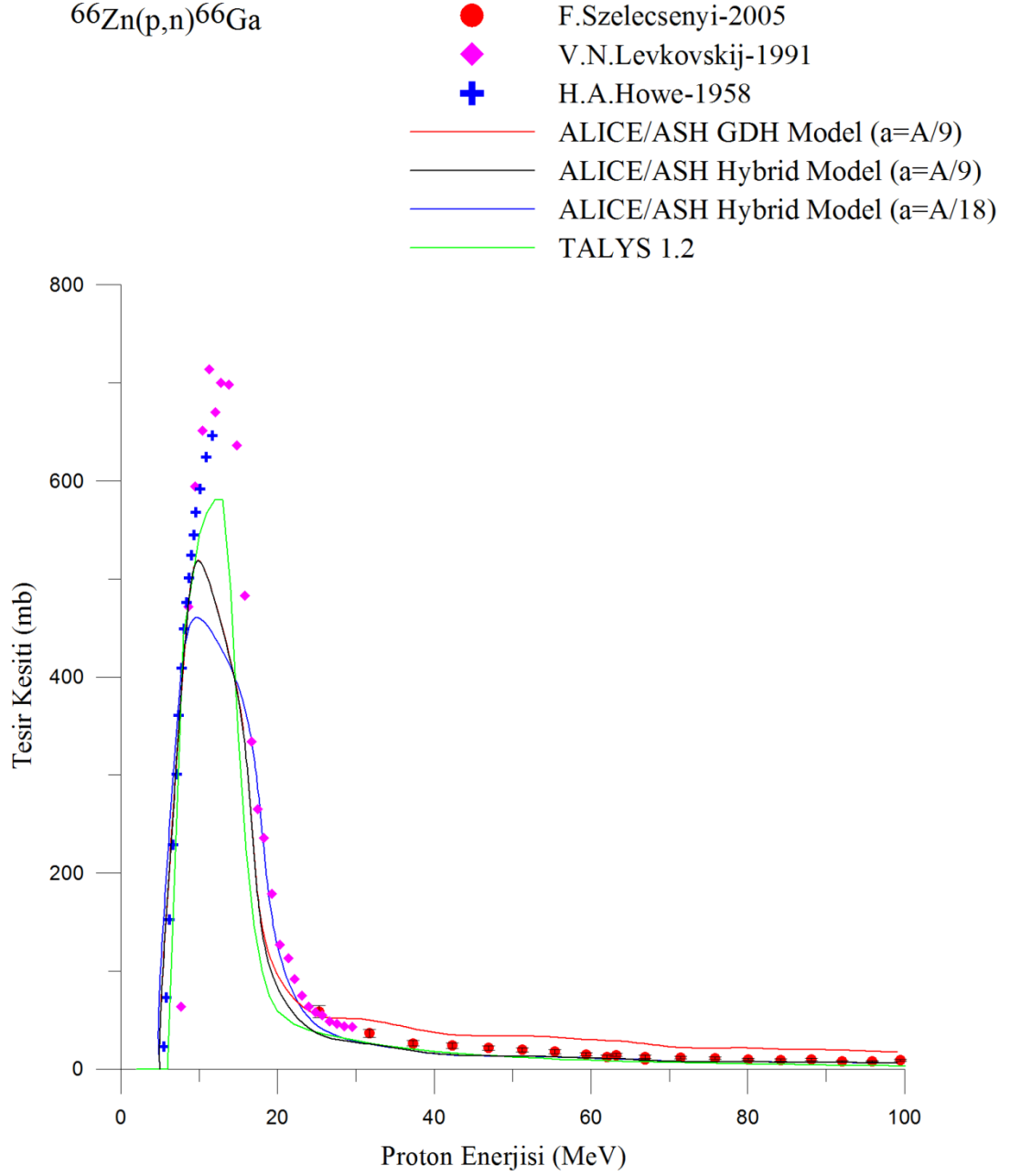
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{66}Zn	p	^{66}Ga	n	-5,957	6,048

^{66}Ga izotopunun bozunum şeması Şekil 4.15' da gösterilmiştir.



Şekil 4.15 ^{66}Ga izotopunun bozunum şeması

$^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.16' de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 $^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar birbirleri ile çok yakın sonuçlar göstermiştir. Tüm spektrum boyunca deneysel verilerle iyi bir uyum elde edilmiştir. Özellikle yüksek enerjilere çıkıldığında F. Szelecsenyi (2005) deneysel değerleri ile teorik değerler birbirine çok yakın sonuçlar göstermiştir.

