



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

PROTON-ZENGİN ÇEKİRDEK REAKSİYONLARIN NÜKLEER MODELLEME  
KODLARIYLA İNCELENMESİ

BİRGÜL EREN

Eylül 2021



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

PROTON-ZENGİN ÇEKİRDEK REAKSİYONLARIN NÜKLEER MODELLEME  
KODLARIYLA İNCELENMESİ

BİRGÜL EREN

Doktora Tezi

Danışman

Prof. Dr. Sefa ERTÜRK

Eylül 2021

Birgöl EREN tarafından Prof. Dr. Sefa ERTÜRK danışmanlığında hazırlanan “Proton-Zengin Çekirdek Reaksiyonların Nükleer Modelleme Kodlarıyla İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sezgin AYDIN (Tarsus Üniversitesi)

Üye : Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU (Çukurova Üniversitesi)

Üye : Prof. Dr. Sefa ERTÜRK (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

Üye : Prof. Dr. Kasım KURT (Mersin Üniversitesi)

Üye : Doç. Dr. Zafer NERGİZ (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../2021 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../2021 tarih ve ..... Sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

.../.../2021

**Prof. Dr. Murat BARUT**

**Müdür**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Birgöl EREN



## ÖZET

### PROTON-ZENGİN ÇEKİRDEK REAKSİYONLARIN NÜKLEER MODELLEME KODLARIYLA İNCELENMESİ

EREN, Birgül

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Sefa ERTÜRK

Eylül 2021, 107 sayfa

Nükleer fizik alanındaki pek çok ilerleme ile birlikte nükleer reaksiyonlar ve çekirdek sentezleme yöntemleriyle nükleer haritayı oluşturan tüm çekirdekler hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Çekirdeklerin sentezlenmesi için çeşitli yöntemler vardır. Yavaş nötron yakalama süreci olarak bilinen s-süreci ile kararlılık vadisinin üzerindeki çekirdekler sentezlenebilir. S- süreci ile üretilemeyen nötron bakımından zengin çekirdekler, hızlı nötron yakalama süreci olarak adlandırılan r-süreci ile üretilir. Son yıllarda, kararlılık vadisinin nötron ve proton sızma bölgelerini oluşturan ve egzotik çekirdek olarak adlandırılan çekirdekler üzerinde yapılan çalışmalar oldukça ilgi çekici bir alan olmuştur. Bu nötron veya proton zengin egzotik çekirdeklerle yapılan deneyler beraberinde teorik modellerin gelişimine de öncülük etmiştir. Bu bölgedeki çekirdek yapılarını anlamak ve oluşturmak için birçok bilgisayar kodu kullanılmaktadır. Bu tezde bu kodlardan füzyon buharlaşma kodları olarak bilinen PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodları ile çalışılmıştır. Deneysel veriler ile bu kodlar yardımıyla hesaplanan tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Kodların hangi reaksiyon mekanizmaları için avantajlı veya dezavantajlı olduğunun, çeşitlendirilen örneklerle açıklanması hedeflenmiştir.

*Anahtar sözcükler:* s-süreci, r-süreci, p- çekirdek, egzotik çekirdek, proton zengin, füzyon buharlaşma kodu, PACE4, EMPIRE, HIVAP, TALYS

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF PROTON-RICH NUCLEUS REACTIONS BY NUCLEAR MODELING CODES

EREN, Birgöl

Niğde Ömer Halisdemir Üniversity

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Sefa ERTÜRK

September 2021, 107 pages

Along with many advances in the field of nuclear physics, knowledge about all nuclei that make up the nuclear map has been gained through nuclear reactions and nuclear synthesis methods. There are various methods for synthesizing nuclei. Nuclei above the stability valley are synthesized by the s-process, known as the slow neutron capture process. Neutron-rich nuclei that cannot be produced by the S-process are produced by the r-process, which is called the fast neutron capture process. In recent years, studies on the so-called exotic nuclei, which form the neutron and proton rich leakage regions of the stability valley, have been a very interesting area. Experiments with these neutron or proton exotic nuclei led to the development of theoretical models. In order to form and understand the structure of these nuclei , many computer codes are used. In this thesis, known as fusion evaporation codes such as PACE4, EMPIRE, HIVAP and TALYS codes were studied. The cross section values calculated with the help of these codes were compared with the experimental data. It is aimed to explain which reaction mechanisms the codes are advantageous or disadvantageous with various examples.

*Keywords:* s-process, r-process, p-nucleus, exotic nucleus, proton rich, fusion evaporation codes, PACE4, EMPIRE, TALYS, HIVAP

## ÖN SÖZ

Bu doktora tez çalışmasında nükleer haritanın protonca zengin bölgesindeki çekirdek reaksiyonlarının tesir kesit değerlerinin literatürdeki deneysel çalışmaların verileri elde edilerek PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS nükleer modelleme kodlarıyla hesaplanan tesir kesit değerleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu alanda çalışma yapmaya yeni başlayacak olanlara veya araştırma yapmak isteyen araştırmacılara literatürde eksik olan bilgiyi sağlamak ve kullanabilmelerini sağlamak için gerçekleştirilmiştir.

Doktora tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, bilgi ve donanımı ile yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarına yön veren, her anlamda desteğini hissetmemi sağlayan saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sefa ERTÜRK' e en içten şükran ve teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesi üyesi değerli hocalarımız Sayın Prof. Dr. Sezgin AYDIN' a ve Sayın Doç. Dr. Zafer NERGİZ' e tez sürecim boyunca, bilgi ve deneyimlerini paylaşmaları, göstermiş oldukları destek ve anlayış için teşekkür ederim. Tez çalışması konusunda tüm bu zaman boyunca edindiği bilgi ve tecrübelerini paylaşmayı esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Sayın Uğur İLTER'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Beni bu günlere getiren hayatımın her döneminde olduğu gibi bu süreçte de tüm sevgisiyle, maddi ve manevi olarak her koşulda yanımda olan biricik annem Yücel ÖZTÜRK'e, ihtiyacım olduğu her anda yardımına koşan kıymetli kardeşim Banu SONGUR'a, anlayışından ve desteğinden dolayı eşim Erdal EREN'e sonsuz teşekkürler. Son olarak bu süreçte zaman zaman kendilerini ihmal etmek zorunda kaldığım, hayatımın anlamı olan en değerli varlıklarım, kızım Lidya Masal ve oğlum Deniz' e göstermiş oldukları yetişkin düzeyindeki olgunluk, hassasiyet ve minik kalplerinden gelen en değerli destekleri için sonsuz sevgimle...

Bu çalışma FEB2011/22- DOKTEP no'lu proje kapsamında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.



2.1.7.2 Çoklu parçalanma (multifragmentasyon) reaksiyonları .....	12
2.2 Nükleer Reaksiyon Tesir Kesiti .....	12
<b>BÖLÜM III KARARLILIK VADİSİ VE ÇEKİRDEK SENTEZİ .....</b>	<b>15</b>
3.1 Kararlılık Vadisi .....	15
3.2 Çekirdek Sentezi .....	16
3.2.1 S-süreci .....	17
3.2.2 R- süreci.....	18
3.2.3 P- süreci .....	18
3.3 Egzotik Çekirdekler .....	20
3.3.1 Egzotik çekirdek üretimi .....	21
3.3.1.1 Deneysel teknikler .....	22
3.3.2 Egzotik çekirdeklerin seçimi .....	25
3.3.2.1 ISOL (the isotope separation on-line) tekniği .....	26
3.3.2.2 In-flight tekniği.....	27
<b>BÖLÜM IV MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>28</b>
4.1 Nükleer Reaksiyon Modelleme Programı: LISE++ .....	28
4.1.1 Uygulamada PACE4.....	30
4.1.2 PACE4 sonuçlarını LISE ++ ile çizme.....	33
4.2 EMPIRE Kodu.....	35
4.2.1 Grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı .....	37
4.2.2 Zorunlu girdi bölümü.....	39
4.2.3 İsteğe bağlı girdi bölümü .....	40
4.2.4 Örnek girdi dosyası.....	44
4.3 HIVAP Kodu .....	46
4.3.1 Hivap girdi parametreleri hakkında .....	47
4.3.2 Girdi dosyası.....	47
4.4 TALYS Kodu.....	53
4.4.1 TALYS paketi.....	55
4.4.2 Kurulum.....	56
4.4.3 Doğrulama .....	57
4.4.4 Başlarken .....	58
4.4.4.1 Basit girdi dosyası hazırlama.....	58
4.4.4.2 Temel girdi kuralları .....	59
4.4.4.3 Dört temel anahtar kelime .....	60

BÖLÜM V BULGULAR VE TARTIŞMA.....	65
5.1 Proton ile Bombardıman Edilen Reaksiyonlar .....	65
5.2 Alfa ile Bombardıman Edilen Reaksiyonlar .....	73
5.3 Ağır İyon ile Bombardıman Edilen Reaksiyonlar/Ağır İyon Kaynaklı Reaksiyonlar .....	78
5.4 Proton Zengin Radyoizotop Reaksiyonları.....	84
BÖLÜM VI SONUÇLAR .....	94
KAYNAKLAR .....	97
ÖZ GEÇMİŞ .....	106
TEZ ÇALIŞMASINDA ÜRETİLEN ESERLER.....	107



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. HIVAP kodu için parametre setleri .....	52
------------------------------------------------------	----



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Füzyon buharlaşma reaksiyonu şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.2. Ağır iyon çarpışmalarının şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.3. Dökülme (spallasyon) reaksiyonunun şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.4. Diferansiyel tesir kesitinin gösterimi.....	14
Şekil 3.1. Kararlılık vadisi .....	15
Şekil 3.2. p-çekirdeklerinin şeması (siyah dikdörtgenler). Semboller.....	19
Şekil 3.3. Egzotik çekirdek üretimi için bir deneyin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.4. ISOL ve In-Flight tekniklerinin şematik gösterimi .....	26
Şekil 4.1. LISE++ araç çubuğu.....	30
Şekil 4.2. PACE4 kodunun ilk kartı .....	31
Şekil 4.3. PACE4 kodunun ikinci kartı.....	32
Şekil 4.4. PACE4 çalışma örneği.....	33
Şekil 4.5. PACE4'ün çıktı dosyası .....	33
Şekil 4.6. PACE4 çizim sekmesine erişim .....	34
Şekil 4.7. PACE4 tesir kesit grafiği.....	34
Şekil 4.8. EMPRE grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı.....	37
Şekil 4.9. EMPIRE grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı menü satırı.....	38
Şekil 4.10. EMPIRE grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı komut düğmeleri satırı ....	38
Şekil 4.11. Input (inp uzantılı) dosyası format tanıtımı .....	38
Şekil 4.12. Input (inp uzantılı) dosyası zorunlu girdi bölümü .....	39
Şekil 4.13. Input menüsü (a) ve create input seçeneği (b).....	40
Şekil 4.14. İsteğe bağlı girdi bölümü.....	41
Şekil 4.15. Girdi dosyası isteğe bağlı bölüm ve “Calculation Control” ve “Output Control” parametre satırları .....	42
Şekil 4.16. Çalışılacak reaksiyon için enerji adımları .....	43
Şekil 4.17. Örnek girdi dosyası.....	44
Şekil 4.18. Reaksiyon için çalışma alt dizini .....	44
Şekil 4.19. Reaksiyonun çalıştırılma seçeneği.....	45
Şekil 4.20. Tesir kesit çıktı dosyası .....	45
Şekil 4.21. Hivap örnek girdi dosyası.....	48

Şekil 4.22. Mermi ve hedef için bilgiler .....	48
Şekil 4.23. Reaksiyon sonunda salınacak proton ve nötron sayıları.....	49
Şekil 4.24. Enerji değerinin verildiği satır .....	49
Şekil 4.25. Girdi dosyasında satırda kayma.....	50
Şekil 4.26. Hivap kodu hata mesajı .....	50
Şekil 4.27. Girdi dosyasında farklı enerji adımları için örnek .....	51
Şekil 4.28. Hivap için enerji sınırı .....	51
Şekil 4.29. Hivap kodu örnek çıktı dosyası tesir kesit değerleri.....	52
Şekil 4.30. TALYS kodu için örnek girdi dosyası.....	63
Şekil 4.31. TALYS kodu enerji dosyası örneği .....	64
Şekil 4.32. TALYS tesir kesit değerleri.....	64
Şekil 5.1. <sup>90</sup> Zr için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	65
Şekil 5.2. <sup>75</sup> As için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	66
Şekil 5.3. <sup>94</sup> Mo için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	67
Şekil 5.4. <sup>27</sup> Si için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	68
Şekil 5.5. <sup>51</sup> Cr için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	69
Şekil 5.6. <sup>93</sup> Mo için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	70
Şekil 5.7. <sup>105</sup> Ag için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	71

Şekil 5.8. $^{181}\text{W}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	72
Şekil 5.9. $^{197}\text{Hg}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	72
Şekil 5.10. $^{94}\text{Ru}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	73
Şekil 5.11. $^{94}\text{Ru}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	74
Şekil 5.12. $^{116}\text{Te}$ için deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	75
Şekil 5.13. $^{65}\text{Zn}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	76
Şekil 5.14. $^{199}\text{Tl}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	77
Şekil 5.15. $^{199}\text{Tl}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	77
Şekil 5.16. $^{23}\text{Mg}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 5.17. $^{97}\text{Ru}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 5.18. $^{97}\text{Ru}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	80

Şekil 5.19.	<sup>168</sup> Lu için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 5.20.	<sup>168</sup> Lu için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.21.	<sup>177</sup> Re için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 5.22.	<sup>173</sup> Hf için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 5.23.	<sup>66</sup> Ga için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 5.24.	<sup>66</sup> Ga için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	86
Şekil 5.25.	<sup>67</sup> Ga için nükleer veri kütüphanesi EXFOR 'dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 5.26.	<sup>67</sup> Ga için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	87
Şekil 5.27.	<sup>68</sup> Ga için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması.....	88
Şekil 5.28.	<sup>133</sup> Ce için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	89
Şekil 5.29.	<sup>135</sup> Ce için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	90

Şekil 5.30. $^{135}\text{Ce}$ için deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	90
Şekil 5.31. $^{165}\text{Er}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	91
Şekil 5.32. $^{165}\text{Er}$ için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	92
Şekil 5.33. $^{187}\text{Pt}$ deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması .....	93



## SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
$\alpha$	Alfa
$\beta$	Beta
$\sigma$	Tesir Kesiti
$d\sigma$	Toplam tesir kesiti
Ia	Gelen demet akısı
$R_b$	Parçacıkların birim zamandaki akısı
N	Nötron sayısı
Z	Atom numarası, proton sayısı
A	Kütle numarası,
K	Kelvin
b	Barn
mb	Milibarn
pb	Picobarn
p	Proton
n	Nötron
d	Döteryum
t	Tritiyum
$\gamma$ , $\square$	gama
$^3\text{He}$	He 3 çekirdeği
cm	Santimetre
s	Saniye
eV	Elektron volt
MeV	Mega elektron volt
GeV	Giga elektron volt
TeV	Tera elektron volt
keV	Kilo elektron volt
fm	Femtometre

**Kısaltmalar****Açıklama**

PACE	Projection Angular Momentum Coupled Evaporation
HIVAP	Heavy Ion eVAPoration Kode
EXFOR	Exchange Format, Deneysel Veri Kütüphanesi
ENDF	Evaluated Nuclear Data Formats
RIPL	Reference Input Parameter Library



# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Atom çekirdeğini ve bileşenlerini ve bunların etkileşimlerini inceleyen fizik dalı nükleer fizik olarak adlandırılabilir. Bir nükleer reaksiyon, yeni nükleer durumlar, parçacıklar, x-ışınları ve gama ışınları üretmek için çekirdeklerin/nükleonların etkileşime girdiği bir süreçtir. Nükleer enerji, nükleer reaktörler, hastalıkların nükleer görüntülenmesi, tıbbi durumların teşhis edilmesi ve iyileştirilmesi, radyo-immünoterapi vb. dahil olmak üzere nükleer fiziğin birçok uygulaması vardır. Nükleer reaksiyonlar, yıldızların enerji üretimine güç sağlar.

Geçen yüzyıl, yeni geliştirilen nükleer astrofizik araştırma alanına astronomi, astrofizik ve nükleer fiziğin birleşimini getirdi. Hidrojenin helyuma füzyonu, yıldızların uzun süreli ilk evrim aşaması için enerji kaynağı olarak kabul edildi. Nükleer reaksiyonlar, proton ve nötronlardan başlayan bilinen tüm elementleri sentezleme fırsatını sağladı. Bilinen tüm kararlı ve uzun ömürlü kararsız izotopları sentezlemek için sekiz süreç önerilmiştir: hidrojen yanması, helyum yanması,  $\alpha$  parçacıklarının yakalanması ( $\alpha$  süreci), istatistiksel dengede nükleer reaksiyonlar (e süreci), nötron yakalama reaksiyonları düşük ve yüksek nötron yoğunluklarında (s ve r süreçleri), proton yakalama reaksiyonlarında (p süreci) ve döteryum, lityum, berilyum ve bor üretimi (x süreci) gibi.

Nükleer haritayı oluşturan radyoaktif çekirdekler, bir asır önce radyoaktivitenin keşfinden bu yana, temel araştırmalarda birçok farklı çalışmanın ve çeşitli alanlardaki birçok uygulamanın temel taşları olmuştur. Bu radyoaktif çekirdekler nükleer ve parçacık fiziğinin gelişiminde merkezi bir rol oynamaktadır.

Nükleer yapı çalışmaları, kuvvetli etkileşen sonlu kuantum çok cisim sistemini ve atom çekirdeğindeki nükleonlar arasında etki eden kuvvetler ile temel kuvvetler arasındaki ilişkiyi daha derinden anlamayı amaçlar.

Son zamanlarda, nükleer haritanın sınırlarındaki çekirdekler - proton-nötron sızma hatlarının yakınında - artan bir ilgi gördü. Egzotik çekirdek olarak adlandırılan bu

çekirdeklerin protonları ve nötronları arasındaki denge, dengeden o kadar uzaktır ki, yani kararlılık vadisindeki  $Z/N$  oranından, kararlılığa yakın geçerli nükleer modellerin bu sınırlarda hayatta kalıp kalmadığı sorgulanabilir.

Sızma bölgesine yakın bu çekirdeklerle yapılan deneyler, teorik modellerin gelişimine rehberlik edecek ve bunların uygulanabilirliğini test edecek kritik bilgileri ortaya çıkaracaktır. Ayrıca, bu hala bilinmeyen çekirdeklerin çoğu, nükleosentez yollarında yatmaktadır; bu çekirdeklerin bazılarının reaksiyon, bozunma ve temel durum özellikleri, güvenilir nükleosentez senaryolarının geliştirilmesinde kilit bir rol oynayabilir. Füzyon buharlaştırma reaksiyonlarını kullanmanın başarılarıyla, bölgede özellikle daha fazla nötron eksikliği olan izotopları doldurmak mümkün olmuştur. Gerekli nötron eksikliğine ulaşmak için, üretim tesir kesitini büyük ölçüde azaltan bileşik oluşumundan birçok nötron buharlaştırılmalıdır.

P çekirdeği olarak adlandırılan, yani s veya r işlemiyle oluşturulamayan 35 kararlı, nötron eksikliği olan nüklidin güneş sistemi bolluğunun tanımı, yıldız nükleosentezinin çözülmemiş bulmacalarından biri olmaya devam etmektedir. Tüm bu senaryolarda, p-süreci nükleosentezi, 1,8 ila 3,3 milyar derece Kelvin arasındaki yüksek yıldız sıcaklıklarında meydana gelir ve p çekirdeğinin üretimi, bir dizi nötron, proton ve alfa parçacığı foto parçalanmaları, bunların ters yakalama reaksiyonları ve/veya beta bozunması ile mümkündür.

Bolluk hesaplamaları, neredeyse 2000 çekirdeğin 20000'den fazla nükleer reaksiyonunun devasa bir ağın çözümünü gerektirir. Açıkçası tüm bu nükleer reaksiyon oranlarının deneysel olarak belirlemeye yönelik herhangi bir girişim, özellikle ilgili çekirdeklerin büyük bir çoğunluğu kararsız olduğu için gerçekçi değildir. Sonuç olarak, bu hesaplamalar tamamen Hauser-Feshbach teorisinin tesir kesit tahminlerine dayanmak zorundadır. Nükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin teorik olarak hesaplanması için çeşitli bilgisayar kodları kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında da dört farklı nükleer reaksiyon kodu ele alınmıştır.

Tezin 1. Bölümünde genel bakış açısıyla konuya giriş yapıldı. 2. Bölümde bir hatırlatma olarak nükleer reaksiyon türleri ve reaksiyon tesir kesiti kavramı açıklandı. 3. Bölümde kararlılık vadisi, kararlılık vadisinin proton ve nötron zengin kısımlarını teşkil eden

egzotik çekirdek kavramlarına değinildi. Çekirdeklerin nasıl sentezlendiği, egzotik çekirdek üretimi için kullanılan deneysel teknikler ve egzotik çekirdeklerin seçimi için kullanılan ISOL ve In-Flight tekniklerinden bahsedildi. 4. Bölümde ise tesir kesit hesaplamalarında bu tez kapsamında kullanılan PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarının okuyucuya rehber olarak yardımcı olmasını sağlayabilmek adına kurulum ve kullanımına ait bilgiler verildi. 5. Bölümde literatür taraması ve nükleer veri bankası EXFOR' dan elde edilen deneysel veriler ile dört farklı kod yardımıyla hesaplanan değerler ile elde edilen bulgulara yer verildi. 6. ve son bölümde ise varılan sonuç ve öneriler kısmı ele alındı.