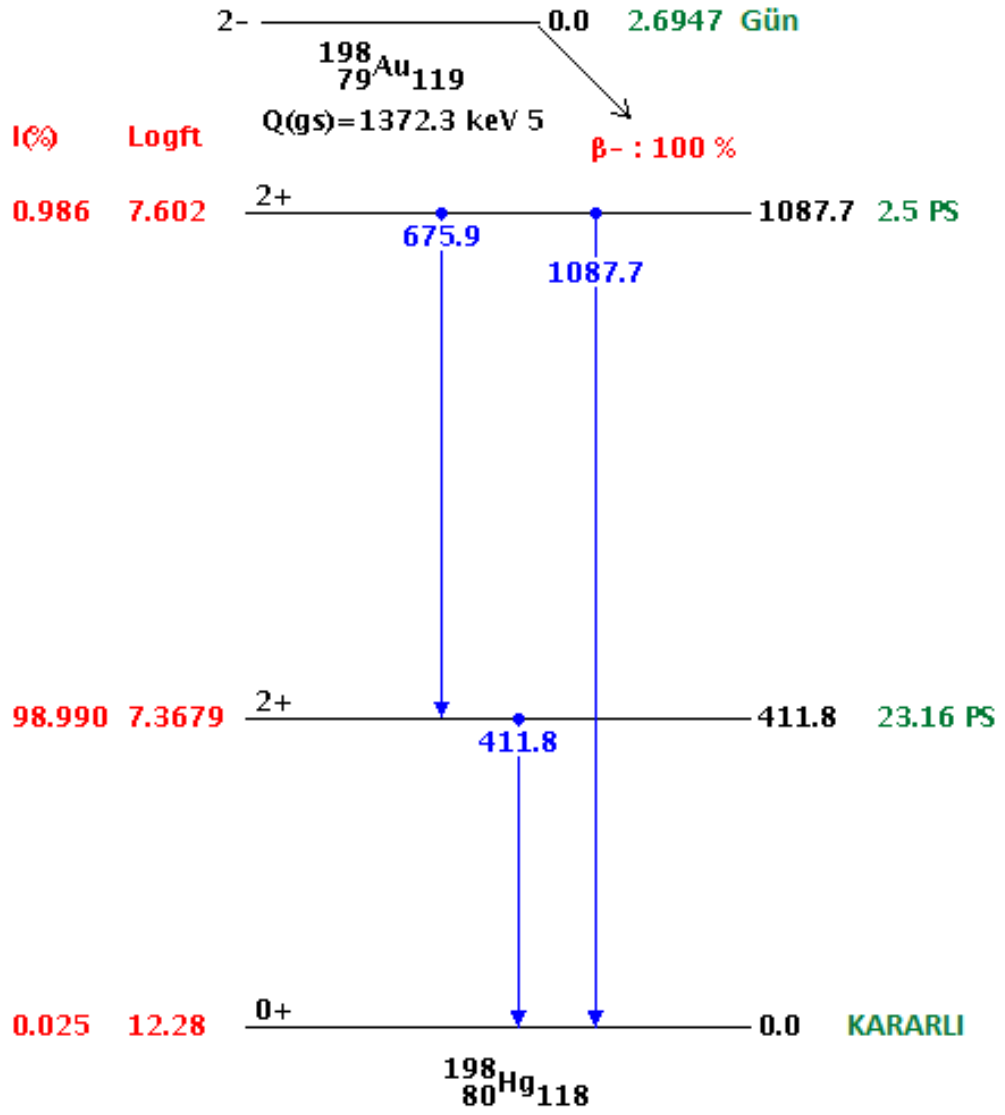
4.9. $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 2,69 gün olan ^{198}Au izotopu , karaciğer incelemelerinde , prostat ve beyin kanseri tedavilerinde kullanılır. β^- bozunumu ile ^{198}Hg izotopuna bozunur.

Çizelge 4.9 $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{198}Hg	n	^{198}Au	p	-0,589	0,593

^{198}Au izotopunun bozunum şeması Şekil 4.17' de gösterilmiştir.

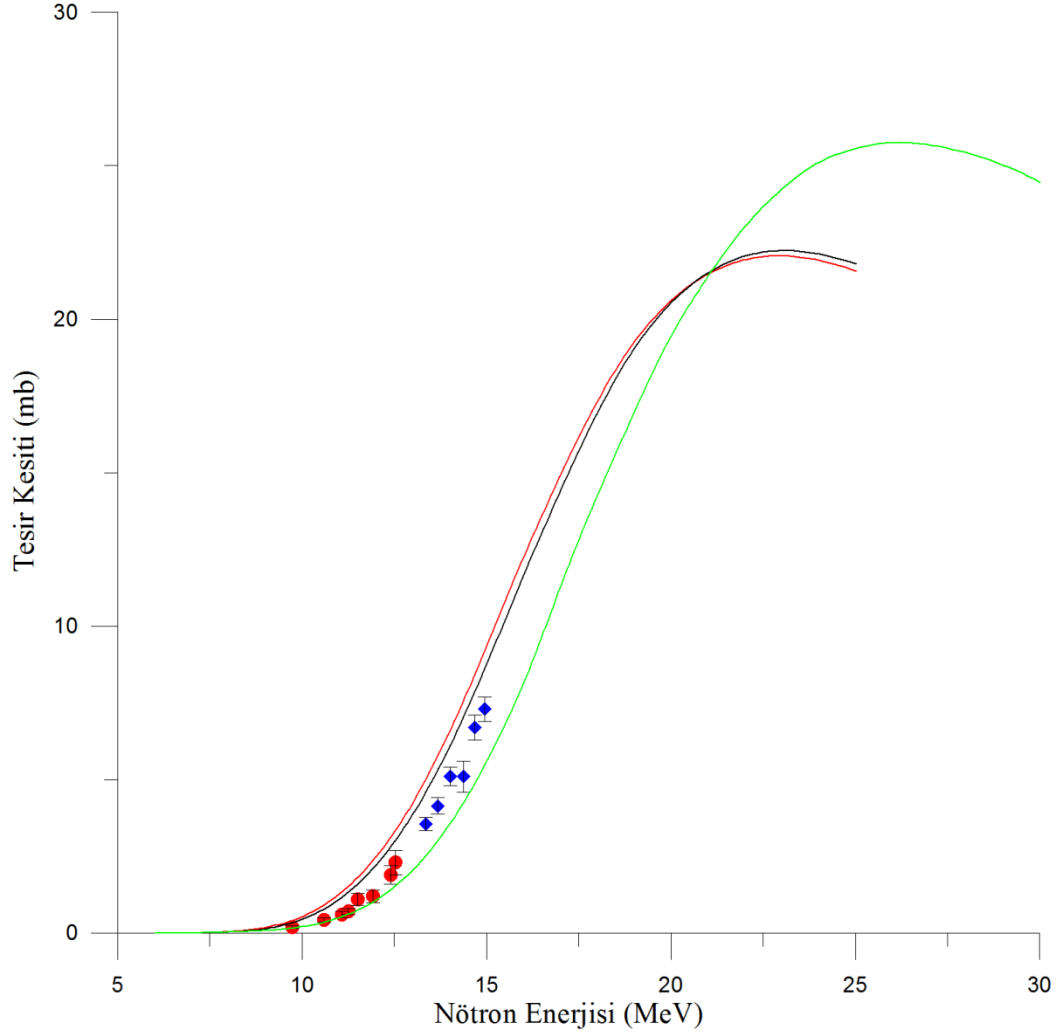


Şekil 4.17 ^{198}Au izotopunun bozunum şeması

$^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

$^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$

- ◆ Y.Kasugai-2001
- M.Al-Abyad-2006
- ALICE/ASH Hybrid Model (a=A/9)
- ALICE/ASH Hybrid Model (a=A/18)
- TALYS 1.2



Şekil 4.18 $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesisir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar birbirleri ile yakın sonuçlar göstermiştir. Teorik hesaplamalarla deneysel değerler birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir.