## BÖLÜM II

### GENEL BİLGİLER

#### 2.1 Nükleer Reaksiyonlar

##### 2.1.1 Nükleer reaksiyon türleri

Nükleer reaksiyonlar, mekanizmalarına göre bileşik veya direk reaksiyonlar olmak üzere iki ana kısma ayrılırlar. Düşük enerjilerde gelen bir parçacık, öncelikle hedef çekirdeğin Coulomb alanı ile etkileşir ve enerjisi Coulomb bariyerini aşmaya yeterli değilse Rutherford yasasına göre saçılır. Eğer parçacığın enerjisi Coulomb engelinden daha fazla ise parçacık, hedef çekirdeğin nükleer alanı ile etkileşerek ya nükleer saçılmaya uğrar ya da absorbe edilerek bir bileşik çekirdek oluşturur. Bu bileşik çekirdek uyarılmış durumda olup, daha sonra parçacık yayılımını takip eden gama-ışını yayılımından sonra temel seviyeye dönerler. Bir ara durum oluşan bu tür reaksiyonlara “bileşik çekirdek reaksiyonları” denir. Daha düşük enerjilerde nükleer reaksiyonlar herhangi bir ara durum oluşmaksızın hemen gerçekleşebilirler. Bu tür reaksiyonlara “direk reaksiyonlar” adı verilir. Ayrıca bu iki durum arasında olan; yani bileşik çekirdek reaksiyonları ve direk reaksiyonlar arasında olan durum rezonans reaksiyonları da vardır (Krane,1988).

##### 2.1.2 Bileşik çekirdek reaksiyonları

Bu tür reaksiyonlar,  $a+A \rightarrow C^* \rightarrow B^*+b$  şeklinde bir  $C^*$  ara durumuna sahiptirler. Bu reaksiyonlar mermi ve hedefin nükleonları arasında çok sayıda etkileşim içerir. Bu reaksiyonlarda, hedef çekirdeğin hacmi, olay parçacığı ile etkileşime girer. Bileşik nükleer reaksiyon için etkileşim süresi, doğrudan reaksiyona kıyasla daha uzun olan  $10^{-18}$ - $10^{-16}$  saniye düzeyindedir ve bileşik çekirdeğin gözlenen yaşam süresi  $10^{-14}$  saniye civarındadır. Bu reaksiyonlarda, çıkan parçacıklar, doğrudan reaksiyona kıyasla daha az keskin bir şekilde açılma dağılıma sahiptir. Tesir kesitleri direk reaksiyonlara göre çok büyüktür. Doğrudan reaksiyonlar ve bileşik çekirdek reaksiyonları, ağır iyonlarla ( $A \geq 4$ ) gerçekleştirilen süreçlerdir (Krane,1988).

### 2.1.3 Direk reaksiyonlar

Direk reaksiyonlar aşağıda sıralanan özelliklere sahiptir.

- Yüksek enerjilerde meydana gelirler ve reaksiyonun oluşma süresi bileşik çekirdek reaksiyonlarına göre daha kısadır ( $10^{-22}$  s).
- Reaksiyon sırasında mermi ve hedef çekirdek etkileşim yaparak şiddetli absorpsiyon meydana getirirler.
- Etkileşim genelde yüzeyde, değerlik nükleonları arasında meydana gelir.
- Tesir kesitleri bileşik çekirdek reaksiyonlarına göre düşüktür. Tesir kesitleri küçük açılarda pik yaparken büyük açılarda şiddetleri düşüktür.
- Çıkan parçacıkların açısal dağılımları keskin pik değerlerine sahiptir.

Reaksiyonun bileşik çekirdek reaksiyonunu yoksa direk reaksiyon mu olacağı gelen parçacığın enerjisine bağlıdır. 1 MeV enerjili gelen nükleonun dalga boyu 4 fm ' dir ve bu nedenle tek nükleonları göremez. Bu durumda bileşik çekirdek meydana gelmesi daha olasıdır. 20 MeV' lik bir nükleonun dalga boyu 1 fm civarında olup direk reaksiyonların meydana gelmesi ihtimali daha büyüktür (Krane,1988).

#### 2.1.3.1 Esnek saçılma

Bu reaksiyonlarda, merminin başlangıç ve son kinetik enerjisi aynıdır. Etkileşimden sonra, hem mermi hem de hedef çekirdekler temel durumdadır. Gelen parçacık, hedef çekirdeğin Coulomb alanı nedeniyle saptırılır. Diğer bir deyişle hedef ve mermi parçacıklar arasında enerji alışverişi olmamıştır ( $Q=0$ ) ve çekirdeklerin iç dinamiklerinde bir değişme meydana gelmemiştir (Satchler,1983).

#### 2.1.3.2 Esnek olmayan saçılma

Eğer mermi parçacığın enerjisi Coulomb bariyerini aşabilecek kadar güçlü ise hedef parçacığa bir miktar enerji verir ve buda hedef çekirdeğin uyarılmasına yol açar. Esnek olmayan saçılma durumunda  $Q$  değeri sıfırdan farklıdır.  $Q= -E_x$ , yani uyarılma

durumunun enerjisine eşittir. Diğer bir deyişle gelen parçacığın enerjisinin bir kısmı hedef çekirdeğin uyarılmış durumlarına gider (Satchler,1983).

### 2.1.3.3 Parçalanma (breakup) reaksiyonları

Eğer mermi çekirdek kompleks bir çekirdekse, reaksiyon sırasında iki veya daha fazla bileşene ayrılabilir. Yani  $A(a, xy)A$  veya mermi hedefi uyarırsa  $A(a, xy)A^*$  şeklinde yazılabilir. Burada mermi çekirdek  $a = x+y$  şeklinde iki parçaya ayrılmıştır. (Satchler,1983).

### 2.1.3.4 Transfer reaksiyonları

Bu reaksiyonlarda, mermi ve hedef çekirdek arasında bir veya daha fazla nükleon değişimi vardır. Nükleonlar mermiden hedefe aktarılırsa buna sıyırma (stripping) reaksiyonu denir. En yaygın sıyırma reaksiyonu (d,p) reaksiyonudur. Bu tip reaksiyonun sonucu, hedef çekirdeğe bir nötron sokmaktır ve bu nedenle bu reaksiyon basit nötron yakalama reaksiyonuna biraz benzerlik gösterir. Diğer sıyırma reaksiyonlarına ( $\alpha,t$ ), ( $\alpha,d$ ), vb. reaksiyonları örnek olarak gösterilebilir. Eğer nükleonlar hedeften mermiye aktarılırsa, bu durumda buna pick-up (alma) reaksiyonu denir. Tipik pick-up reaksiyonları (p,d), (p,t), ( $\alpha,{}^6\text{Li}$ ) vb. reaksiyonlarıdır. Transfer reaksiyonlarına esnek olmayan saçılma eşlik edebilir (Satchler, 1983).

### 2.1.3.5 Yakalama reaksiyonları

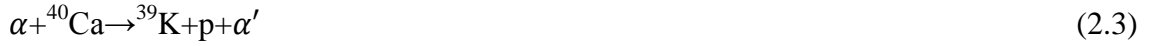
Bu tür reaksiyonlarda gelen çekirdek hedefle birleşerek uyarılmış yeni bir çekirdek oluşturur. Oluşan çekirdek kararlı hale geçebilmek için fazla enerjisini gama ışınları şeklinde yayar. Örnek olarak;



reaksiyonu verilebilir. Bu reaksiyonların dışında mermi ve hedef çekirdek birleşerek,



biçiminde ikiden fazla ürün çekirdek de oluşturabilir. Örnek olarak,



reaksiyonu verilebilir (Satchler, 1983).

### 2.1.3.6 Rezonans reaksiyonları

Bu tip reaksiyonlar direk reaksiyonlarla bileşik çekirdek reaksiyonları arasındaki reaksiyonlardır. Rezonans reaksiyonları belli enerji değerlerinde mümkündür. Her enerji değerinde rezonans olmaz. Rezonans durumunda etkileşim potansiyelinin oluşturduğu dalgaların fazı ve genliği bariyer içinde ve dışında yaklaşık eşittir. (Bayrak, 2004) Doğrudan reaksiyonlar ve bileşik çekirdek reaksiyonları, ağır iyonlarla ( $A \geq 4$ ) çok yaygın süreçlerdir (Satchler, 1983).

### 2.1.4 Denge öncesi reaksiyonlar

Denge öncesi reaksiyon ne direk ne de bileşik çekirdek reaksiyonudur. Bu tür reaksiyonlarda, parçacıklar bir nükleer etkileşimin ilk aşamasından (doğrudan reaksiyon) sonra, ancak istatistiksel dengeye (bileşik çekirdek oluşumu) ulaşılmadan çok önce salınır. Zaman ölçeği, çok hızlı doğrudan reaksiyonlar ile nispeten yavaş bileşik çekirdek oluşumu arasında bir orta düzeydedir. Bu reaksiyonlarda, mermi enerjisi hedefteki az sayıda nükleon arasında paylaşılır; vurulan nükleonlar, hedefle bir dizi reaksiyon başlatır ve bu sırada, bileşik çekirdek istatistiksel bir denge durumuna ulaşmadan önce bir parçacık yayabilir (Hodgson vd., 2003).

### 2.1.5 Fotonükleer reaksiyonlar

Fotonükleer reaksiyonlar, merminin bir foton olduğu ve yayılan parçacıkların yüklü parçacıklar veya nötronlar olduğu nükleer reaksiyonlardır. Bu tür reaksiyonlara; ( $\gamma$ , p), ( $\gamma$ , n), ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ), vb. reaksiyonlar örnek gösterilebilir (Hayward, 1970)

### **2.1.6 Ağır iyon reaksiyonları**

Ağır iyon kaynaklı reaksiyonlar genellikle bir alfa parçacığından daha ağır mermiler tarafından indüklenen reaksiyonlar olarak tanımlanır. Çalışılan mermi aralığı büyüktür, hafif iyonlar, C, O, Ne'den S, Ar, Ca gibi orta kütle iyonlarına kadar değişir. Ağır mermilere örnek olarak, Xe, Au ve hatta Uranyum verilebilir. Ağır iyonların neden olduğu reaksiyonlar, onları diğer reaksiyonlardan ayıran belirli özelliklere sahiptir. 5 MeV / nükleon veya daha fazla enerjide ağır bir iyonun dalga boyu uzunluğu, karşılaştırıldığında küçüktür. Sonuç olarak, bu iyonların etkileşimleri klasik olarak tanımlanabilir. Bu çarpışmalardaki açısal momentumun değeri nispeten büyüktür (Bass, 1980).

#### **2.1.6.1 Ağır iyon füzyon reaksiyonları**

Ağır iyon füzyon reaksiyonlarının meydana gelmesi için, etkileşen çekirdekler arasında Coulomb itmesi olduğu için gelen parçacığının hızlandırılması gerekir. Birkaç MeV / nükleon ile GeV / nükleon aralığında ağır iyon demeti üretebilen hızlandırıcılar vardır. Etki parametresi, etkileşen çekirdeklerin kütle merkezi arasındaki dikey mesafe olarak tanımlanabilir. Etki parametresi büyük olduğunda, Coulomb etkileri hakimdir ve Coulomb uyarımı meydana gelebilir. Hedefin ve merminin nükleer dalga fonksiyonlarında örtüşme başladığında, nükleer reaksiyonlar meydana gelir. Küçük etki parametresinde, bileşik çekirdek, çekirdekler tamamen örtüştüğünde oluşur. Bu çekirdeklerin tam füzyonunu temsil eder ve bir ara durum oluşur. Bununla birlikte, gelen iyon, itici Coulomb bariyerinin üstesinden gelmek için oldukça enerjik olmalıdır ve bu nedenle bileşik çekirdek oluşumu önemli ölçüde uyarma enerjisi ile mümkündür (Bass,1980)

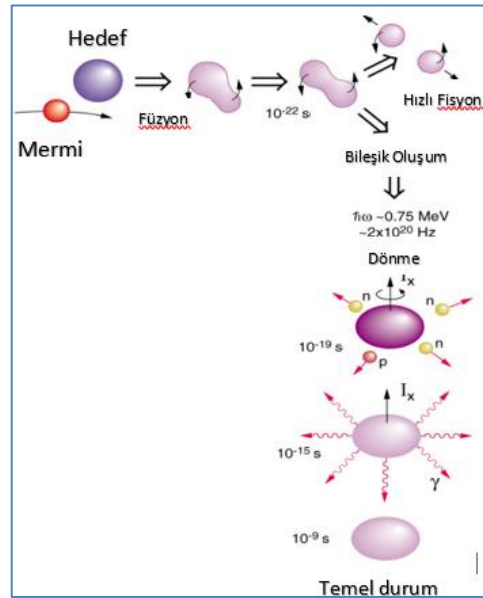
#### **2.1.6.2 Tamamlanmamış füzyon reaksiyonları**

Mermi ve hedef çekirdeklerin füzyonu sırasında, bunlardan birinin tamamen kaynaşmış bir sistemi oluşturmadan önce tek bir nükleon veya bir nükleonik küme yayması mümkündür. Bu tür süreçler, denge öncesi yayılım (nükleon yayılımı durumunda) veya tamamlanmamış füzyon (küme yayılımı durumunda) olarak adlandırılır. Mermi enerjisi arttıkça, bu süreçler daha önemli hale gelir ve genellikle 20 MeV / nükleonun

üzerindeki mermi enerjilerinde füzyona hâkim olurlar. Bu işlemlerin bir sonucu olarak, ortaya çıkan ürün çekirdek, tam füzyon olaylarına göre daha düşük bir momentuma sahiptir. Çarpışmadaki momentum transferinin ölçülmesi, bu fenomenin oluşumunun bir ölçüsü olarak hizmet eder. Yayılan parçacıkların spektrumunda, normal buharlaşma spektrumundaki yüksek enerjili bir kuyruk, başka bir işaret veya denge öncesi yayılım vardır (Lobo, 2016).

### 2.1.6.3 Füzyon buharlaşma reaksiyonları

Füzyon-buharlaşma reaksiyonu, yüksek açısal momentumda reaksiyon ürünlerinin üretilmesini sağladığı için nükleer haritanın nötron eksikliği olan bölgelerindeki nükleer özelliklerin spektroskopik ölçümlerinde kullanılan ana reaksiyondur. İki aşamalı bir süreç olarak düşünülebilecek bu reaksiyonda, mermi ile hedef çekirdeklerin füzyonu, kısa bir süre ( $\approx 10^{-18}$  s) yaşayan bir bileşik çekirdek üretir ve daha sonra yüklü parçacık (protonlar,  $\alpha$  parçacıkları, vb.) ve nötron yayarak bozunabilirler. Kalan çekirdek hala uyarılmış bir durumda olduğu için bir dizi  $\gamma$ -ışınları yayarak temel duruma döner. Reaksiyonun uygulanabilirliği, kütle merkezi referans çerçevesindeki kinetik enerjinin hedef mermi sisteminin Coulomb bariyerinden daha yüksek olmasına bağlıdır (Bass, 1980).



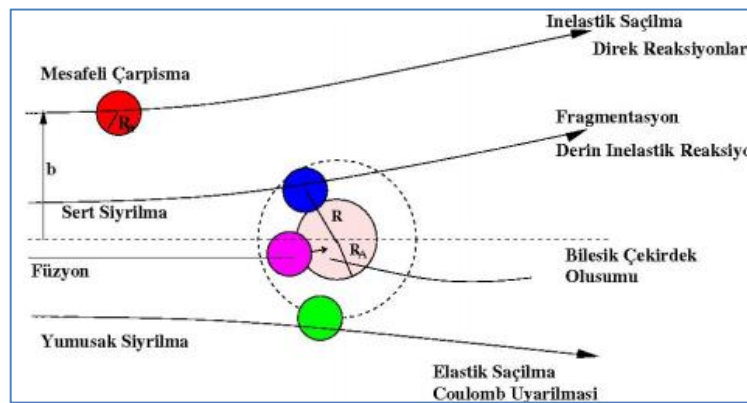
Şekil 2.1. Füzyon buharlaşma reaksiyonu şematik gösterimi (Garima, 2019)

#### 2.1.6.4 Derin esnek olmayan saçılma

Derin esnek olmayan saçılma, mermi parçacıkların nükleon başına 10 MeV civarındaki başlangıç enerjileri ile meydana gelen reaksiyonlarda gözlenebilir. Bu, biri mermi parçacığa benzer, diğeri ise hedef çekirdeğe benzer iki uyarılmış rezüdü üreten ikili bir olaydır. Derin esnek olmayan saçılma, iki çekirdek birbirini sert sıyırarak (grazing) çarpışma yaptığında meydana gelir. Bu çarpışmada iki çekirdek Coulomb alanı tarafından saptırılırlar ve sadece birbirlerine dokunurlar. Bu olayın önemli özelliklerinden birisi de iki çekirdeğin büyük miktarda enerji kaybetmesidir. Bu enerji kaybı iki iyonun yüküne bağlıdır (Bal, 2005).

#### 2.1.6.5 Radyoaktif mermi ile indüklenen reaksiyonlar (reactions induced by radioactive projectiles)

İzotop tablosunda birkaç yüz kararlı çekirdek vardır, ancak radyoaktif olan ve deneysel olarak faydalı yarı ömürleri olan birkaç bin çekirdek vardır. Son yıllarda, nükleer bilimde en hızlı büyüyen araştırma alanlarından biri, radyoaktif mermilerin neden olduğu nükleer reaksiyonların incelenmesi olmuştur. Bu çalışmalardaki ana cazibe, olağandışı  $N / Z$  oranlarına sahip reaksiyon ürünleri veya reaksiyon ara ürünleri oluşturma yeteneğidir. Çok proton zengini ya da çok nötron zengini tepkimeye giren çekirdeklerle başlayarak, yeni çekirdek bölgelerine ulaşılabilir ve özellikleri incelenebilir. Daha yüksek enerjilerde, ara türlerin izospini olağandışı olabilir ve izospinin yüksek düzeyde uyarılmış nükleer maddenin özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesine izin verir. (Bass,1980)



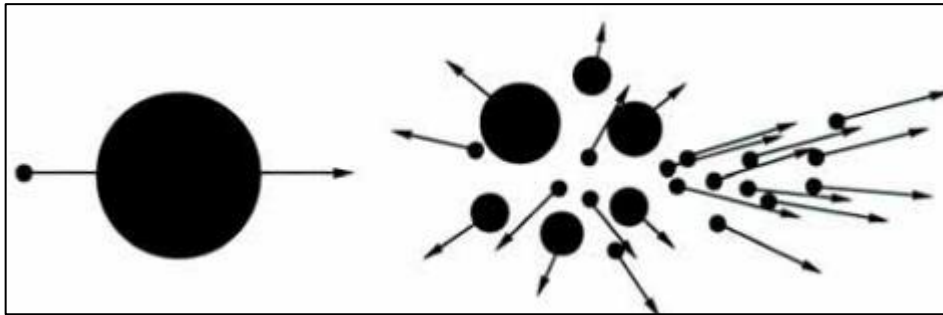
Şekil 2.2. Ağır iyon çarpışmalarının şematik gösterimi (Şahin, 2007)

## 2.1.7 Yüksek enerjili reaksiyonlar

Mermi enerjisi  $\leq 10$  MeV / nükleon ise nükleer reaksiyonun düşük enerjili reaksiyon olduğu ifade edilirken, mermi enerjisi  $\geq 400$  MeV / nükleon ise bu tür reaksiyonlar yüksek enerjili reaksiyonlar olarak adlandırılır. Mermi enerjisi 20 ~ 250 MeV / nükleon olan mermilerin neden olduğu reaksiyonlara ara enerji reaksiyonları denir. Düşük ve yüksek enerjili reaksiyonları ayıran nedir? Düşük enerjili nükleer çarpışmalarda, merminin nükleonları, tüm hedef çekirdekle veya ortalama nükleer kuvvet alanı ile etkileşime girer. Yüksek enerjili bir reaksiyonda ise, merminin nükleonları, hedef çekirdeğin nükleonları ayrı ayrı nükleon-nükleon çarpışması şeklinde etkileşime girer (Bass, 1980).

### 2.1.7.1 Dökülme/parçalanma reaksiyonları

Bir parçalanma (fragmentasyon) veya dökülme (spallasyon) reaksiyonunda bir hedef çekirdek yüksek enerjili bir mermi (proton veya ağır iyon) tarafından vurulur. Reaksiyonun hızlı adımında uyarılmış ara çekirdekler oluşur. Parçacıklar kararlı son parçacıklara ikinci bir adımda bozunurlar. Dökülme reaksiyonları, nükleer maddenin hal denklemini ve termal kararsızlıklarını incelemek için ideal bir araçtır. Astrofizikte kozmik ışınların yıldızlararası ortamın, orijinal bileşimini ve üretim mekanizmalarını çıkarabilmek için ayrıntılı olarak anlaşılması gerekir. Son zamanlarda nötron kaynaklarının gelişmesiyle birlikte 1 GeV civarında protonlarla dökülme reaksiyonlarına ilgi yeniden artmaktadır (Kelic vd., 2007).



Şekil 2.3. Dökülme (spallasyon) reaksiyonunun şematik gösterimi (Kelic vd., 2007)

### 2.1.7.2 Çoklu parçalanma (multifragmentasyon) reaksiyonları

Nükleer çoklu parçalanma, orta ve yüksek enerjilerde ağır iyon çarpışmalarında reaksiyon mekanizmasını anlamak için önemlidir. Mermi ve hedef çekirdeklerin çarpışması nedeniyle, uyarılmış bir nükleer sistem oluşur. Uyarma enerjisi birkaç MeV / nükleondan büyükse, farklı kütleli birçok nükleer parçaya ayrılır. Bu durum, nükleer çoklu parçalanma olarak bilinir. Burada "çoklu", "ikiden fazla" anlamına gelir. Genel olarak, nükleer fizyon işleminde, bileşik çekirdek iki fizyon fragmanına ayrılır. Bu nedenle, çoklu parçalanma, fizyonun daha yüksek enerjili versiyonu olarak da düşünülebilir. Genellikle nükleer çoklu parçalanma reaksiyonlarında, parçacık hızlandırıcıdan üretilen mermi ışınının gerekli enerjisi birkaç MeV / nükleondan birkaç GeV / nükleona kadar değişir. Nükleer çoklu parçalanma reaksiyonunda yer alan zaman ölçekleri en çok birkaç yüz fm / c ( $1 \text{ fm} / c = 3,33 \times 10^{-24} \text{ s}$ ) düzeyindedir (Chaudhuri vd., 2014).