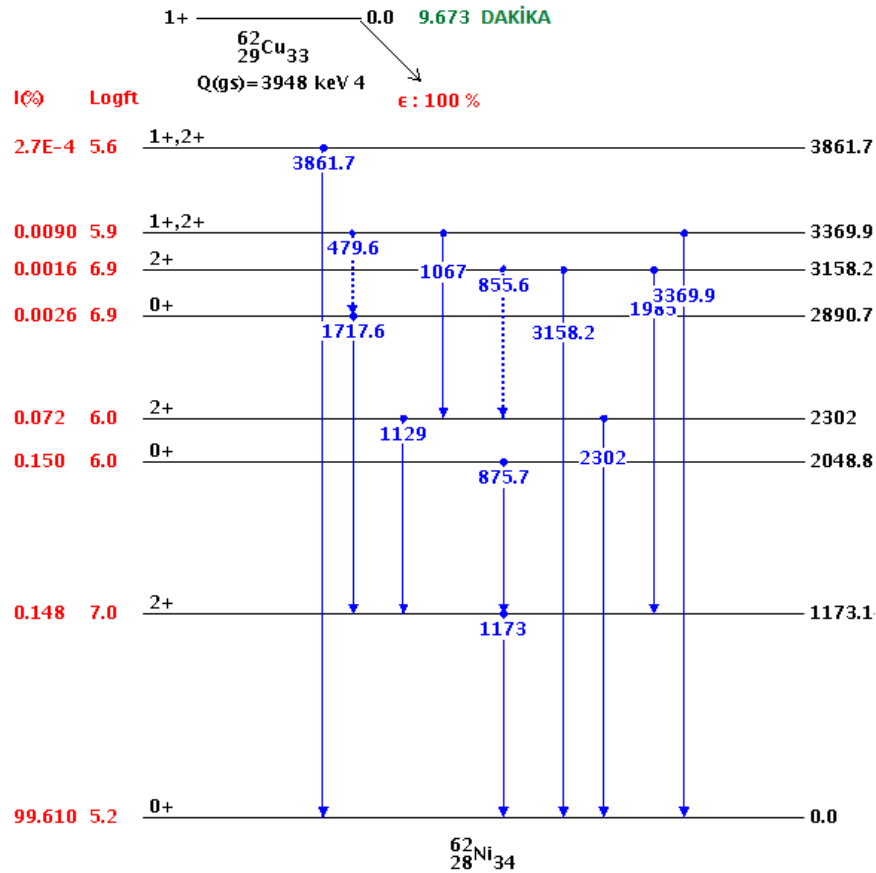
4.10. $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 9.67 dakika olan ^{62}Cu , pozitron yayınlıyıcı bir radyoizotop olup beyin ve kalpteki kan akışının izlenmesinde kullanılır. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla ^{62}Ni izotopuna bozunur.

Çizelge 4.10 $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

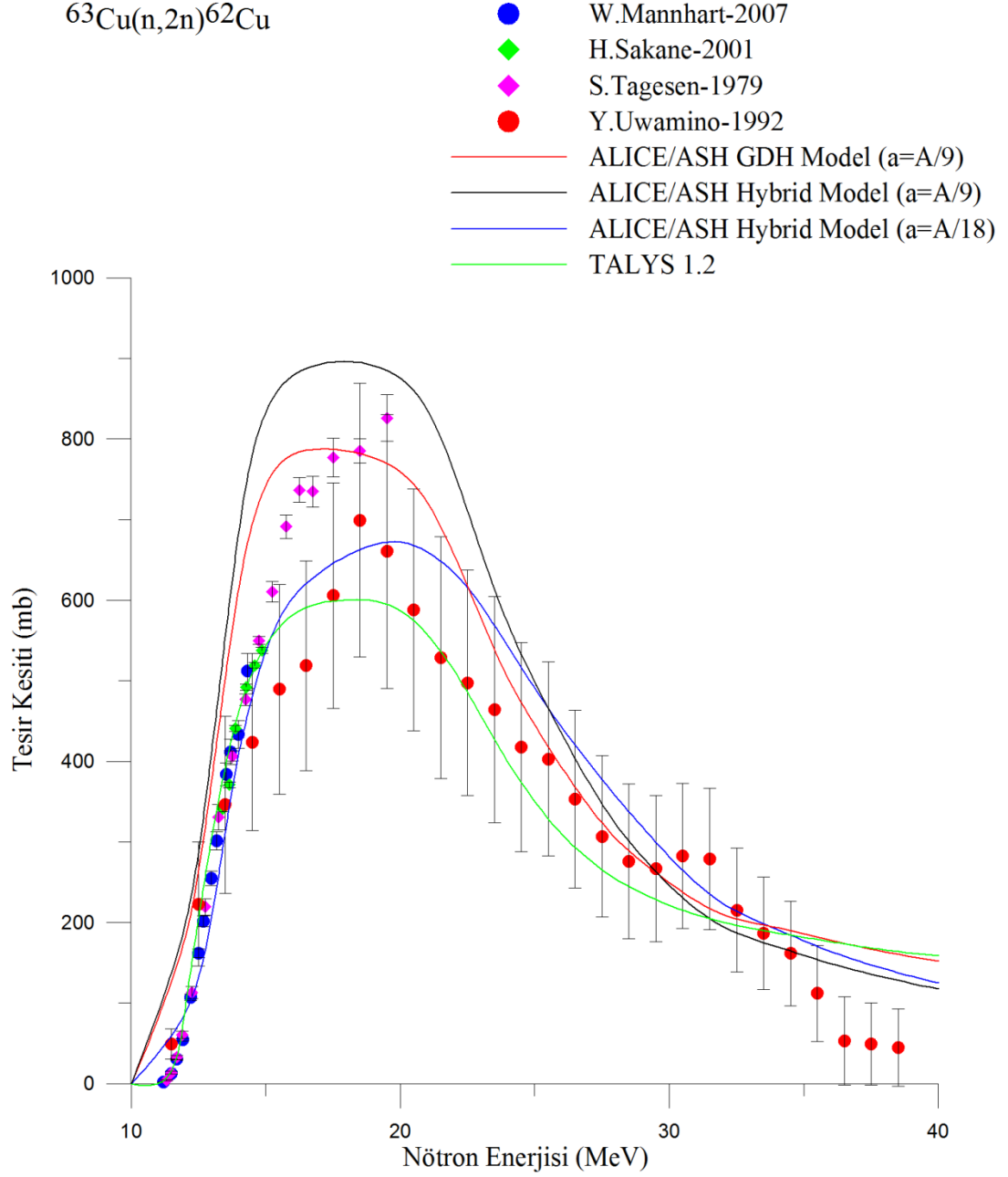
Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{63}Cu	n	^{62}Cu	2n	-10,853	11,027

^{62}Cu izotopunun bozunum şeması Şekil 4.19' de gösterilmiştir.



Şekil 4.19 ^{62}Cu izotopunun bozunum şeması.

$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar birbirleri ile yakın sonuçlar vermişlerdir. Tüm spektrum boyunca teorik hesaplamalar deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar göstermiştir.

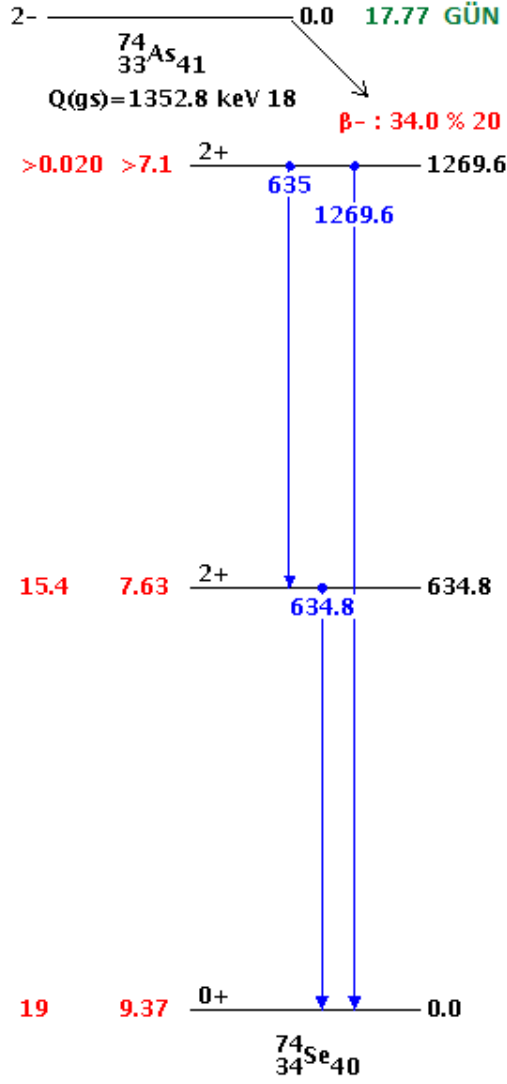
4.11. $^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$ Reaksiyonu

Yarı ömrü 17,8 gün olan ^{74}As pozitron yayınlıyıcı bir radyoizotoptur. β^+ ve elektron yakalaması yoluyla ^{74}Ge izotopuna, β^- ve elektron yakalaması yoluyla da ^{74}Se izotopuna bozunur.

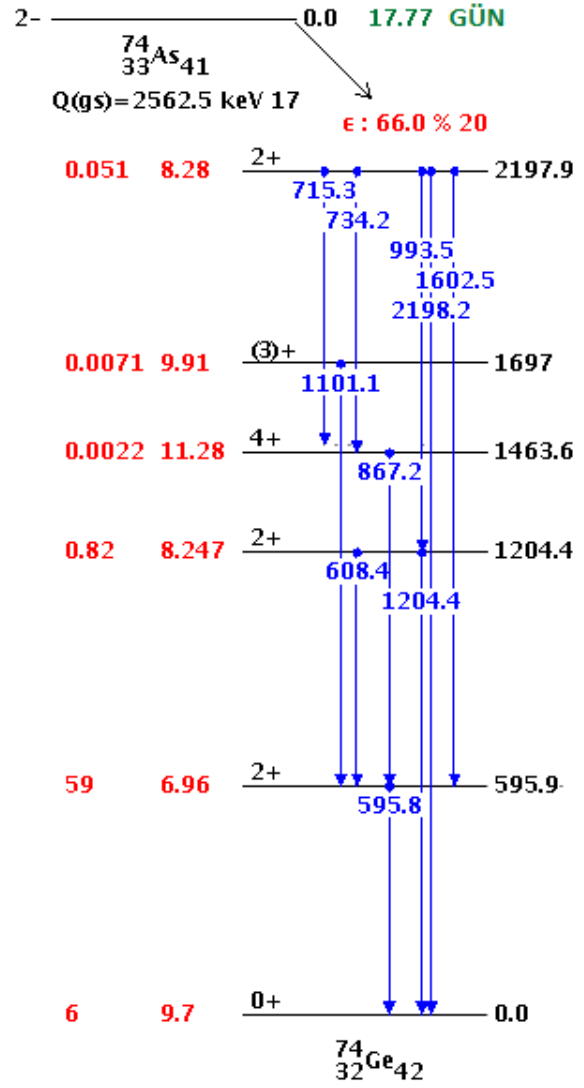
Çizelge 4.11 $^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$ Reaksiyonu'nun Q değeri ve eşik enerjisi

Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi(MeV)
^{75}As	n	^{74}As	2n	-10,243	10,381

^{74}As izotopunun bozunum şeması Şekil 4.21 ve 4.22' da gösterilmiştir.