### 2.2 Nükleer Reaksiyon Tesir Kesiti

Reaksiyon tesir kesiti nükleer reaksiyon çalışmasında en önemli niceliktir. Reaksiyon tesir kesiti, belirli bir reaksiyonun meydana gelme olasılığının bir ölçüsüdür. Bir reaksiyonun meydana gelme olasılığı, rastgele bir merminin hedefe çarpma olasılığına benzer. Ne yazık ki, bir nükleer tesir kesiti, kuantum mekaniksel etkiler nedeniyle bundan biraz daha karmaşıktır. Atomik ölçeklerde maddenin dalga özellikleri önemli hale gelir ve parçacıklar arasındaki etkileşimleri güçlü bir şekilde etkiler. Bu, belirli bir hedef için hedefin boyutunun merminin enerjisine, mermi türüne ve hedefin türüne ve etkileşim türüne bağlı olarak değiştiği anlamına gelir (Meyerhof, 1967).

$A(a,b)B$  şeklinde sembolize edilen bir nükleer reaksiyon ele alındığında,  $A$  ( $N$  tane nükleonu olan) hedef çekirdek üzerine birim zamanda gelen parçacıkların akısı  $I_a$  olan bombardıman parçacıkları gönderildiğinde tepkime sonucu oluşan parçacıkların birim zamandaki sayısı  $R_b$  ise;  $R_b$ ,  $I_a$  ve  $N$  ile orantılı olacaktır. Bu orantı sabitine tepkime tesir kesiti denir ve alan boyutundadır. Tepkime tesir kesiti bir nükleer reaksiyonun bağıl oluşma olasılığını verir ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir (Meyerhof, 1967).

$$\sigma = \frac{Rb}{IaN} \quad (2.4)$$

Tesir kesit Birimi barn' dır ve b ile gösterilir. (1 barn =  $10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$ ).

Gelen parçacıklar hedef çekirdekle etkileştiklerinde, her zaman sadece bir tür nükleer reaksiyon meydana gelmesi beklenmez. Eğer birden fazla türde reaksiyon meydana gelmişse her bir tür için tesir kesiti genellikle farklı olacaktır. Bu özel tesir kesitlere kısmi-tesir kesitler denir ve toplam tesir kesit bunların toplamına eşittir. Bir hedef çekirdeğe ( $\theta, \varphi$ ) doğrultusunda sadece  $d\Omega$  katı açısına sahip olan bir dedektör yerleştirilirse, bu dedektör tepkimede yayınlanan tüm b parçacıklarını algılayamaz. Dedektör tarafından gözlenen, b parçacıklarının yalnızca küçük bir kesri,  $dR_b$  olacaktır. Dolayısıyla, dedektör tarafından ölçülen de tepkime kesitinin küçük bir kesri olan  $d\sigma$  'dır. Yayınlanan b parçacıkları, uzaya izotropik olarak değil de  $\theta, \varphi$  doğrultularında yayınlanırsa bu yayınlanmanın açısal dağılımı  $r(\theta, \varphi)$  fonksiyonu ile temsil edilir.  $d\Omega$  katı açısı içine yayınlanan  $dR_b$  kesri,

$$dR_b = r(\theta, \varphi)d\Omega / 4\pi \quad (2.5)$$

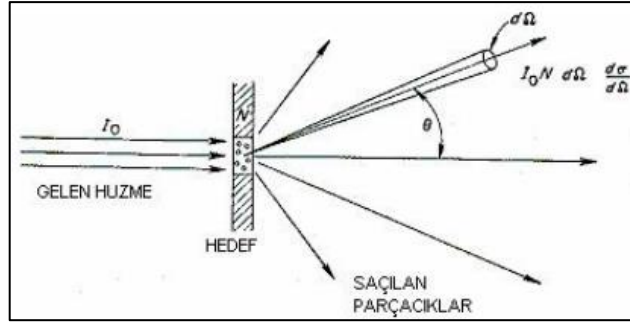
ile verilir. (2.4) eşitliğinden

$$d\sigma = \frac{dR_b}{IaN} \quad (2.6)$$

yazılır. Buradan;

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \varphi)}{4\pi I_a N} \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır. Burada niceliği  $d\sigma / d\Omega$  diferansiyel tesir kesit olarak adlandırılır (Meyerhof,1967).



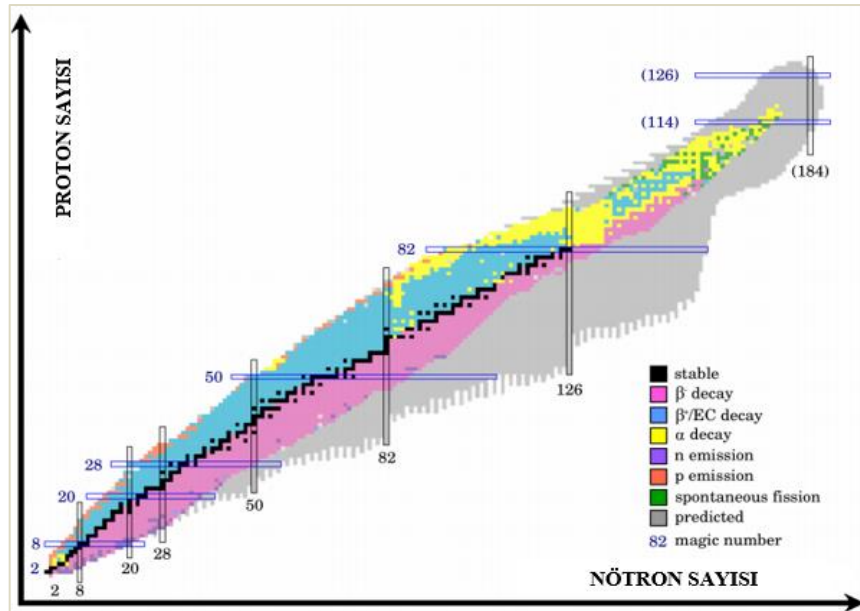
Şekil 2.4. Diferansiyel tesir kesitinin gösterimi (Kılıç, 2004)

## BÖLÜM III

### KARARLILIK VADİSİ VE ÇEKİRDEK SENTEZİ

#### 3.1 Kararlılık Vadisi

Nükleon adı verilen protonlar ve nötronlar, bir çekirdekte sıkıca paketlenmiştir. Yaklaşık  $10^{-14}$  metre yarıçaplı bir çekirdek, tüm atomun yaklaşık  $10^{-10}$  metre olan yarıçapına kıyasla oldukça küçüktür. Pozitif yüklü protonları çekirdeğin çok küçük hacminde bir arada tutmak için çok güçlü çekici kuvvetler gerekir, çünkü pozitif yüklü protonlar birbirlerini bu kadar kısa mesafelerde güçlü bir şekilde iterler. Çekirdeği bir arada tutan çekim gücü, güçlü nükleer kuvvettir. Bu kuvvet protonlar arasında, nötronlar arasında ve protonlar ile nötronlar arasında mevcuttur. Pozitif yüklü bir çekirdeğin etrafında negatif yüklü elektronları tutan elektrostatik kuvvetten çok farklıdır.  $10^{-14}$  m' den küçük mesafelerde ve çekirdek içinde, güçlü nükleer kuvvet protonlar arasındaki elektrostatik itici güçlerden çok daha güçlüdür; daha büyük mesafelerde ve çekirdeğin dışında, esasen yoktur.(Flowers vd., 2019)



Şekil 3.1. Kararlılık vadisi (Thornthwaite, 2014)

Kararlı çekirdekler için nötron sayısı ile proton sayısı arasındaki bu grafik, kararlı izotopların dar bir banda düştüğünü ortaya koymaktadır. Bu bölge, kararlılık (stabilite)

bandı olarak bilinir (aynı zamanda kararlılık vadisi olarak da adlandırılır). Şekil 3.1'deki düz çizgi, 1: 1 nötron / proton oranına sahip çekirdekleri temsil eder (N/P oranı). Daha hafif kararlı çekirdekler genel olarak eşit sayıda proton ve nötron içerir. Örneğin, nitrojen-14'ün yedi protonu ve yedi nötron vardır. Bununla birlikte, daha ağır kararlı çekirdekler, giderek protonlardan daha fazla nötron içerir. Örneğin: kararlı nüklid demir-56, 30 nötron ve 26 protona sahiptir, N/P oranı 1,15 iken, kararlı nüklid kurşun-207, 125 nötron ve 82 protona sahiptir, N/P oranı 1,52'ye eşittir. Bunun nedeni, daha büyük çekirdeklerin daha fazla proton-proton itmeye sahip olması ve bu elektrostatik itmelerin üstesinden gelmek ve çekirdeği bir arada tutmak için telafi edici güçlü kuvvetler sağlamak için daha fazla sayıda nötron gerektirmesidir. (Flowers vd., 2019)

Kararlılık bandının dışındaki çekirdekler kararsızdır ve radyoaktivite sergilerler: kendiliğinden değişir veya kararlılık bandında veya ona yakın olan diğer çekirdeklere bozunurlar. Bu nükleer bozunma reaksiyonları, bir kararsız çekirdek veya radyonüklidi, genellikle daha kararlı olan başka bir çekirdek haline dönüştürür. (Flowers vd., 2019)

### 3.2 Çekirdek Sentezi

Nükleer Astrofiziğin temel amacı, elementlerin nereden geldiğini, nasıl oluştuğunu ve gözlenen miktarlarını açıklamaktır. Yıldızlarda çekirdek sentezi teorisi, element oluşumu için büyük patlamadan hemen sonra  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$  ve az miktarda  $^6\text{Li}$  gibi birkaç hafif elementin oluştuğunu ve bu hafif elementlerin daha sonraki element sentezi için kaynak oluşturduğunu kabul eder. Daha ağır elementlerin sentezi yıldız merkezindeki füzyon reaksiyonları (yanmalar) ile gerçekleşir. H-yanması, He-yanması, C-yanması, Ne-yanması, O-yanması ve Si-yanması, Fe ve Ni grubuna kadar olan elementlerin ( $A < 60$ ) sentezi için temel aşamalardır (Wallerstein vd., 1997). Fe ve Ni nükleon başına en yüksek bağlanma enerjisiyle en kararlı çekirdekler olduğundan, daha ağır elementler ( $A > 60$ ) ardışık nötron yakalama reaksiyonları ve  $\beta^-$  bozunmaları ile üretilir. Nötron yakalama süresine bağlı olarak bu süreç iki grupta incelenir: yavaş nötron-yakalama, s-süreci (yavaş) ve hızlı nötron-yakalama r-süreci (hızlı) olarak adlandırılır. Bu iki süreç, (Burbidge vd., 1957) ve bu gruptan bağımsız olarak (Cameron, 1957) ileri sürülmüştür. Fakat nötron yakalama reaksiyonları ile üretilmeyen  $^{74}\text{Se}$  ile  $^{196}\text{Hg}$  arasında 35 tane proton bakımından zengin çekirdeklerin sentezi p-süreci modeli ile açıklanmaktadır. Ağır çekirdeklerin sentezi ( $A > 60$ ) birbirinden farklı bu üç çekirdek sentez mekanizması

ile farklı koşullar ve ortamlarda gerçekleşir (Cameron, 1957)

### 3.2.1 S-süreci

Nötronlar kararlı bir çekirdeğe eklenirse, ürün çekirdeğinin kararsız hale gelmesi ve nötronun bir protona dönüştürülmesi çok uzun sürmez. Bir çekirdeğin dışında, bir nötron, beta bozunması ( $\beta$ -bozunması) adı verilen bir süreçle bir proton ve bir elektrona bozunur. Çekirdeğin içinde çok fazla nötron yoksa kararlı olabilir. Yavaş nötron yakalamada, nötronlar, kararsız bir çekirdek oluştuğunda, başka bir nötron eklenmeden önce beta bozunumu yapar (Meyer, 1994).

Yavaş nötron-yakalama süreci, ardışık iki nötron-yakalama arasında geçen sürenin, s-süreci yolu üzerindeki çekirdeklerin tipik  $\beta^-$  bozunumu sürelerinden ( $\sim 10^5$ -  $10^7$  saniye) daha uzun olduğunu kabul eder (Meyer,1994). Böylece s-süreci ile kararlılık eğrisi üzerindeki çekirdeklerin sentezi gerçekleşir. Bir çekirdek nötron yakaladığında, bir diğer nötron yakalamadan önce  $\beta^-$  bozunumuna karşı kararsız hale gelir. Bu yolla üretilen çekirdeklere s- çekirdekleri denir. S-süreci,  $^{209}\text{Bi}$ 'a kadar çekirdek sentezine devam eder ve tekrar geriye doğru  $\alpha$  bozunumuna uğrar. s-süreci için uygun nötron yoğunluğu  $10^8$ -  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  aralığında ve sıcaklık  $\sim 2,5 \times 10^8 \text{ K}$ 'dir ve bu koşulların sağlandığı ortama en iyi örnek AGB yıldızlarıdır (Asymptotic Giant Branch). Nötron yakalama, yıldız evriminin sessiz bir aşamasında meydana gelirse, beta bozulmalarının meydana gelmesi için bolca zaman olacaktır ve bir s-süreci sonuçlanacaktır. s-süreci için mümkün iki nötron kaynağı vardır. Bunlar  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  ve  $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$ ' dir. Bu nötronlar daha önce yıldızda var olan çekirdeklerle reaksiyona girerek s-çekirdeklerini oluşturur. s-süreci hesaplamaları, gözlemsel güneş sistemi element bollukları ile uyum içerisindedir (Meyer, 1994).

Eğer nötronlar, r-sürecinde olduğu gibi daha hızlı eklenebilirse, oluşan kararsız çekirdekler, ek nötronlar eklenmeden önce, sonunda başka bir nötron kabul etmeyecek bir çekirdek üretilinceye kadar bozunamaz. Bununla birlikte, bu çekirdek eninde sonunda beta bozunmasına maruz kalacak ve böylece daha fazla nötron yakalanmasına izin verecektir.

### 3.2.2 R- süreci

$^{209}\text{Bi}$  üzerindeki çekirdekler gibi s-süreci ile üretilemeyen nötron bakımından zengin çekirdekler, hızlı nötron yakalama süreci (r-süreci) ile üretilir.  $A > 60$  olan çekirdeklerin yaklaşık yarısının sentezinden r-süreci sorumludur. Bu süreçte, nötron yakalama  $\beta^-$  bozunumundan çok daha hızlıdır. Bu yüzden r-süreci ile kararlılık eğrisi altındaki ve  $^{209}\text{Bi}$  den daha ağır elementler üretilir. Çok büyük nötron yoğunluğu  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  ve sıcaklık  $10^9 \text{ K}$  gerektiğinden, r-sürecine uygun ortamlar süpernova ve çarpışan nötron yıldızları gibi patlayan ortamlardır. Patlayıcı bir durumda nötron yakalama meydana gelirse, zaman ölçeği o kadar kısa olacaktır ki, reaksiyonun bir r-süreci olması gerekecektir. Bu yüksek sıcaklık ve nötron yoğunluğu altında hızlı nötron yakalama reaksiyonları,  $(n,\gamma)$  ve  $(\gamma,n)$  reaksiyonları dengeye ulaşmaya kadar devam eder ve ardışık  $\beta^-$  bozunmaları ile kararlı çekirdekte son bulur. r-süreci, ağır elementlerin nötron açısından en zengin izotoplarını üretirken, s-işlemi tarafından üretilen izotoplar nispeten daha fazla protona sahip olma eğilimindedir. Doğal olarak radyoaktif çekirdekler, r-süreci tarafından üretilir (Cowan vd.,1991).

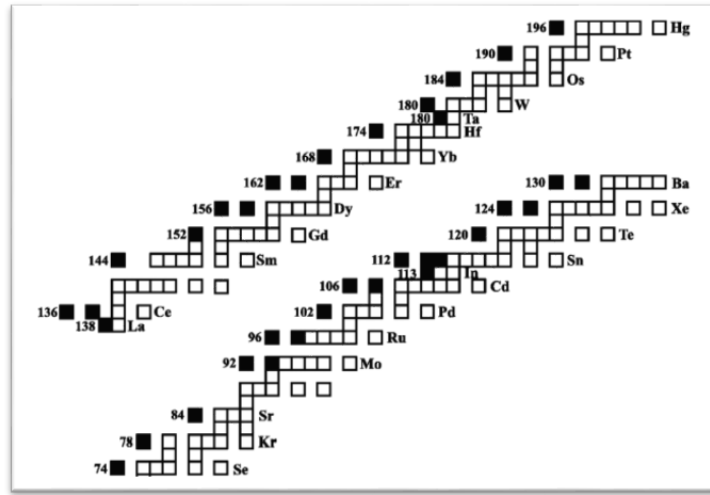
### 3.2.3 P- süreci

Tüm izotoplar nötron yakalama reaksiyonları ile üretilemez. p-çekirdekleri olarak adlandırılan yaklaşık 35 izotop, kararlı izotoplar tarafından s / r sürecinin  $\beta^-$  bozunma zincirlerinden korunur (Burbidge vd., 1957; Arlandini vd., 1999; Cowan vd., 1991). Tarihsel olarak bu izotoplar, proton yakalama reaksiyonları (dolayısıyla "p-süreci") yoluyla üretime atfedilmiştir (Burbidge vd., 1957), ancak proton yakalama reaksiyonlarının Coulomb bariyerini aşması gerektiğinden, gözlemi yeniden üretmek için yüksek proton yoğunlukları ve enerjiler gereklidir. (Arnould ve Goriely 2003; Audouze ve Truran 1975).

Kararlılık eğrisinin üzerinde kalan proton bakımından zengin  $\sim 35$  kararlı çekirdek sentezi temelde 2 farklı alt süreçle açıklanır. İlki, Fe sonrası hafif çekirdeklerin bir seri proton yakalama ve  $\beta^+$  bozunumundan oluşan hızlı proton yakalama rp- sürecidir. İkincisi, s-süreci ve r-süreci ile üretilen ağır çekirdeklerin bir seri  $(\gamma,n)$ ,  $(\gamma,p)$ ,  $(\gamma,\alpha)$  foton yakalama reaksiyonları ve  $\beta^+$  bozunumundan oluşan  $\gamma$ -sürecidir.  $A < 108$  çekirdeklerin

sentezi rp-süreci ile,  $A > 108$  çekirdeklerin sentezi ise  $\gamma$ -süreci ile açıklanır. p-süreci büyük kütleli yıldızların gelişimlerinin patlama evresinde gerçekleşir. Bu şekilde patlayan bir ortamdaki çekirdek sentezi çok büyük reaksiyon ağları içerir ve reaksiyon hızları bilgisi bu çalışmalar için gereklidir (Woosley ve Howard,1978).

p-süreci, çekirdek sentezi süreçleri içinde en az bilinenidir. p-süreci çekirdeklerinin (p-çekirdekleri) güneş sistemindeki miktarı s-çekirdekleri ve r-çekirdeklerinden 10-100 kez daha az olması ve proton bakımından zengin kararsız çekirdekler olması nedeniyle, p-çekirdekleri ile ilgili özellikle deneysel çalışmalar daha azdır. Deneysel verilerin az olması nedeniyle p-süreci çekirdek sentezi simülasyonları ve ilgili reaksiyon hızlarının hesaplanması daha çok Hauser Feshbach istatistiksel model hesaplamalarından elde edilen teorik tesir kesit hesaplamalarına bağlıdır. Orta büyüklükteki çekirdeklerin proton yakalaması tesir kesiti hesaplamaları genellikle gözlenen bolluklar ile uyum içinde iken, alfa yakalama tesir kesit hesaplamaları ile gözlenen değerler arasında uyumsuzluklar vardır (Somorjai vd., 1998; Rapp vd., 2002; Özkan vd., 2002). Bu amaçla daha çok deneysel çalışmalara, özellikle yüklü parçacık yakalama tesir kesiti ölçümlerine ihtiyaç vardır.



**Şekil 3.2.** p-çekirdeklerinin şeması (siyah dikdörtgenler). Semboller sadece p-izotopu olan elementler için verilmiştir. Görüntülenen sayılar, bu elementlerin en hafif p-izotopunun A kütle numarasını gösterir (Tsagari vd., 2004)

### 3.3 Egzotik Çekirdekler

Nükleer haritadaki radyoaktif çekirdekler, bir asır önce radyoaktivitenin keşfedilmesinden bu yana, temel araştırmalardaki birçok farklı çalışmanın ve çeşitli alanlardaki birçok uygulamanın köşe taşları olmuştur. Nükleer yapı çalışmaları, güçlü bir şekilde etkileşime giren sonlu kuantum çok cisim sistemi ve atom çekirdeğindeki çekirdekler ile temel kuvvetler arasında hareket eden kuvvetler arasındaki ilişkiyi daha derin bir şekilde anlamayı amaçlamaktadır. Son zamanlarda, nükleer haritanın sınırlarında proton, nötron kararlılık hatlarının yakınındaki çekirdeklere ilginin arttığı görülmektedir. Çekirdeklerin kararlı ya da kararsız çekirdek olması sahip oldukları nötron ve proton sayılarının oranı ile açıklanır. Nötron ve proton sayıları oranı ( $N / Z$ ) hafif çekirdekler için bire yakın iken ağır çekirdekler için bu oran 1,5 civarındadır. Bu oranlardan sapmalar çekirdeğin kararlı yapıdan kararsız yapıya doğru gitmesine yol açar. Çekirdeğin kararlılığı ile ilgili olarak nükleer çizelge oluşturulmuştur. Bu kararlılık çizgisine yakın çekirdeklerle yapılan deneyler, teorik modellerin gelişimine rehberlik edecek ve bunların uygulanabilirliğini test edecek kritik bilgileri ortaya çıkaracaktır. 1985 yılında Tanihata ve arkadaşları tarafından yapılan deneyler sonucunda kararlı çekirdeklerden farklı özellikler gösteren çekirdeklerin varlığı tespit edilmiştir. Bu çekirdekler kararlı çekirdeklere benzer özellikler göstermesinin yanı sıra birçok farklı özellikleri de bulunan çekirdekler keşfedilmiştir. (Tanihata vd., 1985a; Tanihata vd., 1985b; Otsuka, 2013).