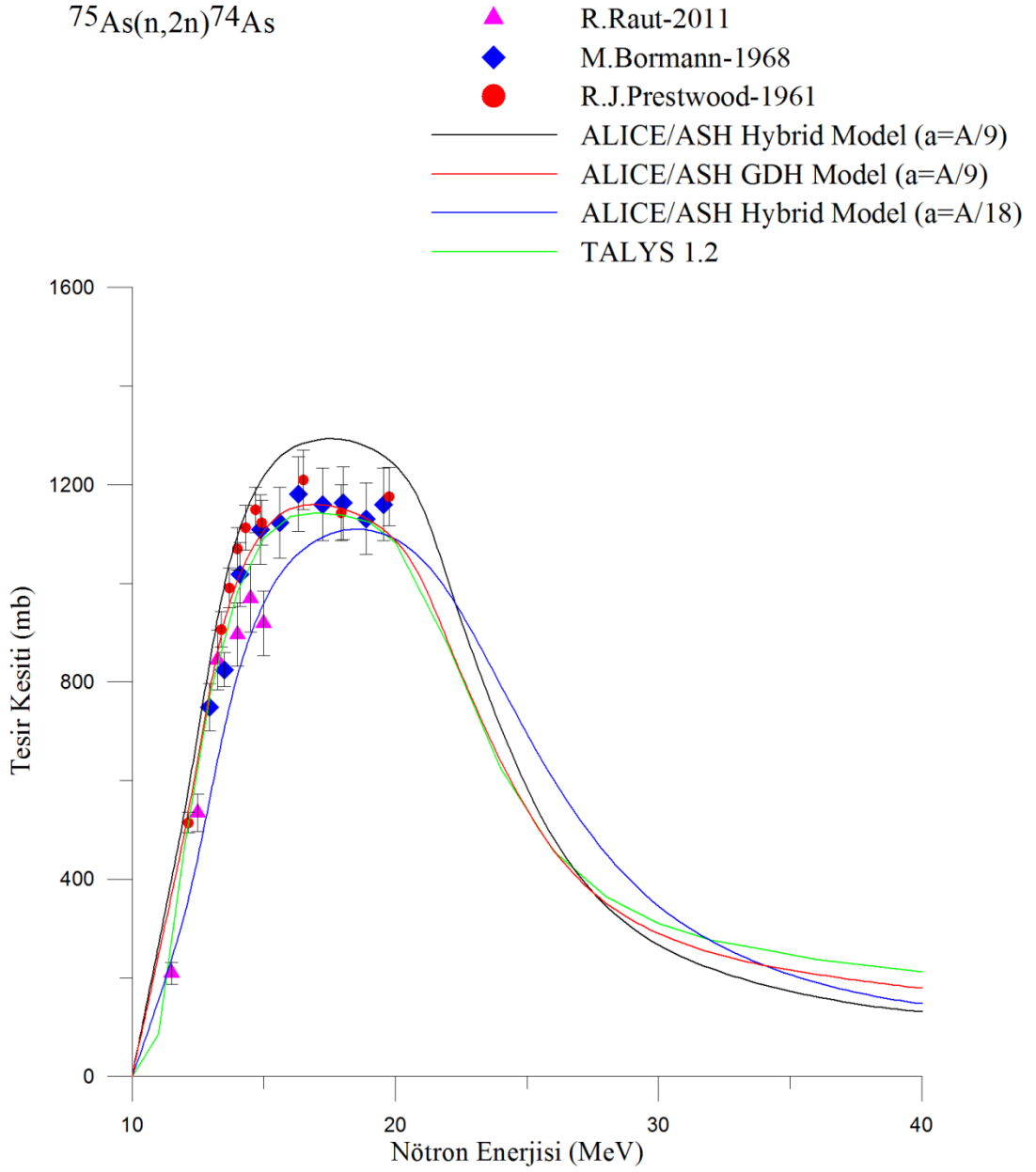


Şekil 4.21 ^{74}As izotopunun ^{74}Se izotopuna bozunum şeması



Şekil 4.22 ^{74}As izotopunun ^{74}Ge izotopuna bozunum şeması

$^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$ reaksiyonu için hesaplanan uyarılma fonksiyonlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23 $^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$ reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. Deneysel veriler EXFOR'dan alınmıştır.

ALICE/ASH ve TALYS 1.2 programları ile yapılan hesaplamalar, deneysel verilerle iyi bir uyum sağlamıştır. TALYS 1.2 ve ALICE/ASH GDH (Geometri Bağımlı Hibrid) Model hesaplamaları birbirine çok yakın sonuçlar göstermekle birlikte, deneysel verilerle en iyi uyumu göstermiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüzde, yaklaşık olarak 15000 parçacık hızlandırıcısı, değişik alanların hizmetinde faaliyet göstermektedir. Bunlardan yaklaşık 5000 adeti radyoterapi amaçlı olarak tasarlanmış hızlandırıcılardır. Tıbbi izotop üretiminde kullanılan siklotron hızlandırıcı sayısı 200 civarındadır. Her geçen gün bu sayılar artmaya devam etmektedir.

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de radyoizotopların tıpta teşhis ve tedavi amaçlı kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde kullanılan radyoizotopların neredeyse tümünün ithalat yoluyla temin ediliyor olması ülkemizde ciddi parasal kayba neden olmakta ayrıca önemli bazı radyoizotopların yarı ömürlerinin çok kısa olması nedeniyle ithal edilememesiyle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu nedenle TAEK tarafından ülkemizde kurulmuş olan 30 MeV’lik siklotron tipi proton hızlandırıcısı, kısa yarı ömürlü ve sağlıkta etkin olarak kullanılan birçok radyoizotopun ülkemiz kaynaklarıyla üretilmesini sağlayarak ülkemize önemli hizmetlerde bulunacaktır.

Bu çalışmada; radyoizotop üretiminde kullanılan nükleon girişli bazı nükleer reaksiyonların tesir kesitleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar ALICE/ASH ve TALYS 1.2 bilgisayar programları ile yapılmıştır. Hesaplamalarda elde edilen sonuçlar, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının Deneysel Nükleer Reaksiyon Verileri kütüphanesinden (Experimental Nuclear Reaction Data www.nndc.bnl.gov/exfor/) ve literatürden alınan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Grafiklere bakıldığında ALICE/ASH ve TALYS 1.2 bilgisayar programları ile yapılan hesaplamaların, birbirine yakın sonuçlar verdikleri ve deneysel değerlerle de uyumlu sonuçlar gösterdikleri görülmüştür.

Bu çalışmada incelenen nükleon girişli nükleer reaksiyonların Q değerleri, eşik enerjileri, üretilebilecek radyoizotopların maksimum tesir kesitleri ve en uygun enerji aralıkları Çizelge 5.1’de gösterilmektedir. Bu çizelgeye bakıldığında teze konu olan ^{119}Sb , ^{169}Yb , ^{61}Cu , ^{124}I , ^{111}In , ^{18}F , ^{64}Cu , ^{66}Ga , ^{74}As , ^{198}Au ve ^{62}Cu medikal radyoizotopların üretilmesindeki azami tesir kesitleri için en uygun nükleon enerji

aralıklarının 6–22 MeV olduğu görülür. Bu sonuçlara göre, bu izotopların üretilebilirliğinin orta ölçekli bir siklotronda gerçekleştirilebileceği söylenebilir.

Çizelge 5.1 Bu çalışmada incelenen nükleon girişli nükleer reaksiyonların Q değerleri, eşik enerjileri ile üretilebilecek radyoizotopların maksimum tesir kesitleri ve optimum enerji aralıkları

Hedef Çekirdek	Gelen Parçacık	Ürün Çekirdek	Çıkan Parçacık	Q-Değeri (MeV)	Eşik Enerjisi (MeV)	Maksimum Tesir Kesiti (mb)	Optimum Enerji Aralığı (MeV)
^{119}Sn	p	^{119}Sb	n	-1.373	1.384	705,673	6-13
^{169}Tm	p	^{169}Yb	n	-1.692	1.702	153.484	8-13
^{61}Ni	p	^{61}Cu	n	-3.019	3.069	539,182	8-12
^{124}Te	p	^{124}I	n	-3.941	3.973	763,475	8-12
^{111}Cd	p	^{111}In	n	-1.644	1.659	755,061	8-18
^{18}O	p	^{18}F	n	-2.437	2.574	305	5-7
^{64}Ni	p	^{64}Cu	n	-2.457	2.496	801,416	6-12
^{66}Zn	p	^{66}Ga	n	-5.957	6.048	580	10-15
^{198}Hg	n	^{198}Au	p	-0.589	0.593	27	18-25
^{63}Cu	n	^{62}Cu	2n	-10.853	11.027	896,405	14-22
^{75}As	n	^{74}As	2n	-10.243	10.381	1291,65	14-22

En uygun enerji aralıklarının belirlenmesi, bir radyoizotopun üretilebilirliğinin belirleyen tek faktör değildir. Aynı zamanda, bahsedilen enerji

aralığı için izotopik kirliliğin, kullanılacak hedefin kalınlığının, üretim aktivitesinin de incelenmesi gerekmektedir. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda, bahsedilen bu parametrelerin de dikkate alınması gereklidir.

KAYNAKLAR

- Acerbi, E., Birattari, C., Castiglioni, M., Resmini, F., Villa, M., Production of ^{123}I for Medical Purposes at The Milan AVF Cyclotron., Applied Radiation and Isotopes Vol.26, p.741., 1975.
- Adam Rebeles, R., Van Den Winkel, P., Hermanne, A., Tarkanyi, F., New measurement and evaluation of the excitation function of $^{64}\text{Ni}(p,n)$ reaction for the production of ^{64}Cu ., Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.B Vol.267, p.457., 2009.
- Al-Abyad, M., Sudar, S., Comsan, M.N.H., Qaim, S.M., Cross sections and isomeric cross-section ratios in the interactions of fast neutrons with isotopes of mercury., Physical Review, Part C, Nuclear Physics Vol.73, p.064608, Nuclear Science and Engineering Vol.88, p.143, Private communication, 2006.
- Avila-Rodriguez, M.A., Nyeb, J.A., Nickles, R.J., Simultaneous production of high specific activity ^{64}Cu and ^{61}Co with 11.4 MeV protons on enriched ^{64}Ni nuclei., Applied Radiation and Isotopes Vol.65, p.1115., 2007.
- Blann, M., Vonach, H.K, Phys. Rev., C28, 1475, 1983.
- Blann, M., Mignerey, A., Scobel, W., Nukleonika, 21, 335, 1976.
- Blann, M., Phys Rev. Lett., 21, 1357, 1968.
- Blann, M., Phys. Rev. Lett., 27, 337, 1971.
- Blann, M., Vonach, H.K., Phys. Rev., C28, 1475, 1983.
- Blann, M., Mignerey, A., Scobel, W., Nukleonika, 21, 335, 1976.
- Blaser, J.P., Boehm, F., Marmier, P., Scherrer, P., Excitation functions of the (p,n) reaction for light elements., Helvetica Physica Acta Vol.24, p.465, Helvetica Physica Acta Vol.22, p.598., 1952.