Kararlı çekirdeklerden farklı özellikler gösteren bu çekirdekler halo ya da egzotik çekirdekler olarak adlandırılır. Egzotik çekirdekler yapı olarak merkezde sıkı bağlı bir kor ve çevresinde zayıf bağlı nükleonlardan oluşmaktadır. Oluşan bu haleli yapıdan dolayı egzotik çekirdeklere halo çekirdek de denilmektedir. Nötronca zengin olan yani zayıf bağlı nükleonu nötron olan çekirdeğe nötron egzotik çekirdek, zayıf bağlı nükleonu proton olan çekirdeğe proton egzotik çekirdek tanımlaması yapılır. Nötron egzotik çekirdekler kararlılık vadisinin sağında, proton egzotik çekirdekler ise kararlılık vadisinin solunda bulunur. Egzotik çekirdeklerin bu farklı yapısı yeni karakteristiklere yol açar (Ibraheem vd., 2007).

Egzotik çekirdekler, son derece düşük tesir kesitleri ve aynı hedefte istenmeyen türlerin ezici üretimi nedeniyle üretilmesi ve üzerinde çalışılması son derece zordur. Ancak son

teknik gelişmeler, özelliklerinin incelenmesine izin veren koşullarda bir dizi egzotik çekirdek üretmeyi mümkün kılmaktadır. Egzotik çekirdekler zayıf bağlanma enerjisine sahiptir. Ancak etkileşimde tesir kesiti üzerinde büyük etkileri bulunmaktadır. Bu çekirdekler zayıf bağlı oldukları için güçlü Coulomb ya da nükleer alanla karşılaştıklarında kolay parçalanabilirler. Nötron halo çekirdekler için son nükleonun bağlanma enerjisi oldukça küçüktür. Kararlı çekirdekler için 6-8 MeV civarındayken nötron halo çekirdekler için ise bu değer 1 MeV den daha küçüktür. Bir nötronlu  $^{11}\text{Be}$  egzotik çekirdeğinin nötron ayrılma enerjisi 0,5 MeV ve  $^{11}\text{Li}$  egzotik çekirdeğinin iki nötron ayrılma enerjisi 0,3 MeV kadardır. Proton halo çekirdeklerde proton fazlalığından dolayı Coulomb bariyeri meydana gelebilir. Bu nedenle nötron halo çekirdeklere göre bağlanma enerjileri daha büyüktür (Tanihata, 1996).

### **3.3.1 Egzotik çekirdek üretimi**

Radyoaktif çekirdeklerin üretimi için geniş bir enerji aralığında çeşitli nükleer reaksiyonlar kullanılır. En yaygın hüzme (bombardıman parçacıkları) nötronlar, protonlar, döteronlar ve ağır iyonlardır. Enerji, Coulomb bariyer enerjileri üzerindeki termal enerjilerden görece enerjilere kadar değişir. Üretim aşamasından sonra radyoaktif çekirdekler manipüle edilir ve deney için hazırlanır. Bu nedenle, tüm bu süreç mümkün olduğu kadar aşağıdaki kriterleri sağlamalıdır (Duppen, 1997).

#### *Yüksek üretim oranı*

Tesir kesit, doğası gereği bir sayı olduğundan, hüzme-hedef kombinasyonu optimize edilmelidir. Ayrıca, en yüksek hüzme yoğunluklarını sağlayabilen hızlandırıcılar kullanılmalı ve aracın güç birikimi ile baş edebilecek hedef sistemler geliştirilmelidir (Duppen, 1997).

#### *Yüksek verim*

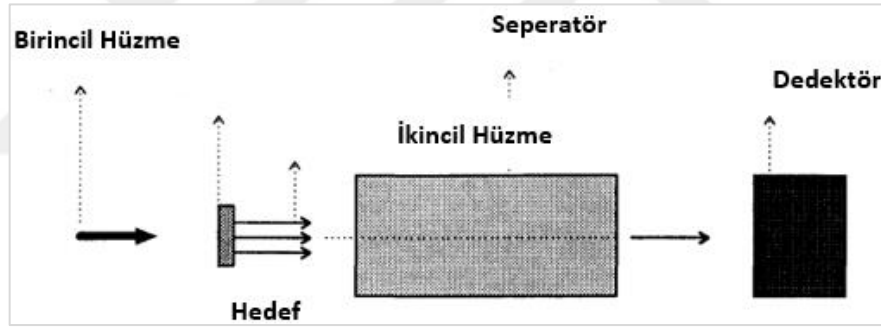
Çok egzotik çekirdeklerin üretim hızı her zaman marjinal olacaktır. Bu nedenle, reaksiyon ürünlerinin herhangi bir şekilde etkilenmesi (örneğin. ayıklanması, dedeksiyon sistemine taşınması) incelenmek istenen birkaç değerli çekirdeği kaybetmemek için çok verimli olmalıdır (Duppen, 1997).

## Hız

Tüm damlama hattına yakın çekirdeklerinin genel bir özelliği, son derece kısa yarı ömürlerdir ( $\mu$ -saniye ile saniye aralığı). Bu nedenle, üretim süreci ile deney arasında gerçekleşen tüm süreçler, birincil faaliyetin çoğunu kaybetmemek için son derece hızlı olmalıdır (Duppen, 1997).

## Seçim

Üretim süreci genel olarak seçici değildir ve ilgili egzotik çekirdek, üretilen toplam çekirdek miktarının yalnızca bir kısmıdır. Her deneyde pik / arka plan oranı çok önemli olduğundan, deneysel düzene gönderilen hüzmeye ideal bir durumda yalnızca ilgili çekirdeklerden oluşmalıdır. Bu nedenle tüm üretim süreci element ve izotop seçici olmalıdır (Duppen, 1997).



**Şekil 3.3.** Egzotik çekirdek üretimi için bir deneyin şematik gösterimi (Duppen, 1997).

Egzotik çekirdekler üretmek için birkaç nükleer reaksiyon kullanılır. Farklı reaksiyon mekanizmaları, çekirdek haritasında farklı bölgelere yol açar. Örneğin, fizyon reaksiyonları nötron açısından zengin çekirdekler üretirken, hafif iyonların neden olduğu spallasyon (dökülme) reaksiyonları ağırlıklı olarak nötron eksikliği olan diğer deyişle proton zengin çekirdekler üretir (Duppen, 1997).

### **3.3.1.1 Deneysel teknikler**

Nükleer fizik çalışmalarının esasını nükleer reaksiyonlar oluşturur. Reaksiyon, bir çekirdeğin başka bir çekirdekle birleşmesi veya çarpışması ile meydana gelir ve ortaya

bir başka bir çekirdek veya ürün çıkar. (Reaksiyon türleri bir önceki bölümde detaylı bir şekilde ele alındı). Çekirdek haritasında kararlılık bölgesine uzakta bulunan çekirdeklerin üretiminin yöntemleri, büyük oranda kararlı çekirdeklerin veya onların iyonlarının dahil olduğu nükleer reaksiyonları temel almaktadır. Yeni bir çekirdeğin oluşumu ya iki farklı çekirdeğin (mermi ve hedef) füzyonu ya da nükleonların (fragmentasyon, parçalanma, fizyon yoluyla ya hedeften ya da mermi görevi gören çekirdekten) çekirdekten uzaklaştırılmasına sebep olan reaksiyonu ile mümkün olur. Reaksiyon yoluyla yeni bir ürün elde etmek amacıyla çeşitli deneysel yöntemler vardır. En bilinenleri sırasıyla aşağıda özetlenmiştir (Pfützner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

### Füzyon Buharlaşma

İki çekirdek düşük bir enerjiyle bir merkezde çarpıştırılır, iki çekirdek füzyon yoluyla birleşir ve tek bir ağır çekirdek oluşur. İkinci adımda, bileşik çekirdek nükleonların meydana getirdiği emisyon (buharlaşma) vasıtasıyla kendi uyarılma enerjisini açığa çıkarır. Reaksiyon tesir kesiti mermi-hedef sistemindeki başlangıç enerjisine çok duyarlıdır, bu enerjinin Coulomb bariyerine yakın olması gereklidir. Eğer enerji çok düşük ise bariyer penetrasyonunun olasılığı dramatik biçimde düşer. Bu süreç süper ağır elementlerin reaksiyonundaki anahtar rol oynar. Bununla beraber, ortaya çıkan bileşik çekirdek, nihai ürün, çekirdek haritasının kararlılık bölgesinde nötronca-zayıf çekirdeklerin bulunduğu kısımda yer alma eğiliminde olduğundan füzyon-buharlaşma yöntemi nötronca-zayıf sistemlerin üretiminde kullanılan başarılı olmaktadır. Bu yöntem, bu tez çalışmasında çalışılacak olan PACE4 (Gavron, 1980) dahil nükleer reaksiyon modelleme kodlarında büyük oranda kullanılmaktadır. (Pfützner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003)

### Çoklu Nükleon Transferi

Yarı esnek ya da aşırı esnek olmayan süreç olarak da adlandırılır. Coulomb bariyeri enerji seviyelerinde meydana gelen çoklu nükleon transfer reaksiyonları, nötronca zengin çekirdekler gibi çekirdek haritasının kararlılık bölgesinden uzakta bulunan kararsız çekirdeklerin üretiminde kullanılır. Radyoaktif hüzmelere yönelik son yıllarda yapılan çalışmaların gelişimine olan katkısı nedeniyle bu reaksiyonun önemi

artmaktadır. (Pfütznner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

### Fragmantasyon

Bu yöntem radyoaktif hüzme alanında kullanılan araç ve gereçler için temel reaksiyon yöntemlerinden biridir. Yüksek enerjili, mermi görevi gören çekirdeğin iyonları üzerine gönderilen hedef çekirdekle çarpıştığında, çarpışmaya bağlı aşınma evresinden kurtulan mermi benzeri parçalanmalar neredeyse hızlarında değişme olmadan hareketlerine devam ederler. Böylece nihai kararsız çekirdekler ikincil bir hüzme meydana getirir ki bu hüzme iyon optik donanımlar yardımıyla tahliye edilmiş ve filtrelenmiştir. (Pfütznner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

### Parçalanma

Nükleon başına 100 MeV seviyesinde ve daha yüksek enerji seviyelerinde gerçekleşen yüksek enerjili bir çarpışmada reaksiyon bileşenlerinden proton, döteron ya da triton gibi hafif bir iyon meydana geliyorsa bu sürecin adına parçalanma denir. Egzotik çekirdeklerin üretim perspektifinden hareketle, parçalanma yönteminin mermi fragmantasyonundan temel farkı hedef görevi gören çekirdeklerin daha ağır bileşenlerinin radyoaktif çekirdeklerin kaynağı olmalarıdır. Parçalanma yönteminde ilk evre, mermi görevini yerine getiren parçacığın tetiklediği ve hedef çekirdeğindeki nükleonlar arasındaki çarpışmalar silsilesidir. İkinci evrede ise, üst seviyede uyarılmış bir duruma öncülük eden çarpışmalar dizisi birden uyarılmışlık durumundan çıkan bir duruma dönüşür. Bunun sonucu olarak hedef çekirdek yok olur ve fragmantasyon yönteminde meydana gelen sürece benzer biçimde hedef çekirdeğin N ve Z sayılarından daha küçük N ve Z sayılarına sahip herhangi bir çekirdek ortaya çıkmış olur. Bu genellemeye göre, parçalanma yöntemi radyoaktif hüzme çalışmalarında yararlanılan ürün oluşturan ikinci temel süreç olarak söylenebilir. Fragmantasyon yönteminin aksine, radyoaktif ürünler hedef görevi gören maddeden ayıklanmış olmak zorundadır. (Pfütznner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

## Fizyon

Daha ağır kararlı çekirdekler, daha hafif olanlara nazaran daha fazla nötronca zengin olduğu için ağır bir çekirdeğin maruz kaldığı fizyon süreci nötronca zengin ortalama kütleyle sahip çekirdeklerin kaynağını teşkil eder. Buna ek olarak, fizyon süreci uyarılmış ağır elementlerin bozunuma uğrayan önemli kaynaklarından birisidir. Yani bu sürecin, egzotik çekirdeklerin doğrudan kaynağı olmasına ve bu amacın gerçekleşmesi için kullanılan diğer reaksiyonlarla etkileşim kuran bir süreç olmasına yönelik önemli bir rolü olduğu söylenebilir. Nötronca-zengin çekirdekler oluşturmaya yarayan fizyon uygulamaları, parçalanabilir bir çekirdeği uyarmak için kullanılan yöntemlerde ve açığa vurulmuş olan uyarılma enerjilerinin aralığında farklılaşma gösterir.

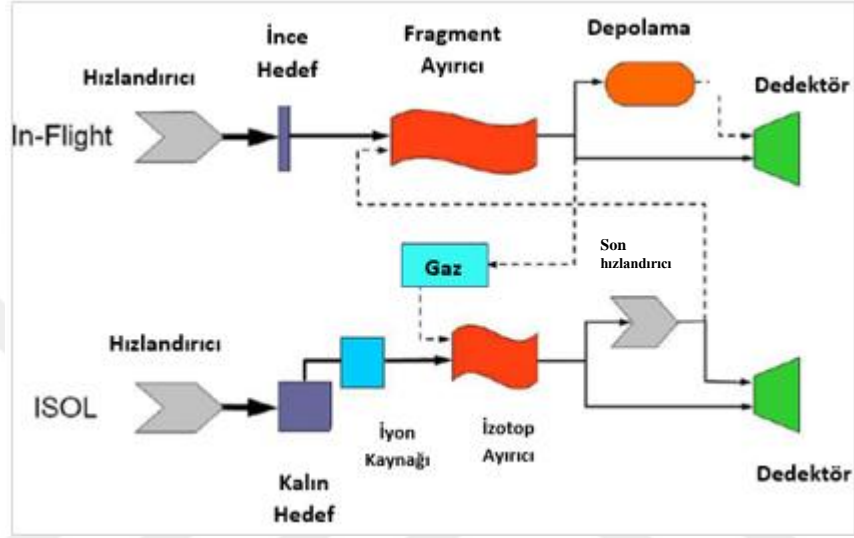
Hafif ya da ağır iyonlarca tetiklenmiş yüksek enerjili reaksiyonlar, yüksek uyarılma enerjilerine ve (parçalanma ve fragmantasyon reaksiyonlarının çıktılarına etki eden ana sönümleme kanallarından biri olan) müteakip fizyona öncülük ederler.

Hedef çekirdek büyük bir Z sayısına sahip olduğu zaman, parçalanabilir bir mermi benzeri fragmanın uyarılması nükleer bir katkıya ve elektromanyetik bir geri tepmeye ya da fragman ayırıcılara sahiptir. Diğer taraftan ürünün ortaya çıkarılmasında kullanılan hedef çekirdek görelî olarak kalınsa (öyle ki ürünler hedef hacmin içinde durdurulur) ilgili çekirdeklerin daha ileri seviyede filtre edilmesi için hedeften ayıklanmış olmak zorundadır. (Pfütznner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

### **3.3.2 Egzotik çekirdeklerin seçimi**

Üretim sürecinden sonra, egzotik çekirdekler birincil hüzmeden ve diğer istenmeyen ikincil hüzmeden ayrılmak zorundadır. Bu amaçla, son yıllarda iki tamamlayıcı teknik geliştirilmiştir: İzotop ayırma hattı (ISOL) tekniği olarak adlandırılan teknik ve hızlanma sonrası ve uçuş sırasında ayırma (IFS) olarak adlandırılan teknik. Yöntemlerin farklılaşmasını sağlayan temel nokta hedef çekirdek olarak kullanılan malzemenin kalınlığıdır. ISOL teknikleri, bir hedefte üretilen radyoaktif türlerin mevcudiyetine dayanır ve katı, sıvı veya gaz malzemedan oluşan bir tutucuda ısıl hale getirilir. Çoğunlukla hedef ve yakalayıcı aynıdır. İzotoplar daha sonra tutucu materyalden

çıkarılır ve bir iyon kaynağında iyonize edilir. İyon kaynağından çıkarıldıktan sonra türler, manyetik bir dipol mıknatıs kullanılarak kütle analizine tabi tutulur ve ardından gerekli enerjiye hızlandırılır. IFS yöntemi, ilgili izotopları birincil ışınlardan veya reaksiyonda üretilen diğer izotoplardan ayırmak için reaksiyonun kinematığını ve bazı manyetik ve elektrik alan kombinasyonlarını ve atomik süreçleri kullanır (Duppen, 1997).



Şekil 3.4. ISOL ve In-Flight tekniklerinin şematik gösterimi (Pfützner vd., 2012)

### 3.3.2.1 ISOL (the isotope separation on-line) tekniği

Bu teknik, radyoaktif çekirdeklerin üretimi ve ayıklanması için yayın olarak kullanılmaktadır. ISOL tekniğinde egzotik çekirdekler, kalın bir hedefin yüksek enerjiye (nükleon başına 100-1000 MeV) sahip protonlar ya da hafif iyonlarca bombardıman edilmesi ile (birkaç 100 g/cm<sup>2</sup>'ye kadar ulaşabilen) üretilirler. İlgili çekirdekler daha ileri seviyede filtreleme için hedeften çıkarılmış olmak zorundadır. Hedef parçalanma ya da fizyon reaksiyonlarınca üretilen ürünlere göre kalın olan hedef içinde durdurulurlar. ISOL ayıklama tekniği seçilmiş elementlerin izotopları için daha üstün gibi görünmektedir öyleki hedef-iyon kaynak sisteminden çabuk ve etkili bir biçimde açığa çıkmaktadırlar.

Bu yöntem farklı elementler için bir seçim imkanı verir. ISOL tipi araçlarda egzotik çekirdeklerin verimleri temel olarak birincil hızının şiddeti ve enerjisi, ürün kesiti ve

hedef kalınlığı ile belirlenir. ISOL yönteminde egzotik çekirdeklerin üretilmesi ve ayıklanması sürecinde kritik rol nükleer yarı ömür ve kimyasal özellikler tarafından belirlenir. Bu yöntem bozunma kayıplarından yana muzdariptir ve bu nedenle yarı ömürleri birkaç saniye veya daha uzun olan çekirdeklerle kısıtlanmıştır. (Pfützner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

### **3.3.2.2 In-flight tekniği**

Nadir izotopların araştırılması ve bulunması için tercih edilen tekniktir. Mermi olarak kullanılan parçacıkların enerjileri Coulomb bariyeri seviyesinden başlayıp nükleon başına birkaç GeV mertebesine kadar geniş bir aralığı kapsamaktadır. Bu yöntemde hedef kalınlığı görece olarak daha incedir. Eğer hedef malzemenin kalınlığı küçük ise oluşması beklenen ürünler, belirgin kinetik enerjiye sahip hedeften kurtularak açığa çıkacaktır ve söz konusu ürünler iyonoptik sayesinde derhal ayarlanmış olacaklardır. Bu şekilde uygulanan ayıklama tekniğine In-flight adı verilir ve kullanılan filtreleme cihazlarına geri tepme ya da fragman ayıklayıcılar denir.(Pfützner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

Bu tekniğin temel özelliği, reaksiyon ürününün kinetik enerjisinin, görece olarak ince ürün hedeften kaçmasına olanak verecek biçimde büyük olmasıdır. Bu teknik ağır iyonlarca (füzyon-buharlaştırma, yarı elastik ya da çoklu-nükleon aktarımı ve mermi fragmantasyonu ya da fizyon yöntemleriyle meydana gelen) tetiklenmiş reaksiyonlar üzerinde uygulanmaktadır. Hedeften açığa çıkan ürünler manyetik ve elektrik alanına sahip bir iyon-optik sistemine girerler, ardından nihai evrede olması istenmeyen artıklar bu sayede ayıklanmış olurlar (Pfützner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

In-flight tekniği, mikro saniye mertebesinde veya çok daha kısa sürede gerçekleşen bir ayıklama süresine sahiptir. Bu özellik tekniğin en belirgin avantajıdır. Bu sayede birçok egzotik çekirdeğin çalışılmasına imkan bulunmuş olunur. Diğer önemli bir özellik ise kimyasal bir duyarlılığın olmamasıdır. (Pfützner vd., 2012; Bertulani and Hussein, 2015; Nieto, 2007; Benlliure vd., 2003; Litvinov, 2003).

## BÖLÜM IV

### MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasının bu bölümünde; proton zengin veya nötron eksik çekirdeklerin ya da başka bir deyişle egzotik proton çekirdeklerin tesir kesitlerini teorik hesaplama araçları olan nükleer reaksiyon bilgisayar kodlarından tez kapsamındaki araştırmalar için seçilmiş olan dört tanesi hakkında bilgi verilecektir. Bu tür kodlara örnek olarak; GNASH, COMPLET, ALICE, STAPRE, CASCADE, NON-SMOKER, EMPIRE, PACE4, HIVAP ve TALYS gibi yaygın olarak kullanılan kodlar verilebilir.

Tez çalışmasının bu kısmında, PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarına genel bakış bu tür araştırmalar için kodların nasıl kullanılacağı, basit girdi dosyaları hazırlama gibi konular hakkında bilgi verilecektir. Literatür taramaları sırasında yapılan araştırmalar da sıkça kullanıldığı görülen bu kodlar ile elde edilen tesir kesit hesaplamaları ve karşılaştırmalı sonuçlar ilerleyen bölümlerde sunulacaktır.

#### 4.1 Nükleer Reaksiyon Modelleme Programı: LISE++

LISE++ programı (Bazin ve Tarasov, 2002a) çekirdeklerin parçalanması veya füzyon buharlaşması yoluyla radyoaktif ışın üretmek için kullanılabilen bir tür simülasyon programıdır (Tarasov ve Bazin, 2003). Parçalanma veya füzyon buharlaşma momentumunun, tesir kesitlerin ve açılal dağılımların üretimi için fiziksel gelişimin farklı biçimleri vardır.

Bu programın temel amaçlarından biri, parçalanmış ürünlerin bulaşma ve verimini hesaplamaktır. Programdaki uygulama araçları kullanılarak, parça ayırıcı ile seçilen çekirdeklerin tespitine kadar reaksiyon mekanizmasının parametreleri ile ilgili radyoaktif ışınların üretimi simüle (benzetim) edilebilmektedir (Tarasov ve Bazin, 2003).

LISE++ programı, parça ayırıcıların geliştirilmesinin yanı sıra dünya çapında farklı laboratuvarlarda deneylerin planlanması için de kullanılabilir.

LISE++ programı manyetik ve elektrik ayırıcılar yardımıyla in-flight olarak üretilmiş nadir izotop hüzmelerinin, hüzmeye şiddeti ve saflığını ön görmek üzere tasarlanmış ve bu amaçla kullanılmaktadır. LISE++ programının birçok araçla kullanımının temel amacı Radyoaktif İyon Hüzmeleri'nin (RIB) kompozisyonları hakkında ön görüde bulunmak ve anlamaktır. LISE++ uygulaması, izotop üretim mekanizmaları, elektrik ve manyetik sistemler yoluyla iyon optik aktarımı ve bir maddenin maruz kaldığı iyon etkileşimleri gibi çeşitli modelleri barındırmaktadır. Bunlarla beraber, fırlatılan cisim parçalanma deneylerine dair bir çok bileşenin simüle edilmesine olanak veren yardımcı araçları da barındırmaktadır.

LISE++ yazılımı izotop üretimi için gereken reaksiyon mekanizmalarına ait gerekli konfigürasyonları (Tarasov ve Bazin, 2004a), fırlatılan cisim fragmentasyonu (Tarasov, 2004b), füzyon-residual fragmentasyonu (Tarasov ve Bazin, 2003), füzyon-füzyon (Tarasov ve Villari, 2008), Coulomb füzyonu, aşındırma-füzyonu ve iki cisim nükleer reaksiyonu gibi modellerini barındırmaktadır. Program kullanıcıların işlerini kolaylaştıran grafik tabanlı bir ara yüze sahiptir. Uygulama, izotop üretimi için tam bir analiz yapabilme olanağını da sunmaktadır. Bu sayede diğer bazı kodların ortaya koyduğu iyon optik haritalarına girdi fırsatı verir. Yine bu uygulama, özerk işleyen füzyon-buharlaştırma hesaplamalarını yapan PACE4 kodunu, MOTER kodunu, yük durumu dağılımı hesaplamalarını yapan ETACHA4 ve Global kodlarını ve Spectroscopic Calculator kodunu icra eden araçları da barındırmaktadır. Füzyon reaksiyonları, LISE++ programı çerçevesinde Hillman –Eyal buharlaştırma kodunun (Julian kodu) A. Gavron (1980) tarafından güncellenen gelişmiş bir sürümü olan PACE4 (Projection Angular-momentum Coupled Evaporation) kodu kullanılarak simüle edilebilir.

LISE++, 32-bitlik Windows uygulaması olarak geliştirilmiştir. Borland C++ geliştiricisiyle yazılmıştır. İlk sürümü (Bazin vd., 2002a; Bazin vd., 2002b) MS-DOS ortamında 14 tane C++ dosyasına ve 10.000 satırdan daha az bir kod olarak yazılmıştır. Sürekli geliştirmeler sayesinde 64-bitlik cihazlarda çalışan, modern grafik ara yüzü olan modüller (Tarasov ve Bazin, 2003) bir programa dönüşmüştür. Bu program, üstte bahsedilen özerk uygulamalar sayesinde daha da etkin bir yapıya kavuşmuştur

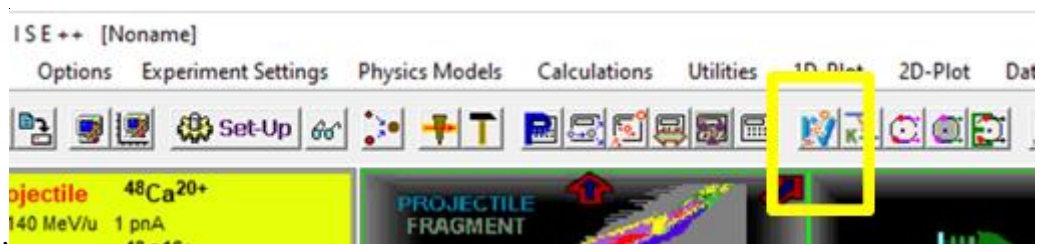
PACE4 kodu, bileşik çekirdeğin uyarılması için Monte-Carlo simülasyonu ile farklı laboratuvar bombardıman enerjilerinde füzyon reaksiyonlarında ana buharlaşma kanallarını simüle etmek için kullanılan istatistiksel bir buharlaşma kodudur. Monte-Carlo simülasyonunun temel avantajları, çeşitli büyüklükler arasında korelasyon sağlayacak olmasıdır. Kod, bozunma zincirinde bulunan tüm çekirdekler için olasılıkları ve bozulma genişliklerini hesaplar. Bu süreç, artık çekirdeklerin süreci tamamlanıncaya kadar devam eder. Enerji spektrumları, yayılan parçacıkların açısal dağılımı ve ayrıca buharlaşma kalıntısı kesiti ve füzyon kesiti bu kod ile elde edilebilir.

Program LISE ++ çerçevesinde PACE4 kodunda birçok yeni özellik bulunmaktadır:

- Kullanıcının iletişim kutularına bilgi girebildiği ve her parametrenin bir açıklamasını görüntüleyen kullanıcı dostu bir ara yüz. Sonuçların uygun bir çıktısı da var.
- LISE ++ araçları kullanılarak hesaplanan tesir kesitleri çizme imkânı,
- Hesaplamalarda bağlanma enerjileri için önerilen değerlerin AME2003 (Atomik Kütle Değerlendirmesi) veri tabanı kullanılabilir.
- Kuantum mekanik yaklaşımı kullanarak PACE4'te Coulomb bariyerinin altındaki bir füzyon kesitini hesaplama imkanı sunmaktadır (Tarasov ve Bazin, 2003).

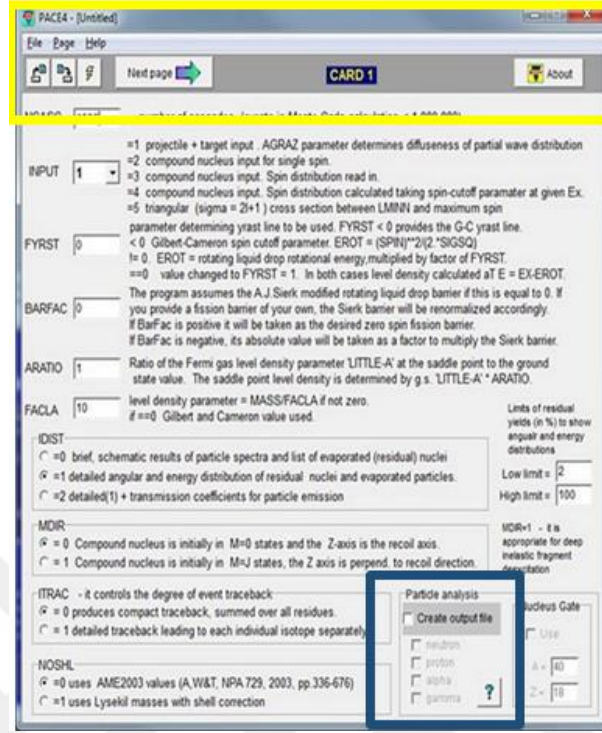
#### 4.1.1 Uygulamada PACE4

Bu tez çalışmasında hesaplamalar için LISE++ programının altında çalışan PACE4 kodu kullanıldığı için LISE++ programı için ayrıntılara girilmemiştir. LISE ++ programında aşağıdaki Şekil 4.1' de işaretlenen araç çubuğunda PACE4 için bir kısa yol bulunmaktadır.



Şekil 4.1. LISE++ araç çubuğu

Kullanıcılar sembole tıkladıktan sonra, PACE4 kodunun ilk kartı görüntülenir. Şekil 4.2



Şekil 4.2. PACE4 kodunun ilk kartı

Şekil 4.2'de, NCASC kaskad (kademe) sayısını, yani Monte-Carlo hesaplamalarında 1000000'e kadar olan olayların sayısını ifade eder. GİRİŞ, sistemler tarafından verilen koşullara göre 1'den 5'e kadar değerlere sahip olacaktır. Örneğin, INPUT = 1'i seçmek, aşağıda görülen mermi ve hedef çekirdeği bilgilerinin girilmesine izin verir. INPUT değerleri 2 ila 5, mermi ve hedef çekirdeğin aksine, bileşik çekirdek girişi içindir. INPUT = 2, tek spin için bileşik çekirdek girişi. INPUT = 3, bileşik çekirdek girişi. Spin dağılımı okunur. INPUT = 4, bileşik çekirdek girişi. Verilen spin-cutoff parametresi kullanılarak hesaplanan spin dağılımı, INPUT =5, LMINN ile maksimum döndürme arasındaki üçgen ( $\sigma = 2l + 1$ ) tesir kesit bilgileri içindir. GİRİŞ mermi ve hedef girdi için 1 değerine sahip olacaktır. PACE, İleri ve Geri düğmelerini kullanarak füzyon buharlaşma hesaplamaları boyunca yol gösterir. Seçim yapılmayan herhangi bir alan kod varsayılan değerleri kullanarak hesaplamayı yapar.

PACE4' un bu sürümü için FACLA 10' a eşit olarak alınır. Burada 'FACLA' seviye yoğunluk parametresidir ve hesaplamalarda bir nevi ince ayar yapmak için kullanılır. Parçacık analizi için IDIST 0'dan küçük olmalıdır. Şekil 4.2' de işaretlenen (mavi küçük

kare) kısımdan parçacık analizi için “Create output file” sekmesi tıklanarak ilgilenilen parçacık türü seçildiğinde istenen parçacıklar ile ilgili bilgileri içeren çıktı dosyası oluşturulur. Bu tez çalışmasında literatürdeki birkaç örnek reaksiyon dışında varsayılan değerler kullanılmıştır.

“Next page” sekmesi ile kodun ikinci kartını ekrana gelir.

PACE4 - [Untitled]

Previous page **CARD 2.1** Next page

Projectile	Target	Compound
A = 20 N = 28	A = 124 N = 74	A = 172 N = 102
Z = 20 Ca	Z = 50 Sn	Z = 70 Yb
Spin (gs) = 0	Spin (gs) = 0	
ME (MeV) = -44.214 DB	ME (MeV) = -88.237 DB	ME (MeV) = -59.260 DB

QCN = 0 Q value of reaction [MeV]. If == 0 it is calculated from mass tables.

Beam Energy (MeV)  
Elab = 300  Batch Mode

EXP SIG = 0 experimental fusion cross section if known. TL-S from optical model shifted to reproduce this value if inputted, preserving the L-diffuseness. If == 0 Bass model (PRL 1977) fusion cross section being used.

JCMAX = 0 Maximum J to be used during calculations. (if 0 it is taken from optical model routine)

AGRAZ = 2 To bypass input channel optical model routine (TLOM) specify L-diffuseness of fusion cross section. If == 0 diffuseness will be set to 0.5 which is essentially sharp cutoff.

EL OSS = 0 energy loss of beam thru full target width. (total dE) energies will be distributed between Ebeam & Ebeam-Eloss

LM INN = 0 Lowest partial wave L in calculation. Partial waves from L=0 to LM INN excluded. enabling low-l non-fusion window in reaction calculation.

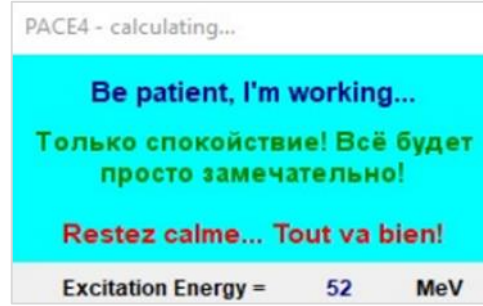
Transmission probability for a one-dimensional barrier (0,T.)  
 Classical (use it above the barrier)  
 Quantum-mechanical [D.Hill & J.Wheeler, PhysRev 89(1953) 1105]

Note: If you are running at high bombarding energies for which the grazing angular momentum is above 75 hbar, it is recommended to input AGRAZ > 0, and to specify an arbitrary value for EXP SIG (or 0 = Bass) which corresponds to a fusion cross section with a limiting L-value around 80. This will give you all the evaporation residue data and the fission probabilities you need. For

Şekil 4.3. PACE4 kodunun ikinci kartı

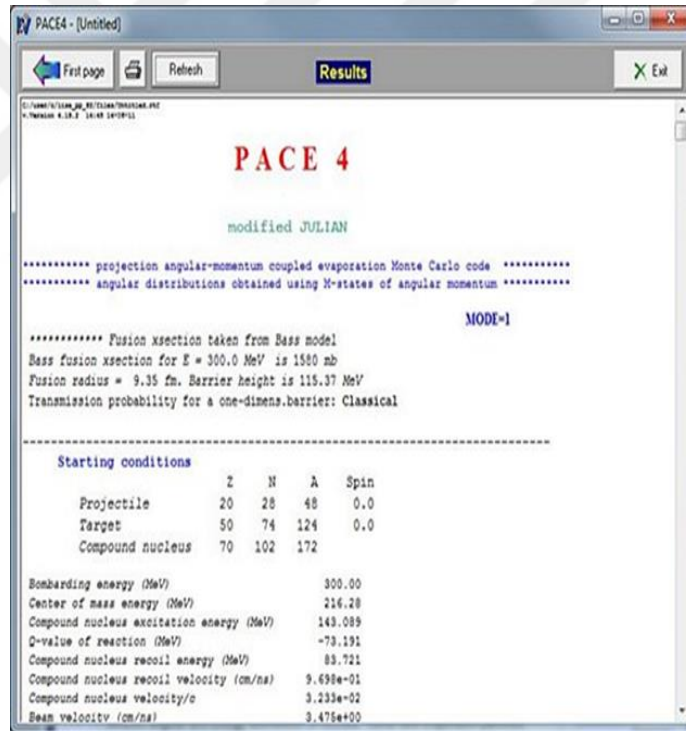
AGRAZ parametresi PACE4'ün bu sürümü için 2'ye eşit alınmalı. Kalan verim sınırı, enerji ve açısal dağılımları gösterecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.3'de ayrıca mermi ve hedefin A ve Z'si sırasıyla kütle numarası ve atom numarası anlamına gelir. Ayrıca, bileşik çekirdek için A ve Z otomatik olarak elde edilecektir. Mermi enerjisi MeV cinsindedir. Elab simülasyonun gerçekleştirileceği enerji değerini ifade eder. “batch mode” sekmesi tıklanıldığında tek bir enerji değeri için değil bir alıktaki kademeli enerji değerleri için hesaplama imkanı verir. Tek boyutlu bir bariyer için iletim olasılığı, bariyer üstü enerjilerde klasik model ve bariyer altı enerjilerde kuantum mekanik olarak

hesaplanır (sarı dikdörtgen ile işaretli kısım). “Next” sekmesini kullanarak, diğer varsayılan parametrelerle kod hesaplamaya başlar.



Şekil 4.4. PACE4 çalışma örneği

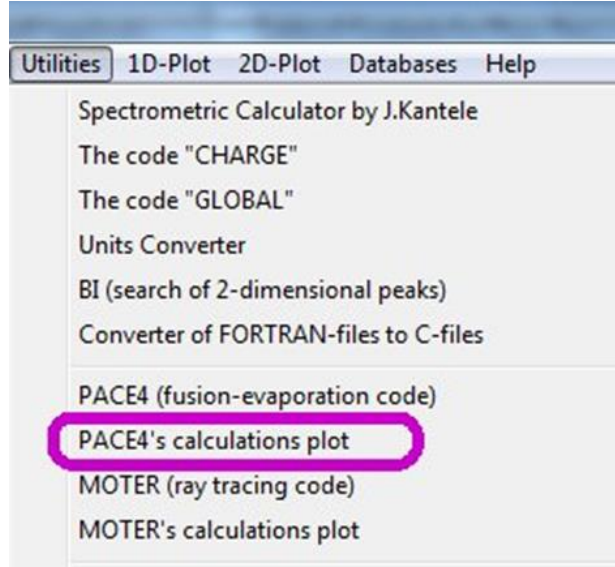
Hesaplama sonrası PACE4 kodu aşağıdaki gibi bir çıktı dosyası verir.



Şekil 4.5. PACE4'ün çıktı dosyası

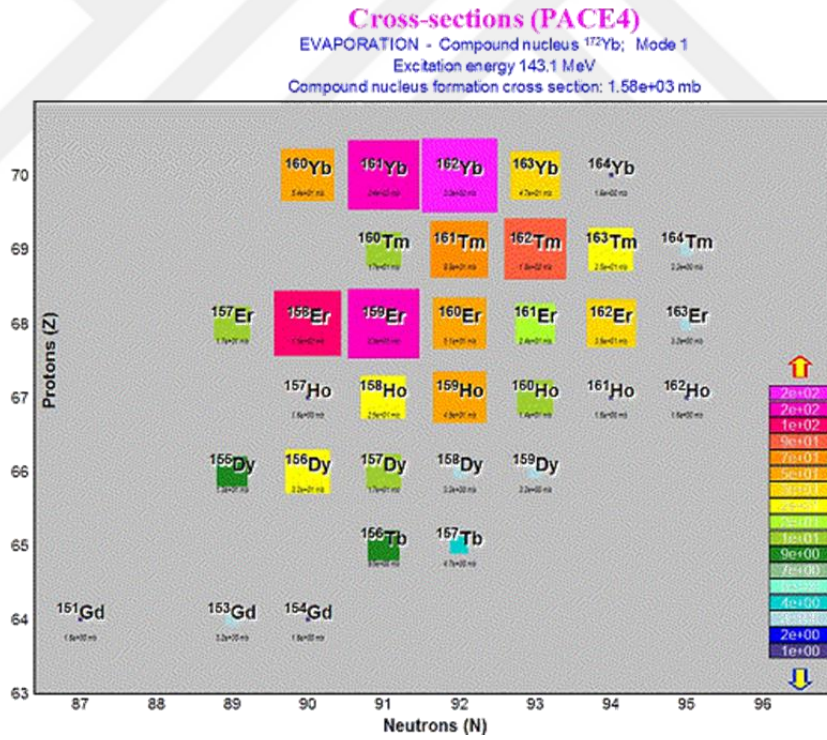
#### 4.1.2 PACE4 sonuçlarını LISE ++ ile çizme

Elde edilen çıktı dosyası kullanılarak LISE programında bulunan “Utilities” sekmesi altında bulunan PACE4 koduna ait çizdirme sekmesi ile de istenilen sonuçlar grafik olarak elde edilebilir.



Şekil 4.6. PACE4 çizim sekmesine erişim

Bu aşamadan sonra program aşağıdaki şekilde bir grafik çıktısı verir.



Şekil 4.7. PACE4 tesir kesit grafiği

## 4.2 EMPIRE Kodu

EMPIRE, çeşitli nükleer modelleri içeren ve bir nötron mermisinin rezonans bölgesinden başlayıp ( $\sim$ keV), ağır iyon reaksiyonlarının meydana geldiği birkaç yüz MeV mertebesine uzanan bir bölgeyi kapsayan geniş bir enerji aralığında gelen parçacık hesaplamaları için tasarlanmış nükleer reaksiyon kodlarından oluşan modüler bir sitedir.

Uygulama, nükleer veri değerlendirme çalışmasının yanı sıra nükleer reaksiyonların teorik araştırmaları için de kullanılabilir özelliğe sahiptir. Fotonlar, çekirdekler, döteronlar, tritonlar, helyonlar ( $^3\text{He}$ ),  $\alpha$  parçacıkları, hafif veya ağır iyonlar gibi parçacık veya çekirdekler mermi olarak seçilebilir. Bu kod vasıtasıyla deneysel gerçekleştirilecek çalışmalar için kullanılması planlanan nükleer reaksiyon için kullanılacak bombardıman parçacığı ve hedef seçimi yaparak olası reaksiyon kanalları için tesir kesitini hesaplamaktadır. Kod, aşağıda sıralanan başlıca nükleer modelleri barındırmaktadır:

- Doğrudan reaksiyonlar: Genelleştirilmiş optik model (ECIS03) veya basitleştirilmiş çiftlenmiş-kanallar yaklaşımı (CCFUS) ile ifade edilir.
- Denge öncesi mekanizma: Deformasyona bağlı çok aşamalı doğrudan (ORION+TRISTAN) model, NVWY çok aşamalı bileşik veya küme emisyonlu bir denge öncesi eksiton modeli (PCROSS) veya başka bir tam açılal momentum kuplajı (DEGAS).
- Bileşik çekirdek bozunması  $\gamma$ -kaskat ve genişlik dalgalanmalarına sahip tam özellikli Hauser-Feshbach modeli ile tanımlanmaktadır.