- Bormann, M., Behrend, A., Riehle, I., Vogel, O., -Measurement of (n,2n) Excitation Functions-in German., Reports from Euratom-countries + Euratom to EANDC No.76., Reports from Euratom-countries + Euratom to EANDC No.89U., 1968.
- Broeders, C.H.M., Konobeyev, A.Yu., Korovin, Yu.A., Lunev, V.P., Blann, M., ALICE/ASH – Pre-compound and Evaporation Model Code System for Calculation of Excitation Functions, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reactions at Intermediate Energies. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft Wissenschaftliche Berichte FZKA 7183, 2006.
- Blaser, J.P., Boehm, F., Marmier, P., Anregungsfunktionen und Wirkungsquerschnitte der (p,n)-Reaktion (II), Helvetica Physica Acta., 1951.
- Curie, I., Foliot, F., “The absorption and translocation of lead by plants”, Biochem. J. 17:439, 1923.
- Colobetti, L.G., “Radiopharmacology”, La Ricerca Clin. Lab., 9:281-291, 1979.
- Cantez, S., Gorpe, A., “Pratik Nükleer Tıp”, (İstanbul Üniversitesi Vakfı) Tayf Ofset Basım, İstanbul, 266-276, 1992.
- Cline, C.K., Nucl. Phys., A193, 417, 1972.
- Cline, C.K., Nucl. Phys., A195, 353, 1972.
- Ercan, A., “I. Uluslararası Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi”, TAEK ANKARA, 25-26 Ekim, 2001.
- EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data File), Brookhaven National Laboratory National Nuclear Data Center. İnternet Sitesi. <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/exfor/>. Erişim tarihi: 01/02/2012.
- Fu, C.Y., Nucl. Sci. And Eng., 86, 1984.
- Griffin, J.J., Phys. Lett., 17, 478, 1966.

- Hevesy, V.G., "The absorption and translocation of lead by plants", *Biochem. J.* 17:439, 1923.
- Hess, E., Takacs, S., Scholten, B., Tarkanyi, F., Coenen, H.H., Qaim, S.M., Excitation function of the $^{18}\text{O}(\text{P},\text{N})^{18}\text{F}$ nuclear reaction from threshold up to 30 MeV., *Radiochimica Acta* Vol.89, p.357., 2001.
- Hauser, W., Feshbach, H., "The inelastic scattering of neutrons", *Phys. Rev.* 87:366-373, 1952.
- Howe, H.A., (P,N) Cross Sections of Copper and Zinc., *Physical Review* Vol.109, p.2083., 1958
- Johnson, C.H., Blair, J.K., Jones, C.M., Penny, S.K., Smith, D.W., p-wave resonances observed by the (p,n) reaction for 2.6- to 7-MeV protons incident on isotopes of Sn, *Physical Review, Part C, Nuclear Physics* Vol.15, p.196., 1977.
- Kasugai, Y., Maekawa, F., Ikeda, Y., Takeuchi, H., Measurement of activation cross sections for mercury isotopes in the neutron energy range between 13.4 and 14.9 MeV., *Jour. Of Nuclear Science and Technology* Vol.38, Issue.12, p.1048., 2001.
- Krane, K.S., *Nükleer Fizik I-II*, Çeviri Editörü: Başar ŞARER, Palme Yayıncılık, ANKARA, 2001.
- Kitwanga, S.W., Leleux, P., Lipnik, P., Vanhorenbeeck, J., Production of O-14,15, F-18 and Ne-19 radioactive nuclei from (P,N) reactions up to 30-MeV., *Physical Review, Part C, Nuclear Physics* Vol.42, p.748., 1990
- Koning, A. and Duijvestijn, M., New Nuclear Data Evaluations for Ca and Sc Isotopes, *Journal of Nucl. Sci. And Tech.*, Vol.44, No.6, pp. 823-837., 2007.
- Koning, A.J., Hilaire, S. and Duijvestijn, M., TALYS 1.2 A Nuclear Reaction Program, NRG – Nuclear Research and Consultancy Group, Netherlands., 2009.

- Kondo, K., Lambrecht, R.M., Wolf, A.P., Iodine-123 Production For Radiopharmaceuticals Excitation Functions of the $Te-124(P,2N)I-123$ and $Te-124(P,N)I-124$ Reactions and the Effect of Target Enrichment on Radionuclidic Purity., *Applied Radiation and Isotopes* Vol.28, p.395., 1977
- Levkovskij, V.N., Activation cross section nuclides of average masses ($A=40-100$) by protons and alpha-particles with average energies ($E=10-50$ MeV)., Levkovskij, *Act. Cs. By Protons and Alphas*, Moscow, 1991.
- Lovchikova, G.N., Sal'nikov, O.A., Simakov, S.P., Trufanov, A.M., Kotel'nikova, G.V., Pilz, V., Streil, T., Investigation of Mechanism of the Reactions $94-Zr(P,N)94-Nb$, $119-Sn(P,N)119-Sb$, $122-Sn(P,N)122-Sb$ In the Proton Energy Region 6-9 MeV., *Yadernaya Fizika* Vol.31, p.1., *Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser. Fiz.* Vol.48, p.1982., 1977.
- Marten, M., Schuring, A., Scobel, W., Preequilibrium Neutron Emission In $AG-109(HE3,XN)$ and $CD-111(P,XN)$ Reactions., *Zeitschrift fuer Physik A, Hadrons and Nuclei* Vol.322, p.93., 1985.
- Mannhart, W., Schmidt, D., Measurement of Neutron Activation Cross Sections in the Energy Range from 8 MeV to 15 MeV., Report: Phys. Techn. Bundesanst., Neutronenphysik Reports No.53, Conf.: Conf. On Nucl. Data for Sci. and Techn., Santa Fe 2004 p.609., *Journ.: Nuclear Science and Engineering* Vol.106, p.308., 2007.
- Oblozinsky, P., Ribansky, I., *Acta Phys. Slov.*, 24, 103, 1974.
- Prestwood, R.J., Bayhurst, B.P., $(n,2n)$ Excitation Functions Of Several Nuclei From 12.0 to 19.8 MeV., *Physical Review* Vol.121, p.1438., 1961.
- Raut, R., Crowell, A.S., Fallin, B., Howell, C.R., Huibregtse, C., Kelley, J.H., Kawano, T., Kwan, E., Rusev, G., Tonchev, A.P., Tornow, W., Vieira, D.J., Wilhelmy, J.B., Cross-section measurements of neutron-induced reactions on GaAs using monoenergetic beams from 7.5 to 15 MeV., *Physical Review, Part C, Nuclear Physics* Vol.83, p.044621., 2011.
- Ribansky, I., Oblozinsky, P., Betak, E., *Nucl. Phys.*, A205, 545, 1973.