Fizyon kanalının ileri aşaması, kuyulardaki emilim ile çok tepeli fizyon bariyeri sayesinde iletimi dikkate alır. Fizyon olasılığı, fizyon optik modeli içindeki WKB yaklaşımından türetilir. Nükleer seviye yoğunlukları için çeşitli seçenekler arasında EMPIRE'a özgü yaklaşım yer alır. Bu yaklaşım; hızlı dönen bir çekirdeğin dinamik deformasyonunun etkilerini, klasik Gilbert-Cameron yaklaşımının etkilerini ve kolektif güçlendirmeli tek parçacık seviyesi şemalarına dayanan mikroskobik bir modelle elde edilen önceden hesaplanmış tabloların etkilerini dikkate alır. Kapsamlı bir giriş parametreleri kütüphanesi; nükleer kütleleri, optik model parametrelerini, temel seviyede formasyonların, ayrık seviyeleri ve bozunma şemalarını, seviye

yoğunluklarını, fizyon bariyerlerini, eylemsizlik momentlerini ve  $\gamma$ -ışını dayanım fonksiyonlarını içerir. Sonuçlar, EMPIRE bünyesinde EMPEND kodu kullanılarak ENDF6 (Evaluated Nuclear Data File) (Herman ve Trkov, 2010) formatlı dosyalara dönüştürülebilir ve mevcut değerlendirmelerden çıkarılan nötron rezonansları ile tamamlanabilir. Paket, hesaplamalar sırasında otomatik olarak alınan deneysel reaksiyon verilerinin tam EXFOR (CSISRS) kütüphanesini de (McLane, 2000) içermektedir. Yayın kalitesindeki grafikler, güçlü ve esnek çizim paketi ZVView kullanılarak elde edilebilir (Zerkin, 2021). Tcl / Tk (Tcl: Tool programming language, Tk: graphical user interface toolkit) ile yazılmış grafik kullanıcı ara yüzü, sistemin kolaylıkla işletilebilmesini sağlar.

İlk EMPIRE kodu 1980 yılında kullanıma sunuldu. EMPIRE kodu, kökeni itibariyle Hauser-Feshbach teorisine ve denge öncesi etkileri dikkate alan klasik HYBRID modeline dayanmaktadır. EMPIRE kodunun bir sonraki sürümü ise tamamen yenilikler içeren EMPIRE-2'dir. EMPIRE kodunun bu en yeni sürümünde, önceki geliştirmelerin aksine, farklı bir programlama anlayışıyla yeniden yazılım yapılmıştır (kodun ana yapısı değişmeksizin birçok yeni özellik eklenmiştir). Bu sayede yenilenen kodun daha esnek ve genel olması sağlanmıştır. Yine bu sayede, keV bölgesinde meydana gelen nötron yakalama süreçlerine dair hesaplamalardan, birkaç yüz MeV mertebesine kadar olan ağır iyon (HI) yüklü reaksiyonların hesaplanmasına kadar olan geniş bir enerji aralığında uygulanabilir hale getirilmiştir. Ana kod içerisindeki tüm değişken aralıkları ayrı bir dosyada yer alan parametre bildirim tablolarıyla ayarlanabilmektedir. Bu sayede kodun asıl soruna ve/ veya bilgisayara doğrudan uyarlanması sağlanır. Kod modüller bir yapıya sahiptir. Her modül en iyi biçimde tanımlanmış bir görevi yerine getirir ve diğer alt programların çoğunda bulunan bir dizi genel COMMONS vasıtasıyla diğer modüller ile iletişim kurar. Bu tez çalışmasında da kullanılan sürüm olan EMPIRE-3.2 sürümü Malta adıyla anılmaktadır ve 2011 yılında kullanıma sunulmuş olan Rivoli sürümünden sonra geliştirilmiştir. Her ne kadar ara bir sürüm olsa da, bu sürüm aşağıda sıralanan birçok önemli geliştirmeyle desteklenmiştir.

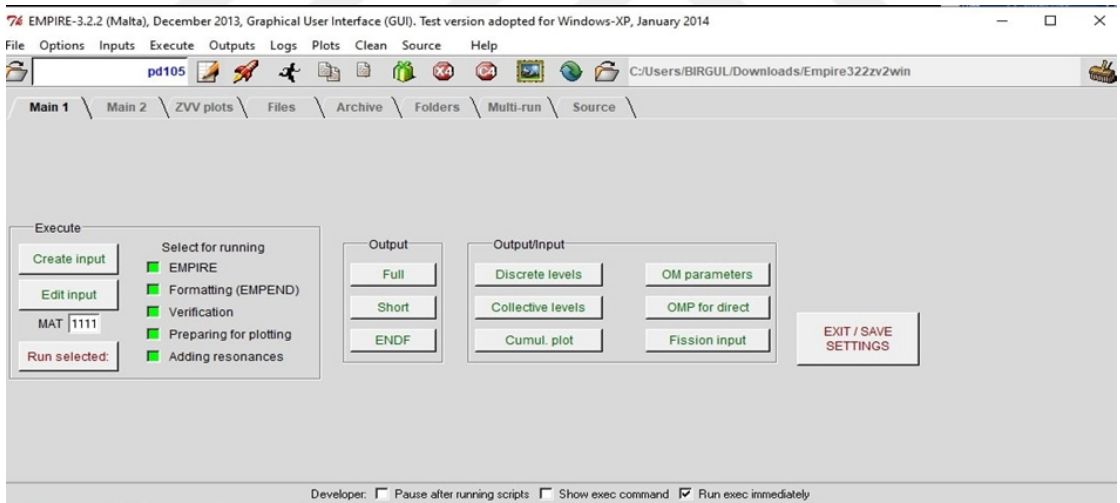
- Deneysel verileri otomatik olarak ayarlamayı sağlayan hazır fizyon nötron tayfları (prompt fission neutron spectra-PFNS)
- PFNS' nin grafik çizimi, mu-bar, ve nu-bar,

- Bileşik, elastik ve elastik olmayan reaksiyonlar için izotropik olmayan açısal dağılımlar,
- Engelbrecht-Weidenmüller dönüşüm simülasyonu,
- ENDF-6 biçimine sahip dosyaları işletmeye yarayan yeni 10 alt yordam.

Daha önce olduğu gibi, kodun yararlılığı için daha fazla iyileştirme yapılmış ve bazı eksiklikler de giderilmiştir.

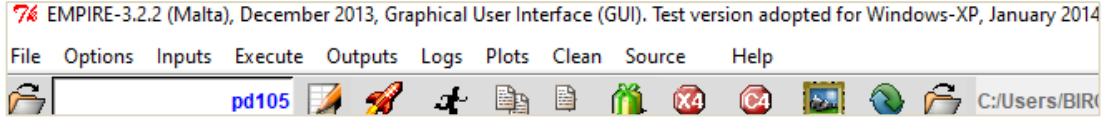
#### 4.2.1 Grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı

EMPIRE, Tcl ile geliştirilmiş grafik kullanıcı ara yüzüne (GUI) sahiptir (Şekil 4.8). Tcl/Tk eklentisinin, uygulamanın çalıştırılacağı bilgisayarda kurulu olmasını gerektirir. Tcl betik dili ve ilgili grafik araç seti (Tk), herhangi bir işletim sistemi için rahatlıkla bulunabilir ve kurulabilir eklentilerdir. Grafik ara yüz, uygulamayı kullanmayı kolaylaştıran bir yapıda tasarlanmıştır.

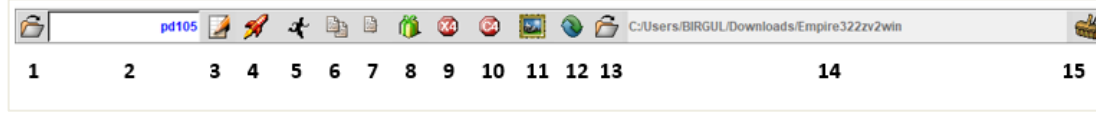


Şekil 4.8. EMPRE grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı

Grafik Ara yüz Penceresi: Menü satırı (Şekil 4.9), komut düğmeleri satırı (Şekil 4.10) bölümlerinden oluşmuştur.



**Şekil 4.9.** EMPIRE grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı menü satırı



**Şekil 4.10.** EMPIRE grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ekranı komut düğmeleri satırı

İşletilecek ya da işletilmiş olan bir projeye ait girdi ya da sonuçlara hızlı erişim sağlayacak düğmeler için kısa yol tuşlarının işlevleri şu şekildedir. (1) “input” dosyasını seçmek içindir. (2) seçilen proje adı ,(3) girdi dosyasını düzenleme, (4) tam kapsamlı çalıştırma, (5) sadece EMPIRE çalıştırma, (6) uzun çıktı dosyası açma, (7) kısa çıktı dosyası açma, (8) ENDF biçimli dosyayı açma, (9) ve (10) EXFOR çıktılarını, (11) PLTC4 çizimlerini görme, (12) dosyaları yenileme,(13) (14) proje çalıştırma dizinini değiştirme, (15) çalışma ekranını temizleme şeklindedir.

Girdi dosyası belirli bir formata göre hazırlanmalıdır. Dosya içindeki her parametrenin ya da işleme alınmayacak bilginin başlayacağı, yazılacağı bölüm vardır. Bu yapı FORTRAN formatına göre tasarlanmıştır. Format (A6,G10.5,415) (Şekil 4.11). Dosya içerisinde sadece bilgi amaçlı yer alacak olan satırlar ya da kısımlar \*,# ya da ! işaretleri ile başlamalıdır. Bu işaretlerin başladığı satırlar ya da kısımlar hesaplamalarda dikkate alınmayacaktır. @ işareti ile başlayan bir satır varsa, bu bilgi başlık anlamına gelir ve reaksiyon işletildiğinde bilgi ekranında görünür fakat hesaplamalarda dikkate alınmaz.

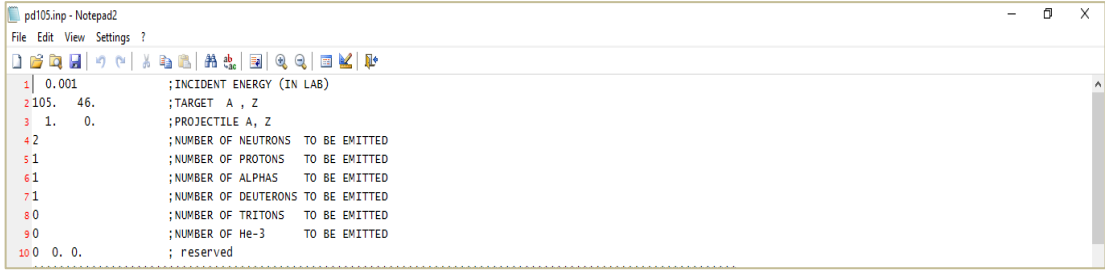
```

11 *****
12 *   Optional input starts here, FREE format, lines starting with *,#,! are comments
13 *****
14 @ TITLE: This is a default EMPIRE-3.2.3 input

```

**Şekil 4.11.** Input (inp uzantılı) dosyası format tanıtımı

Input adı verilen ve “inp” uzantılı girdi dosyası iki temel bölümden oluşur: “Zorunlu Girdi” bölümü (Şekil 4.12) ve “İsteğe Bağlı Girdi Bölümü” (Şekil 4.14)



```
1 0.001 ;INCIDENT ENERGY (IN LAB)
2 105. 46. ;TARGET A , Z
3 1. 0. ;PROJECTILE A, Z
4 2 ;NUMBER OF NEUTRONS TO BE EMITTED
5 1 ;NUMBER OF PROTONS TO BE EMITTED
6 1 ;NUMBER OF ALPHAS TO BE EMITTED
7 1 ;NUMBER OF DEUTERONS TO BE EMITTED
8 0 ;NUMBER OF TRITONS TO BE EMITTED
9 0 ;NUMBER OF He-3 TO BE EMITTED
10 0 0. ; reserved
```

**Şekil 4.12.** Input (inp uzantılı) dosyası zorunlu girdi bölümü

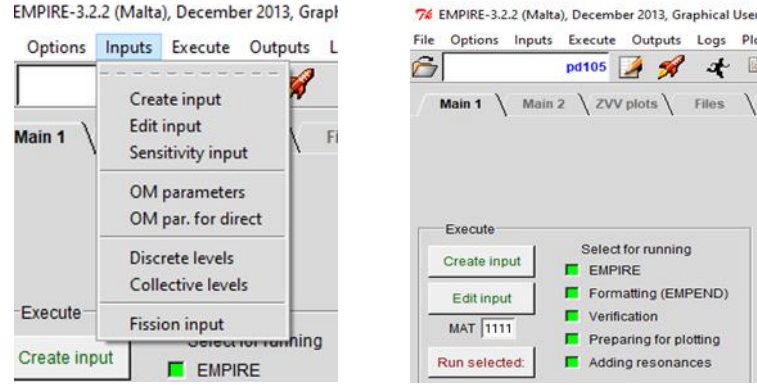
Girdi dosyasında mutlaka olması gereken bölümdür. Bunlar;

- Satır 1 - Reaksiyon enerjisinin MeV mertebesinde tanımlandığı kısımdır.
- Satır 2 - Hedef çekirdeğin atom numarası ve proton sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 3 - Mermi parçacığın veya çekirdeğin atom numarası ve proton sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 4 - Reaksiyon sonucunda salınması beklenen nötron sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 5 - Reaksiyon sonucunda salınması beklenen proton sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 6 - Reaksiyon sonucunda salınması beklenen alfa parçacığı sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 7 - Reaksiyon sonucunda salınması beklenen döteron sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 8 - Reaksiyon sonucunda salınması beklenen triton sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 9 - Reaksiyon sonucunda salınması beklenen 3He sayısının girildiği kısımdır.
- Satır 10- Gelecekte ihtiyaç duyulduğunda eklenecek olan yeni parametreler.

#### 4.2.2 Zorunlu girdi bölümü

Girdi dosyası oluşturmak için ana ekranda Şekil 4.13.a’ da gösterilen menü satırından “Input” menüsünde ya da Şekil 4.13.b’de gösterilen “Main1” sekmesinde yer alan “Create Input” sekmesine tıklayarak ya da EMPIRE dizininde “example” isimli dizinde

yer alan örnek dosyalardan birini açıp, içinde değişiklikler yaparak farklı bir isimde kayıt etmek girdi dosyasını oluşturmak için seçeneklerdir.



a

b

**Şekil 4.13.** Input menüsü (a) ve create input seçeneği (b)

Bu bölümde her karakterin bulunması gereken yer bellidir ve bunlara sadık kalınarak girişler elle yapılmalıdır. Bu sağlanamadığı takdirde program çalışmayacak ve değişken hatası verecektir. Bu bölümde serbest bir metin ya da yorum yazılması gerektiğinde ‘;’ işareti kullanılır. Yazılacak olan metinler noktalı virgül işaretinden sonra yazılabilir. Program bu bilgileri dikkate almayacaktır.

#### 4.2.3 İsteğe bağlı girdi bölümü

Zorunlu girdi bölümünün ardından “input” dosyasında varsayılan model parametrelerinde değişiklik yapılmasına izin veren, “İsteğe Bağlı Girdi” bölümü gelir.

```

13 *-----!-----!-----!-----!-----!
14 @ TITLE: This is a default EMPIRE-3.1.1 input
15 IOUT      3.          Number of points in the outgoing energy grid
16 NEX      080.         No ENDF formatting by default (much faster runs)
17 ENDF     0.          No ENDF formatting by default (much faster runs)
18 RECOIL   0.          No recoils are calculated. Sizeable speed-up if no E
19 *KALMAN   1.          Sensitivity calculation requested
20 ***
21 * HAUSER-FESHBACH INPUT
22 *
23 FILEV    0.          FILEV>0 is recommended for 1st run to compare vs NLD
24 LEVDEN   0.          EMPIRE NLD (EGSM RIPL-3) as default
25 *LEVDEN   1.          Refitted GSM model (Ignatyuk) NLD (future option)
26 *LEVDEN   2.          Refitted Gilbert & Cameron NLD (future option)
27 *LEVDEN   3.          RIPL-3 HFB parity dependent NLD
28 *LEVDEN   4.          EMPIRE 2.18 Gilbert & Cameron NLD
29 *ATLNO    1.05  Z0  A0  Level density parameter of nucleus(Z0,A0) increased l
30 HRTW     3.          width fluctuations considered up to 3 MeV (for neutro
31 *TUNE     0.90  Z0  A0  0  Gamma width of nucleus(Z0,A0) decreased by 10%
32 GSTRFN   1.          Default gamma ray strength function (Plujko MLO RIPL-
33 ***
34 * OPTICAL MODEL INPUT
35 *
36 * for A <= 220
37 *OMPOT    2405.      1  OMP for the inverse neutron channel - Koning & Delar
38 *OMPOT    5405.      2  OMP for the inverse proton channel - Koning & Delar
39 * for A > 220
40 *OMPOT    2408.      1  OMP for the inverse neutron channel - Actinides
41 *OMPOT    5408.      2  OMP for the inverse neutron channel - Actinides
42 * Other particles
43 *OMPOT    9600.      3  OMP for the inverse alpha channel - Avrigeanu et
44 *OMPOT    6200.      4  OMP for the inverse deuteron channel - Haixia et al
45 *OMPOT    7100.      5  OMP for the inverse triton channel - Becchetti & G
46 *OMPOT    8100.      6  OMP for the inverse He-3 channel - Becchetti & G
47 *
48 * for A <= 220
49 *DIRECT   0.          Spherical optical model by default for A>220
50 * for A > 220
51 *DIRECT   1.          CC Tls for the incident channel + DwBA (uncoupled)
52 *
53 *DIRECT   2.          CC Tls for the incident and outgoing channel + DwBA
54 *DIRECT   3.          DwBA calculation for all collective levels
55 *DIRPOT   2408.      OMP for the scattering on collective levels if DIREC
56 ***
57 * Preequilibrium models
58 *
59 MSD      0.          Quantum statistical Multi-Step-Direct model
60 MSC      0.          Quantum statistical Multi-Step-Compound model
61 PCROSS   1.5        Exciton model with default 1.5 MFP parameter
62 HMS      0.          Monte Carlo Hybrid (DDHMS)preequilibrium model
63 *GTILNO   1.1  Z0  A0  1  Single particle LD for neutron PE emission increased
64 GO
65 @ Running title may be given in any line starting with @

```

Şekil 4.14. İsteğe bağlı girdi bölümü

“@” simgesi ile başlayan başlık tanımlama satırından hemen sonra reaksiyon hesaplama ve çıktı tanımlamalarının yapıldığı “Calculation Control” ve “Output Control” olarak isimlendirilen kısımlar başlar (Şekil 4.15). Bu bölümde, her ne kadar isteğe bağlı değişken girişleri olsa da bilinmesi gereken önemli parametreler vardır.

```

13 *****
14 @ TITLE: This is a default EMPIRE-3.2.3 input
15 IOUT      3.
16 NEX      080.           ! Number of points in the outgoing energy grid
17 ENDF      0.           ! No ENDF formatting by default (much faster runs)
18 RECOIL    0.           ! No recoils are calculated. Sizeable speed-up if no ENDF file is required
19 *KALMAN   1.           ! Sensitivity calculation requested
20 ***

```

**Şekil 4.15.** Girdi dosyası isteğe bağlı bölüm ve “Calculation Control” ve “Output Control” parametre satırları

Bu parametreler varsayılan olarak açılmaktadır. İşletilecek olan reaksiyon özelliğine göre belirlemek gerekmektedir.

IOUT: İşlem sonunda üretilecek olan çıktı dosyalarının ne kadar çok veriyi içerip içermeyeceğine karar verir. Varsayılan değer 1 ile 6 arasında bir değer verilebilir. 1 standart çıktı verisi 6 ise en kapsamlı çıktı verisi oluşturur. “Create Input” ile açılan “default.inp” dosyasında gelen varsayılan değer 3’tür. Bu parametreyi kullanmamak da mümkündür. Bu durumda varsayılan değer 1 olur.

NEX: Çıkan enerjiye ait nokta sayısı. Mermi parçacığı ağır iyon olan bir reaksiyon işletilecekse, bu değer farklı belirtilir; örneğin 100. Mermi parçacığı hafif iyon ise (proton, nötron gibi) bu durumda bu değer farklı girilir; örneğin 060. “default.inp” ile sunulan değişken değeri 080’ dir.

ENDF: Kontrol çıktılarının ENDF biçimli hale getirilmesi içindir. Bu parametre kullanılmadığında varsayılan değer ‘0’ dır. Eğer çıktının formatının düzenlenmesi isteniyorsa ‘1’ girilir.

ENDF (Evaluated Nuclear Data Formats); EMPIRE kodunun birincil tasarım amaçlarından biri, nükleer veri değerlendirmesini desteklemek için teorik hesaplamalar yapmaktır. Değerlendirilen nükleer reaksiyon verilerinin veri dosyaları için uluslar arası kabul görmüş biçimi ENDF-6’ dır. Format kuralları “Kesit Değerlendirme Çalışma Grubu” (CSEWG) adına, “ABD Ulusal Nükleer Veri Merkezi” (NNDC) tarafından tanımlanır. ENDF, öncelikle ilgili bozunma verileri, Fizyon-ürün verimi verileri, nötron ısıl saçılımı verileri, foto-atomik etkileşim verileri ve diğerleri için nötron reaksiyonu verileri için tasarlanmıştır. ENDF-6 ayrıca fotonlar ve yüklü parçacıklar tarafından indüklenen nükleer reaksiyonlar için verilerin eklenmesine izin verir.

RECOIL: Tesir kesit kontrol hesaplamaları. Alabileceği değerler 0 ya da 1' dir. ENDF değeri 0 verildi ise tesir kesit bağımsız biçimde hesaplanmaz.

Default.inp dosyasında "Calculation Control" ve "Output Control" bölümünden sonra Şekil 4.14' de örnek girdi dosyasında görülen EMPIRE kodunu teşkil eden; Hauser – Feshbach istatistiği, ve optik model, denge öncesi model ve fizyon reaksiyonları gibi nükleer reaksiyon modellerine ait parametrelerin tanımlandığı bölüm başlar. Bu satırlarda da istenilen parametreler çalışılacak reaksiyon türüne göre belirlendikten sonra "GO" yazan satır (Şekil 4.14' deki son satır) ile isteğe bağlı parametre girişleri tamamlanır. GO ile başlayan satırdan sonra reaksiyon için eğer tek bir enerji değeri değil de bir dizi enerji aralığı için çalışılacaksa burada her bir enerji değeri alt alta girilir (Şekil 4.16). Tanımlanacak enerji adımlarının bir sınırı yoktur. Reaksiyonun gerektirdiği aralık ne ise o kadar sayıda satır tanımlanabilir.

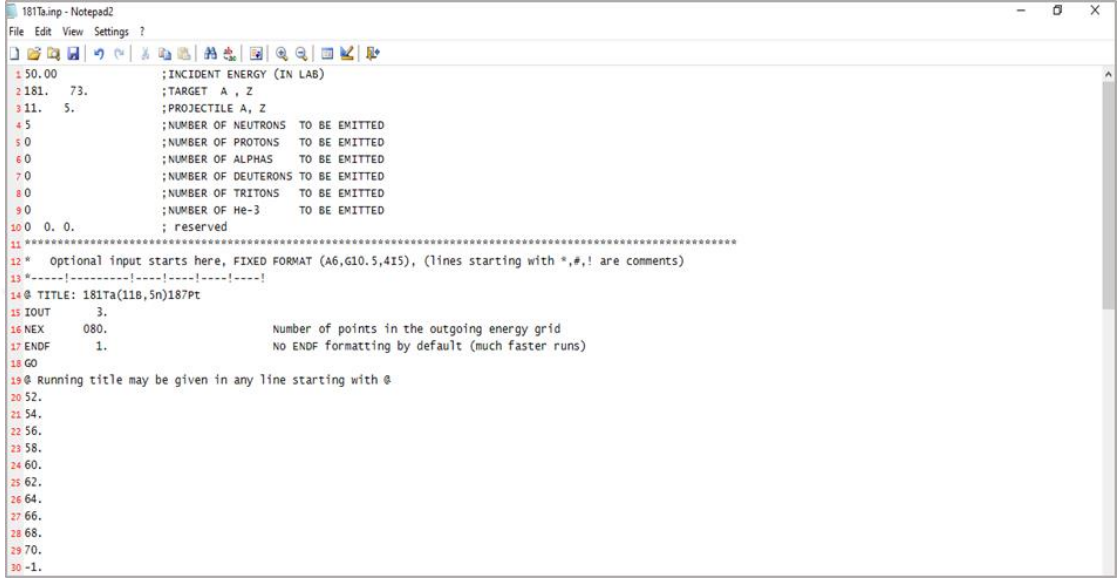
```
38 GO
39 50.7
40 53.0
41 55.2
42 57.6
43 59.8
44 62.0
45 64.0
46 66.0
47 68.0
48 70.0
49 79.3
50 86.1
51 -1.
52
```

**Şekil 4.16.** Çalışılacak reaksiyon için enerji adımları

Enerji değerlerinin girilmesinin ardından son olarak, girdi dosyasının parametre tanımlama işleminin bittiğini ifade eden "'-1'" ile bitirilir. Eğer dosyada herhangi bir yerde bu bilgi kullanılmışsa (-1 satırı) süreç bu satırla bitirilmiştir anlamına gelir. Bu satırdan sonra yazılacak herhangi bir bilgi kod tarafından dikkate alınmayacaktır.

#### 4.2.4 Örnek girdi dosyası

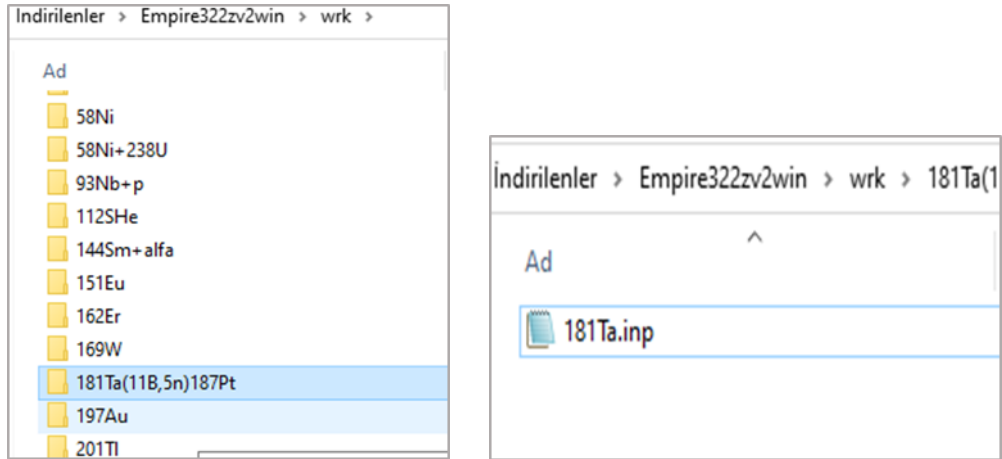
Yukarıdaki bölümlerde anlatılan bilgiler doğrultusunda Çok fazla reaksiyon parametresi içermeyen bir örnek girdi dosyası Şekil 4.17’ de verilmiştir. 50-80 MeV aralığındaki  $^{181}\text{Ta}(^{11}\text{B},5n)^{187}\text{Pt}$  reaksiyonu için örnek girdi dosyası aşağıdadır.



```
1 50.00 ; INCIDENT ENERGY (IN LAB)
2 181. 73. ; TARGET A , Z
3 11. 5. ; PROJECTILE A , Z
4 5 ; NUMBER OF NEUTRONS TO BE EMITTED
5 0 ; NUMBER OF PROTONS TO BE EMITTED
6 0 ; NUMBER OF ALPHAS TO BE EMITTED
7 0 ; NUMBER OF DEUTERONS TO BE EMITTED
8 0 ; NUMBER OF TRITONS TO BE EMITTED
9 0 ; NUMBER OF He-3 TO BE EMITTED
10 0. 0. ; reserved
11 *****
12 * Optional input starts here, FIXED FORMAT (A6,G10.5,4I5), (lines starting with *,#,! are comments)
13 *-----!-----!-----!
14 @ TITLE: 181Ta(11B,5n)187Pt
15 IOUT 3.
16 NEX 080. Number of points in the outgoing energy grid
17 ENDF 1. No ENDF formatting by default (much faster runs)
18 GO
19 @ Running title may be given in any line starting with @
20 52.
21 54.
22 56.
23 58.
24 60.
25 62.
26 64.
27 66.
28 68.
29 70.
30 -1.
```

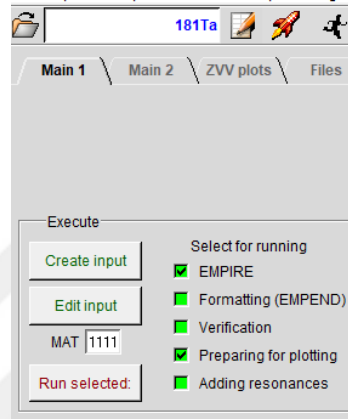
Şekil 4.17. Örnek girdi dosyası

Hazırlanan bu girdi dosyası EMPIRE kodunun bulunduğu dizin altına, çalışma kolaylığı sağlaması açısından reaksiyonun adı veya kullanıcı tarafından dilenen bir isimle yeni bir klasör oluşturularak kaydedilir. Bu sayede işletilen her reaksiyon için sonuçların daha rahat takip edilmesi ve karışıklık yaşanmaması adına etkili olduğu için önerilir.



Şekil 4.18. Reaksiyon için çalışma alt dizini

Hazırlanan girdi dosyası Şekil 4.10'da anlatıldığı gibi GUI ekranı üzerindeki sekmeler yardımıyla seçilir ve yine ekran üzerindeki sekmelerden tüm işlem adımlarının uygulandığı (yani EMPIRE hesaplamaları + veri çıktı biçimlendirme (ENDF) + çıktı gözden geçirme + grafik çıktıları hazırlanması işlemlerini içeren) yada sadece EMPIRE hesaplamalarının yapıldığı kısa çalıştırma versiyonu ile çalıştırılır. Bir diğer seçenek ise Main 1 sekmesi altında yer alan kutucuklardan istenilen çıktıların işaretlenip çalıştırılabilmesidir. (Şekil 4.19)



Şekil 4.19. Reaksiyonun çalıştırılma seçeneği

Reaksiyon çalıştırdıktan sonra elde edilen tesir kesit değerlerini içeren çıktı dosyası örneği aşağıda verilmiştir.

	Elastic	None1-Ce1	Fission	Mu-bar	Nu-bar	(z,gamma)	(z,n)	(z,2n)	(z,3n)	(z,4n)	(z,5n)
1											
2	Elastic	None1-Ce1	Fission	Mu-bar	Nu-bar	(z,gamma)	(z,n)	(z,2n)	(z,3n)	(z,4n)	(z,5n)
3	0.0000E+00	2.31543E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.07592E-07	4.71053E-08	6.61945E-01	5.81394E+01	1.56400E+02	1.00469E-01
4	0.0000E+00	3.39385E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.10002E-07	2.13056E-08	5.31463E-01	5.34917E+01	2.55461E+02	1.88722E+00
5	0.0000E+00	4.47142E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.27296E-07	0.0000E+00	3.77526E-01	4.31882E+01	3.48917E+02	1.19093E+01
6	0.0000E+00	5.54025E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.38942E-08	0.0000E+00	2.46535E-01	3.19035E+01	4.18662E+02	4.19276E+01
7	0.0000E+00	6.60293E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.18631E-08	0.0000E+00	1.49089E-01	2.23280E+01	4.54743E+02	9.92643E+01
8	0.0000E+00	7.64235E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.30570E-08	0.0000E+00	8.71395E-02	1.52573E+01	4.49777E+02	1.88490E+02
9	0.0000E+00	8.64381E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.22155E-08	0.0000E+00	3.47771E-02	1.01896E+01	4.10471E+02	2.98943E+02
10	0.0000E+00	9.59269E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.71000E-03	6.72642E+00	3.49148E+02	4.16737E+02
11	0.0000E+00	1.04897E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.57507E-05	4.44761E+00	2.80431E+02	5.21785E+02
12	0.0000E+00	1.13399E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.50785E-06	2.88330E+00	2.15520E+02	5.93952E+02
13	0.0000E+00	1.21439E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.64513E-06	1.90310E+00	1.59965E+02	6.27098E+02
14											

Şekil 4.20. Tesir kesit çıktı dosyası

Çalışılacak olan reaksiyon özelinde tüm girdi parametreleri ve detaylı bilgi için kullanıcı kılavuzuna (Herman vd.,2013) bakılabilir.

### 4.3 HIVAP Kodu

HIVAP, çeşitli reaksiyonlar için üretim tesir kesitlerini tahmin etmek için yaratılmış bir koddur. JORPLE ve SPIT gibi önceki kodların başarısızlıklarından biri, en ağır elementler gibi, yalnızca çekirdek haritasının belirli bir bölgesi için yararlı olma eğilimidir. JORPLE kodunun temelleri, ağır element reaksiyonları için üretim kesitlerinin tahminlerine dayanmaktadır. Bilgisayar kodu 1970 yılında yazılmıştır. Bu kod, çeşitli ağır element reaksiyonlarından beklenebilecek tesir kesitlerin genel bir tahminini sağlar. JORPLE kodundaki toplam füzyon olasılığı, yalnızca Hill ve Wheeler yaklaşımı kullanılarak hesaplanan bariyer penetrasyon olasılığına dayanmaktadır. SPIT kodu, kesit tahminlerinin doğruluğunu artırmak için geliştirilen JORPLE kodunun bir modifikasyonudur. Tahminlerin mevcut deneysel verileri daha iyi yansıtması amacıyla etkileşim potansiyeli değiştirilerek orijinal koda değişiklikler yapılmıştır. SPIT kodu, farklı bir Coulomb potansiyelinin yanı sıra farklı bir nükleer potansiyel kullanımında JORPLE kodundan farklıdır. Etkileşimin rotasyon kısmı potansiyel JORPLE kodundaki ile aynı tutulur. Coulomb potansiyeli şu kaynaklardan alınmıştır: Bondorf, Sobel ve Sperber. Etkileşim potansiyelinin nükleer kısmı Bass yakınlık potansiyeline bağlıdır (Patin, 2002).

HIVAP kodu, yüksek düzeyde uyarılmış çekirdeklerin uyarılmasını inceleyen önceki bir kodun bir modifikasyonudur. GROGI adı verilen bu kod, büyük uyarma enerjilerine ve büyük açısal momentum değerlerine sahip çekirdeklere bakmaya dayanmaktadır. Nötron, gama ışını ve yüklü parçacık emisyonu yoluyla uyarılmış bileşik çekirdeğin istatistiksel olarak uyarılmasını içerir (Patin, 2002).

HIVAP, fizyonun uyarılma aşamasına dahil edilmesinin yanı sıra seviye yoğunluğu hesaplamaları, etkileşim engelleri, temel durum kütleleri ve kabuk etkileri ve fizyon engellerine yeni anlayışların dahil edilmesi yoluyla GROGI kodunun iyileştirilmesidir. HIVAP kodunun avantajlarından biri, üretim tesir kesitlerinin hesaplanmasında yer alan birçok parametrenin belirlenmesi için çoklu bağımsız kaynakların kullanılmasıdır (Patin, 2002).

HIVAP hesaplamaları için kullanılan nükleer reaksiyon modeli, süreci iki aşamaya ayırır. Birincisi, mermi ve hedef çekirdeklerin merkezi bir çarpışmasında bileşik

çekirdeğin oluşumudur; ikincisi, fazla enerjiyi bileşik çekirdekten uzaklaştıran nükleonlar, alfa parçacıkları ve gama ışınlarının buharlaşmasının istatistiksel sürecidir.

Belirli bir reaksiyonda üretilebilen çekirdekler için tesir kesitleri belirleyen ikinci işlemdir (Freeman, 2008) HIVAP, standart buharlaşma teorisini kullanan istatistiksel bir buharlaştırma kodu olması sebebiyle (Reisdorf, 1981) nötron ve proton buharlaşması, alfa parçacık emisyonu, gama ışını bozunması ve fizyon gibi çeşitli bozunma kanalları arasındaki rekabeti hesaba katar. Birkaç değişiklikle iki Fermi-gaz modeli açısıl momentuma bağlı seviye yoğunluk formülünü kullanır (Reisdorf ve Schadel, 1992). Yayılan parçacıkların yörüngesel açısıl momentumu ile artık nükleer spin arasındaki bağlantı, kodda yer alır.

#### **4.3.1 Hivap girdi parametreleri hakkında**

Tüm parametreler, birkaç sınırlamaya tabi, serbest girdi biçimindedir. Parametre değerleri ('sayılar') arasında herhangi bir metin olabilir. Bununla birlikte, sayılar metinden ayırt edilebilir olmalıdır: ya bir satırın başında olmalı ya da önünde bir boşluk ya da eşittir işareti olmalıdır =. Bu kuralın bir sonucu, parantez içindeki sayıların sayı olarak tanınmamasıdır. Her gerekli parametre için bir numara olmalıdır. Her parametre 'grubu' bir veya birkaç satıra yazılabilir, ancak yeni bir grup yeni bir satır ile başlamalıdır. Aşağıdaki girdi özetinde, hangi parametrelerin bir 'gruba' ait olduğunu ayırma çizgileriyle (-----) gösterilmiştir. Girdi dosyasında bu ayırma çizgileri isteğe bağlıdır ('sayılar' arasındaki metin gibi).

Ancak satırların hiçbirisi 72 sütunluk uzunluğu geçmemelidir.

#### **4.3.2 Girdi dosyası**

Aşağıda HIVAP için örnek bir girdi dosyası verilmiştir.

```

File Edit View Bookmarks Tools Settings Help
New Open Save Save As Close Undo Redo
comment (aaa) F-exp LB=0 CRC Vo=59 MeV SRO=3.5% Kf=0.75 00120099
----- 00130002
MPROJ= 1 ZPROJ=1 MTARG= 89 ZTARG= 39 00140099
ISHELL(GS)= 2 ISHELL(SADDLE)= 2 PAIRING= 4 MC= 0 MP= 0 00150002
IBF= 1 FISROT PARAMETERS= 0 00160002
NOFISSION= 0 NONEUTRONS= 0 NOPROTONS= 0 NOALPHAS= 0 NOGAMMAS= 0 00170099
DISC=3 GAMMA PARAMETERS(IGAM)= 1 00180005
----- 00190002
NEUTRONS= 10 PROTONS= 10 00200099
MASSES LOG UNIT= 9 NUMB= 0 IOVER=0 INERT= 0 INERF= 0 FINERT= 1 00210099
LIMITS= 1 PRINT= 1 LOGUN= 0 ICOR= 1 ISOMERS= 0 LEVDENS= 1 00220099
IRAST= 0 WKB= 1 ITRANS= 0 JFJI = 0 00230002
----- 00240002
ANG.MOM. LOSS NEUTRONS 1 PROTONS 1 ALPHAS 3 00250002
----- 00260002
IF IGAM NOT ZERO 00270002
EG1WU= 0.004 EG2WU=10 EG1MIN= 1 EG1MAX=10 00280099
EG2MIN= 1 EG2MAX= 4 JFACT=1 00290002
----- 00300002
IF IGAM NOT ZERO 00310002
CGIANT= 0.0 EGIAN= 0 WGIANT= 0 STRIPE= 0 IOPT= 0 00320099
----- 00330002
ROSCPAWR= 1.153 WRLEVD= 1.0 BARFAC= 0.00 EDAMP= 18.5 BAR0= 0. 00340099
SHELL0= 0.0 DELT= 11. QVALUE= 0. 00350099
----- 00360099
ONLY IF LIMITS NOT ZERO 00370099
CUT=.1E-6 FRACT2=.1E-6 ABSMIN=0 PRCN=0 SIGLOW=0 DEL1=0 NOLEP=0 =0 =0 00380099
----- 00390099
IF INERT NOT ZERO (LOWER PART YRAST LINE) 00400002
ENERGY SPIN ENERGY SPIN ENERGY SPIN 00410002
E=400 EXC=0 FUS=11 LIMBAR=1 JLOW=0 JUP=0 0 TSTROT=0 JFIS=2 EN= 0 00420099
Vo=59 R0=1.0965 D=0.75 Q=0 1 0 0 0 0 00430099
SIGRO=3.0 CUTOFF=3 XTH=0 APUSH=0 FPUSH=0.75 00440099
----- 00450099
-1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 00420099

```

Şekil 4.21. Hivap örnek girdi dosyası

Şekil 4.21'deki girdi dosyasında mermi ve hedef için kütle ve atom numarası bilgilerinin girildiği kısım Şekil 4. 22'de gösterilmiştir;

```

File Edit View Bookmarks Tools Settings Help
New Open Save Save As Close Undo Redo
comment (aaa) F-exp LB=0 CRC Vo=59 MeV SRO=3.5% kf=0.75 00120099
----- 00130002
MPROJ=20 ZPROJ=10 MTARG= 24 ZTARG= 12 00140099
ISHELL(GS)= 2 ISHELL(SADDLE)= 2 PAIRING= 4 MC= 0 MP= 0 00150002
IBF= 1 FISROT PARAMETERS= 0 00160002
NOFISSION= 0 NONEUTRONS= 0 NOPROTONS= 0 NOALPHAS= 0 NOGAMMAS= 0 00170099
DISC=3 GAMMA PARAMETERS(IGAM)= 1 00180005
----- 00190002

```

Şekil 4.22. Mermi ve hedef için bilgiler

Burada;

MPROJ : Merminin kütle numarası

ZPROJ : Merminin proton sayısı

MTARG: Hedefin kütle numarası

ZTARG: Hedefin proton sayısıdır.

Üretim kanallarının gözlemlenmesi için salınan proton ve nötron sayılarının belirlendiği satır aşağıda gösterilmiştir.

```
NEUTRONS= 10  PROTONS= 10
MASSES LOG UNIT= 9  NUMB= 0  IOVER=0  INERT= 0  INERF= 0  FINERT= 1
LIMITS= 1  PRINT= 1  LOGUN= 0  ICOR= 1  ISOMERS= 0  LEVDENS= 1
IRAST= 0  WKB= 1  ITRANS= 0  JFJI = 0
```

**Şekil 4.23.** Reaksiyon sonunda salınacak proton ve nötron sayıları

Burada program varsayılan değer olarak proton ve nötron için 1' den başlatır. Bu nedenle eğer örneğin "1n1p" kanalı gözlemlenmek isteniyorsa nötron için "2" proton için "2" değerleri girilmelidir. Enerji değerinin girildiği satır ise aşağıda verilmiştir.