- Ruth, T.J., Wolf, A.P., Absolute Cross Sections for Production of ^{18}F via the $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ Reaction., *Radiochimica Acta* Vol.26, p.21., 1979.
- Sakane, H., Kasugai, Y., Shibata, M., Iida, T., Takahashi, A., Fukahori, T., Kawade, K., Measurement of activation cross-sections for (n,2n) reactions producing short-lived nuclei in the energy range between 13.4 and 14.9 MeV., *Annals of Nuclear Energy* Vol.28, p.1175., Conf. Rep.: JAERI-M Reports No.86,039, p.393., 2001.
- Spahn, I., Takacs, S., Shubin, Yu.N., Tarkanyi, F., Coenen, H.H., Qaim, S.M., Cross-Section measurement of the $^{169}\text{Tm}(\text{p},\text{n})$ reaction for the production of the therapeutic radionuclide ^{169}Yb and comparison with its reactor-based generation., *Applied Radiation and Isotopes* Vol.63, p.235., 2005.
- Scholten, B., Kovacs, Z., Tarkanyi, F., Qaim, S.M., Excitation functions of $^{124}\text{Te}(\text{p},\text{xn})^{123,124}\text{I}$ reactions from 6 to 31 MeV with special reference to the production of ^{124}I at a small cyclotron., *Applied Radiation and Isotopes* Vol.46, p.255., 1995.
- Singh, B.P., Sharma, Manoj K., Musthafa, M.M., Bhardwaj, H.D., Prasad, R., A study of pre-equilibrium emission in some proton and alpha-induced reactions., *Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.A* Vol.562, p.717., 2006.
- Skakun, E.A., Kljucharev, A.P., Rakivnenko, Yu.N., Romanij, I.A., Excitation functions of (p,n)- and (p,2n)- reactions on cadmium isotopes., *Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser. Fiz.* Vol.39, p.24., *Bull. Russian Academy of Sciences – Physics* Vol.39, Issue.1, p.18., 1975.
- Szelecsenyi, F., Blessing, G., Qaim, S.M., Excitation functions of proton induced nuclear reaction on enriched ^{61}Ni and ^{64}Ni : possibility of production of no-carrier-added ^{61}Cu and ^{64}Cu at a small cyclotron., *Applied Radiation and Isotopes* Vol.44, p.575., 1993.
- Szelecsenyi, F., Steyn, G.F., Kovacs, Z., Van Der Walt, T.N., Suzuki, K., Okada, K., Mukai, K., New cross-section data for the $^{66}\text{Zn}(\text{p},\text{n})^{66}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(\text{p},3\text{n})^{66}\text{Ga}$, $^{nat}\text{Zn}(\text{p},\text{x})^{66}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(\text{p},2\text{n})^{67}\text{Ga}$ and $^{nat}\text{Zn}(\text{p},\text{x})^{67}\text{Ga}$ nuclear reactions up

to 100 MeV., Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.B Vol.234, Issue.4, p.375., 2005.

Tagesen, S., Vonach, H., Strohmaier, B., Evaluation of the cross-sections for the reactions $Mg-24(n,p)Na-24$, $Zn-64(n,p)Cu-64$, $Cu-63(n,2n)Cu-62$ and $Zr-90(n,2n)Zr-89$., Physik Daten/Physics Data, Series, Karlsruhe p.13-1., 1979.

Tarkanyi, F., Szelecsenyi, F., Kopecky, P., Molnar, T., Ando, L., Mikecz, P., Toth, Gy., Rydl, A., Cross section of proton induced nuclear reaction on enriched Cd-111 and Cd-112 for the production of in-111 for use in nuclear medicine., Applied Radiation and Isotopes Vol.45, p.239., Conf on Nucl. Data for Sci. And Technol., Juelich 1991 p.603., 1994.

Tarkanyi, F., Hermanne, A., Takacs, S., Ditroi, F., Spahn, I., Ignatyuk, A.V., Activation cross-sections of proton induced nuclear reactions on thulium in the 20-45 MeV energy range., Applied Radiation and Isotopes., 2011.

Tanaka, S., Furukawa, M., Chiba, M., Nuclear Reactions of Nickel with Protons up to 56 MeV., Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry Vol.34, p.2419., 1972.

Thisgaard, H., Jensen, M., Production of the Auger emitter Sb-119 for targeted radionuclide therapy using a small PET-cyclotron., Applied Radiation and Isotopes Vol.67, p.34., 2008.

Uwamino, Y., Sugita, H., Kondo, Y., Nakamura, T., Measurement of neutron activation cross sections of energy up to 40 MeV using semimonoenergetic p-Be neutrons., Nuclear Science and Engineering Vol.111, p.391., 1992.

Wagner, H.N.Jr., "New perspectives in nuclear medicine", Int. Symp. Med. Radionuclide Img. IAEA, Heidelberg, F.R.G., 1-5 sept. 1980, Extended Synopses, 212-213, 1980.

Williams, F.C., Nucl. Phys., A166, 231, (1971).

Yalçiner, E.G., "Proton hızlandırıcılarının nükleer uygulama alanları ile protonlarla oluşturulan nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin incelenmesi.", Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 132, Ankara, 2008.