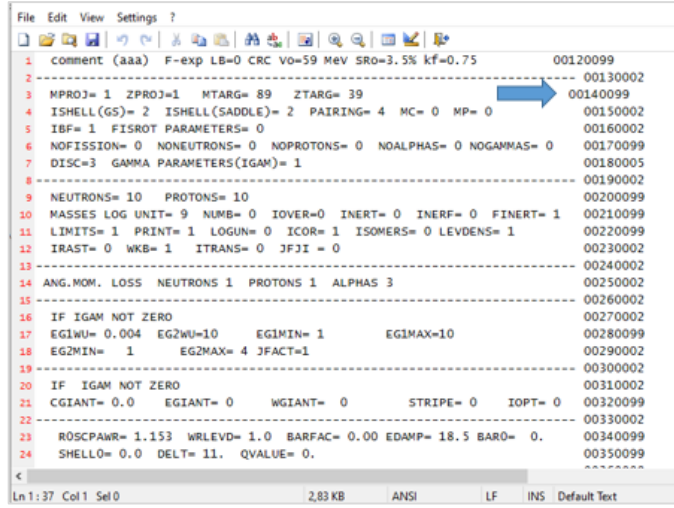
```
E=400      EXC=0  FUS=11  LIMBAR=1  JLOW=0  JUP=0  0  TSTROT=0  JFIS=2  EN= 0
V0=59      R0=1.0965  D=0.75      Q=0    1    0    0    0
SIGR0=3.0  CUTOFF=3  XTH=0      APUSH=0  FPUSH=0.75
```

**Şekil 4.24.** Enerji değerinin verildiği satır

Enerji değeri MeV mertebesinde. Burada hesaplamalar için eğer "laboratuvar enerjisi" kullanılacaksa;

E=400 (örneğe göre) kısmına yazılır. Hesaplamalarda uyarılma enerjisi kullanılacaksa enerji değeri (Excitation) EXC=0 (örneğe göre) yazan kısma girilir. Ayrıca enerji değeri girilirken ondalıklı değerler varsa "." ile ayrılmalıdır. Eğer "," kullanılırsa program hata verecektir.

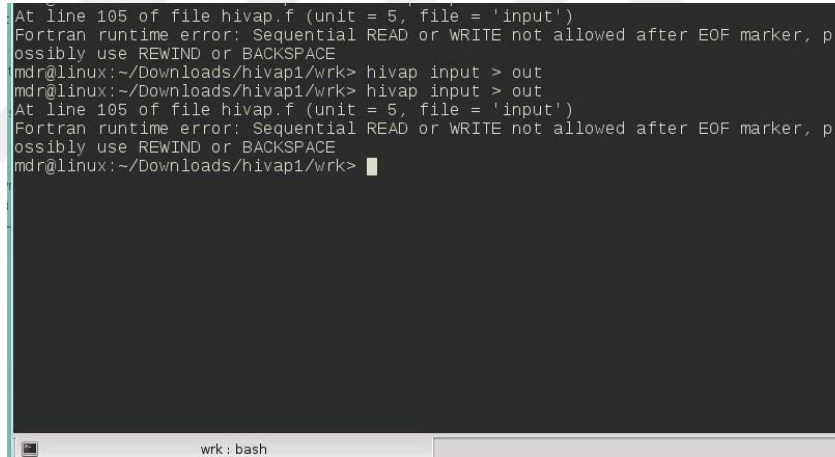
Programın düzgün çalışması için dikkat edilmesi gereken bir diğer husus işaretleyicilerin hizalı olması gerekmektedir. Örneğin aşağıdaki gibi (mavi ok ile işaretlenen kısım) herhangi bir veya birkaç satırda kayma olursa program çalışmaz.



```
File Edit View Settings ?
1 comment (aaa) F-exp LB=0 CRC VO=59 MeV SRO=3.5% kf=0.75 00120099
2 ----- 00130002
3 MPROJ= 1 ZPROJ=1 MTARG= 89 ZTARG= 39 00140099
4 ISHELL(GS)= 2 ISHELL(SADDLE)= 2 PAIRING= 4 MC= 0 MP= 0 00150002
5 IBF= 1 FISROT PARAMETERS= 0 00160002
6 NOFISSION= 0 NONEUTRONS= 0 NOPROTONS= 0 NOALPHAS= 0 NOGAMMAS= 0 00170099
7 DISC=3 GAMMA PARAMETERS(IGAM)= 1 00180005
8 ----- 00190002
9 NEUTRONS= 10 PROTONS= 10 00200099
10 MASSES LOG UNIT= 9 NUMB= 0 IOVER=0 INERT= 0 INERF= 0 FINERT= 1 00210099
11 LIMITS= 1 PRINT= 1 LOGUN= 0 ICOR= 1 ISOMERS= 0 LEVDENS= 1 00220099
12 IRAST= 0 WKB= 1 ITRANS= 0 JFJI = 0 00230002
13 ----- 00240002
14 ANG.MOM. LOSS NEUTRONS 1 PROTONS 1 ALPHAS 3 00250002
15 ----- 00260002
16 IF IGAM NOT ZERO 00270002
17 EGIWU= 0.004 EG2WU=10 EGIMIN= 1 EGIMAX=10 00280099
18 EG2MIN= 1 EG2MAX= 4 JFACT=1 00290002
19 ----- 00300002
20 IF IGAM NOT ZERO 00310002
21 CGIANT= 0.0 EGIANT= 0 WGIANT= 0 STRIPE= 0 IOPT= 0 00320099
22 ----- 00330002
23 ROSCPAWR= 1.153 WRLEVD= 1.0 BARFAC= 0.00 EDAMP= 18.5 BAR0= 0. 00340099
24 SHELL0= 0.0 DELT= 11. QVALUE= 0. 00350099
-----
Ln 1:37 Col 1 Sel 0 2,83 KB ANSI LF INS Default Text
```

Şekil 4.25. Girdi dosyasında satırda kayma

Bu durumda programın çalışma komutunun girilmesinin hemen ardından aşağıdaki uyarı mesajı ekranda görülür.



```
At line 105 of file hivap.f (unit = 5, file = 'input')
Fortran runtime error: Sequential READ or WRITE not allowed after EOF marker, p
ossibly use REWIND or BACKSPACE
mdr@linux:~/Downloads/hivap1/wrk> hivap input > out
mdr@linux:~/Downloads/hivap1/wrk> hivap input > out
At line 105 of file hivap.f (unit = 5, file = 'input')
Fortran runtime error: Sequential READ or WRITE not allowed after EOF marker, p
ossibly use REWIND or BACKSPACE
mdr@linux:~/Downloads/hivap1/wrk> █
wrk: bash
```

Şekil 4.26. Hivap kodu hata mesajı

Yapılan hesaplamalarda tek bir enerji değeri değil de birkaç farklı enerji değeri kullanılacaksa enerji bilgisinin girildiği satırlar kopyalanıp art arda sıralanarak ilgili enerji değerleri girilerek hesaplamalar yapılır. Yani;



dosyasının ilgili kısımları dikkate alınmıştır. Aşağıda örnek bir çıktı dosyasının ilgili kısmı görülmektedir.

```

File Edit View Bookmarks Tools Settings Help
New Open Save Save As Close Undo Redo
RLOSTP 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
RLOSTA 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
TIME 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
STORAGE
0. 0. 0. 0. 0. 0. 2. 0. 1. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
1 ENERGY 85.000 0.000
HIVAP ENGOUT
COMMENT (aaa) F-exp LB=0 CRC VO=59 MeV SRO=3.5% kf=0.75 0012
ELAB= 85.0 EXCIT= 62.9 CN= 44TI
FISSION X-SECT= 0.1228E+04 LCRTT= 33.0
EVAP SO FAR 0.1327E+04 FISSIION 0.8488E-01
MASS DISTRIBUTION
4 3 2 1 0 9 8 7 6 5
44 0.000E+00 0.5648E-04 0.9511E-01 0.3903E+01 0.2060E+02 0.3051E+02 0.8390E+02 0.8477E+02 0.2955E+03 0.2308E+03
34 0.9346E+02 0.2045E+01 0.4224E+03 0.3493E+02 0.3372E+00 0.0000E+00 0.2330E+02 0.3023E-03 0.0000E+00 0.0000E+00
Z-DISTRIBUTION
AL SI P S CL AR K CA SC TI
0.302E-03 0.238E+02 0.319E+02 0.481E+03 0.210E+03 0.453E+03 0.887E+02 0.367E+02 0.141E+01 0.158E+00
CROSS SECTIONS (NB)
38TI 38TI 37TI 38TI 39TI 40TI 41TI 42TI 43TI 44TI
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.251E-07 0.127E+00 0.291E-01 0.565E-04 0.000E+00
34SC 35SC 36SC 37SC 38SC 39SC 40SC 41SC 42SC 43SC
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.250E+00 0.110E+01 0.614E-01 0.000E+00
33CA 34CA 35CA 36CA 37CA 38CA 39CA 40CA 41CA 42CA
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.169E-02 0.440E+01 0.118E+02 0.180E+02 0.253E+01 0.454E-02
32 K 33 K 34 K 35 K 36 K 37 K 38 K 39 K 40 K 41 K
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.940E-05 0.800E+01 0.588E+02 0.180E+02 0.232E+01 0.143E+00
31AR 32AR 33AR 34AR 35AR 36AR 37AR 38AR 39AR 40AR
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.488E+00 0.630E+02 0.285E+03 0.732E+02 0.208E+02 0.137E+00 0.257E-01
30CL 31CL 32CL 33CL 34CL 35CL 36CL 37CL 38CL 39CL
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.737E-02 0.390E+02 0.168E+03 0.473E+00 0.258E+01 0.000E+00 0.522E-04
28 S 29 S 30 S 31 S 32 S 33 S 34 S 35 S 36 S 37 S 38 S
0.000E+00 0.000E+00 0.301E+01 0.422E+03 0.202E+01 0.540E+02 0.236E-05 0.214E-01 0.000E+00 0.000E+00
28 P 29 P 30 P 31 P 32 P 33 P 34 P 35 P 36 P 37 P
0.000E+00 0.000E+00 0.150E-01 0.318E+02 0.000E+00 0.173E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
27SI 28SI 29SI 30SI 31SI 32SI 33SI 34SI 35SI 36SI
0.000E+00 0.233E+02 0.000E+00 0.322E+00 0.000E+00 0.291E-11 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
26AL 27AL 28AL 29AL 30AL 31AL 32AL 33AL 34AL 35AL
0.000E+00 0.302E-03 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
AVERAGE Z, DELTAZ, FWHMZ SO FAR 17.10 4.90 2.88
AVERAGE A, DELTAA, FWHMA SO FAR 34.47 9.53 5.71
SPECTRUM G

```

Şekil 4.29. HIVap kodu örnek çıktı dosyası tesir kesit değerleri

Kullanıcılar daha farklı girdi dosyası oluşturabilmek için gerekli bilgilere ve detaylı açıklamalara programın kullanım kılavuzundan ulaşabilirler (Vermeulen vd.,1984; Reisdorf,1981)

Çizelge 4.1. HIVAP kodu için parametre setleri

DEĞİŞKEN	TANIMLAMA	DEĞER (Reisdorf, 1992)	TEZDE KULLANILAN
LEVELPAR	Seviye yoğunluğu için ölçek parametresi	1.153	1.153
AF/AN	Seviye yoğunluk oranı parametre değeri	1.0	1.0
BARFAC	Fizyon bariyeri için ölçek parametresi	1.0	0
EDAMP	Kabuk etkisi sönmleme enerjisi (MeV)	18.0	18.5
DELT	Nükleer eşleştirme düzeltme enerjisi (MeV)	11.0	11.0
V0	Nükleer potansiyelin başlangıç değeri (MeV)	70.0	59.0
R0	Nükleer yarıçap parametresi (fm)	1.12	1.0965
D	Nükleer yarıçap parametresindeki bulanıklık (fm)	0.75	0.75
Q2	Nükleer dört kutuplu moment (fm <sup>2</sup> )	1050	0
CRED	Etkileşim bariyeri için ölçek parametresi	1.0	1.0
SIGR0	Etkileşim bariyerinin dalgalanması (R0'ın yüzdesi)	3.0	3.0
CUTOFF	Bariyer dalgalanmaları için (SIGR0)'daki entegrasyon limitleri	5.0	3.0
XTH	Ekstra itme teorisi eşik bölünebilirlik parametresi	0.7	0
APUSH	Ekstra itme teorisinden eğim katsayısı	18.0	18.0
FPUSH	Ekstra itme teorisinden açısal momentum katsayısı	0.75	0.75

#### 4.4 TALYS Kodu

TALYS, nükleer reaksiyonların analizi için geliştirilmiş bir bilgisayar kod sistemidir. Yapısındaki temel düşünce 1 keV - 200 MeV enerji aralığında nötronlar, fotonlar, protonlar, döteronlar, tritonlar,  $^3\text{He}$  ve alfa parçacıkları ve kütle numarası 12 ve daha ağır hedef çekirdekleri içeren nükleer reaksiyonların simülasyonunu yapabilmektir. TALYS kodu 1.4 versiyonunda yapılan güncellemeler sonucunda, teknik olarak 1 GeV değerindeki enerjilere kadar çıkabilmektedir. Programın yaratıcıları bunu başarmak için, tek bir kod sistemine bir dizi nükleer reaksiyon modelleri uygulamışlardır. Bu, çözülmemiş rezonans aralığından orta enerjilere kadar nükleer reaksiyonları değerlendirebilmeyi sağlamaktadır. TALYS' in birbiriyle güçlü bir şekilde bağlantılı iki temel işlevi vardır. Birincisi, nükleer reaksiyon deneylerinin analizi için kullanılabilir bir nükleer fizik aracı olmasıdır. Deney ve teori arasındaki etkileşim, parçacıklar ve çekirdekler arasındaki temel etkileşim hakkında fikir verir ve kesin ölçümler, modellerin sınırlandırılmasını sağlar. Buna karşılık, ortaya çıkan nükleer modellerin yeterli öngörü gücüne sahip olduğuna inanılırsa, ölçümlerin güvenilirliğine dair bir gösterge verilebilir. Nükleer fizik aşamasından sonra, TALYS' in ikinci işlevi, bir nükleer veri aracı olması olarak açıklanabilir. TALYS, ya varsayılan bir modda, hiçbir ölçüm olmadığında ya da mevcut deneysel verileri kullanarak çeşitli reaksiyon modellerinin ayarlanabilir parametrelerinin ince ayarı yapıldıktan sonra, rezonans bölgesinin ötesinde, kullanıcı tanımlı bir enerji ve açı ızgarası üzerinde tüm açık reaksiyon kanalları için nükleer veri üretebilir. Bu hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla oluşturulan nükleer veri kütüphaneleri, mevcut ve yeni nükleer teknolojiler için temel bilgiler sağlar. TALYS' de kodlanan reaksiyon mekanizmaları teorik modellere dayalıdır ve uygulaması ancak günümüzün bilgisayar gücü ile mümkündür. Bu bağlamda TALYS tüm olası reaksiyon kanallarının tek bir hesaplama şemasında kesin olarak tanımlanması için yaratıcıları tarafından tüm reaksiyon aralıklarında eşit olarak geliştirilmesi hedeflenen ve kendini geliştirmeye devam eden kolay anlaşılabilir bir kaynak programı ve modüler bir kodlama yapısıdır (Koning vd., 2019).

Yalnızca bir veya birkaç reaksiyon kanalının çok ayrıntılı açıklaması yerine, birçok nükleer reaksiyon kanallarının eşzamanlı tahminini veren bir bilgisayar programı oluşturma fikri yeni yeni değildir. Bu tür hesaplamaları yapabilen çok içerikli kodların iyi bilinen örnekleri GNASH, ALICE, STAPRE ve EMPIRE' dir. Bu kodlar sadece

akademik amaçlar için değil, aynı zamanda dünya çapında var olan nükleer veri kitaplıklarının oluşturulması için yaygın olarak kullanılmaktadır. GNASH ve EMPIRE hala orijinal yazarları tarafından korunmakta ve genişletilmektedir. Buna karşılık ALICE ve STAPRE' nin çeşitli yerel sürümleri farklı uzantılar ve geliştirmelerle dünya çapında mevcuttur. TALYS, yakın zamanda tamamen sıfırdan yazılması anlamında(tutarlı bir programlama prosedürleri seti kullanan çok önemli bir modül olan birleştirilmiş kanallar kodu ECIS dışında) yenidir (Koning vd., 2019).

TALYS paketinin belirli özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Genel olarak; doğrudan, birleşik, denge öncesi ve fizyon reaksiyonları için en son nükleer modellerin çoğunun tam bir uygulaması,
- Geniş bir enerji aralığı (0,001-200MeV) ve kütle numarası aralığındaki ( $12 < A < 339$ ) reaksiyon mekanizmalarının sürekli, düzgün bir açıklaması,
- ECIS-06 kodu ile tamamen entegre optik model ve çiftlenmiş kanallar hesaplamaları,
- Birçok çekirdek için, son optik model (hem fenomenolojik, isteğe bağlı, hem de mikroskobik) parametrelendirmelerinin dahil edilmesi.
- Toplam ve kısmi tesir kesitler, enerji spektrumları, açısal dağılımlar, çift diferansiyel spektrumlar ve geri tepmeler,
- Sürekli ve kesikli foton üretim tesir kesitleri,
- Geri tepen çekirdekler için, izomerik tesir kesitleri içeren uyarılma fonksiyonları,
- (n,2np) gibi özel kanalları tesir kesitleri, spektrum ve geri tepenleri için tam bir modelleme,
- Kütleler, ayırık seviyeler, rezonanslar, seviye yoğunluk parametreleri, deformasyon parametreleri, fizyon bariyeri ve gama ışınımı gibi nükleer yapı parametreleri için IAEA referans girdi parametreleri kütüphanesinden otomatik referans kullanımı,
- İkili bileşik reaksiyonları için çeşitli genişlik dalgalanma modelleri ve daha yüksek enerjilerde, tüm reaksiyon kanalları kapanana kadar çoklu Hauser-Feshbach emisyonu,
- Çeşitli fenomenolojik ve mikroskobik seviye yoğunluk modelleri,

- Tesir kesitleri ve fisyon parçalarını, ürün verimlerini ve nötron çokluklarını tahmin etmek için çeşitli fisyon modelleri,
- Denge öncesi reaksiyonlar ve herhangi bir sıraya kadar çoklu denge öncesi reaksiyonlar için modeller,
- Çözümlememiş rezonans aralığı için parametrelerin oluşturulması,
- Noktasal tesir kesitlerin dahil edildiği rezonans aralığının, tablo haline getirilmiş rezonans parametreleri kullanılarak yeniden oluşturulması,
- Maxwellian ortalamasını kullanan astrofiziksel reaksiyon oranları,
- Hızlandırıcı enerjisi ve hüzme akımının bir fonksiyonu olarak medikal izotop üretim verimliliği,
- Bir mermi-hedef kombinasyonu yerine bir uyarılma enerjisi dağılımı ile başlama seçeneği TALYS' i çekirdek cascade (kademeli) kodları veya fisyon fragment çalışmaları ile birleştirmek için faydalıdır.
- Belirli bir reaksiyon mekanizması için yeterli bir teori henüz mevcut değilse veya uygulanmıyorsa veya basitçe daha fazla fiziksel nükleer model için öngörücü bir alternatif olarak sistematığın kullanılması,
- ENDF-6 formatında otomatik nükleer veri oluşturma (ücretsiz sürüme dahil değildir),
- Deneysel verilere otomatik optimizasyon ve kovaryans verilerinin oluşturulması (ücretsiz sürüme dahil değildir)
- Şeffaf bir kaynak programı,
- Kullanımı ve anlaşılması kolay giriş / çıkış iletişimi,
- Kapsamlı bir kullanım kılavuzu, (Koning vd., 2019)

#### 4.4.1 TALYS paketi

TALYS Unix/Linux işletim sistemi tabanlı bir programdır ve kurulum için yaklaşık 6Gb disk alanına (Bu oldukça büyük bellek miktarı, nükleer yapı veri tabanındaki mikroskobik seviye yoğunluğu, radyal yoğunluk, gama ve fisyon tablolarından kaynaklanmaktadır) ihtiyaç duyar.

TALYS paketini “www.talys.eu” adresinden alınırsa

- tar zxf talys.tar

komutuyla TALYS paketi otomatik olarak talys/dizininde depolanacaktır. Bu paket aşağıdaki dosya ve klasörleri içerir.

- Paketin içeriğini özetleyen “README”
- Kurulumla ilgili bir betik olan “talys.setup”
- Source: TALYS’in kaynak kodlarını içerir
- Structure: çeşitli alt klasörler içindeki nükleer yapı veri tabanını içerir.
- Doc: Bu kısım dökümantasyonu (postscript ve pdf formatında ve ECIS-06'nın açıklamasını içeren kısım) içerir.
- Samples: Örnek bazı reaksiyon durumları için Input (girdi) ve output (çıkıtı) dosyalarını içerir.

TALYS aşağıdaki derleyici ve işletim sistemleri için test edilmiştir.

- Çeşitli Linux sistemlerinde gfortran Fortran derleyici
- Çeşitli Linux sistemlerinde Intel ifort Fortran derleyicisi
- Çeşitli Linux sistemlerinde Portland PGF95 Fortran derleyicisi
- Çeşitli Linux sistemlerinde Fujitsu / Lahey Fortran90 / 95 derleyicisi
- Çeşitli Linux sistemlerinde g95 Fortran derleyicisi

#### 4.4.2 Kurulum

TALYS'in kurulumu basittir. Bir Unix / Linux sistemi için, kurulumun aşağıdaki gibi talys.setup betiği tarafından yapılması beklenir.

- talys.setup dosyası düzenlenir ve ilk iki değişkeni ayarlanır: 1-derleyici adı ve 2- TALYS çalıştırılabilir dosyasının depolanmak istendiği yer.
- talys.setup

Bir nedenden dolayı çalışmazsa Unix/Linux işletim sistemi için aşağıdaki adımlar izlenmelidir.

- `chmod -R u+rwX talys` (tüm dizinlerin ve dosyaların okuma ve yazma iznine ve dizinlerin yürütme iznine sahip olduğundan emin olmak için).
- `cd talys/source`
- TALYS'in nükleer yapı veri tabanını okuyabildiğinden emin olunmalıdır. Bu, `machine.f` alt rutininde yapılır. Eğer `talys.setup`, `machine.f`deki yol adını zaten değiştirmediyse, bu kullanıcı tarafından yapılmalıdır. Bu TALYS' in tek Unix / Linux makine bağımlılığından kaynaklı olabilir ve `ecis06t.f` için birkaç önemsiz uyarı mesajı dışında derleyici kaynaklı başka sorun kalmayacaktır.
- `f95 -c *.f`
- `f95 *.o -o talys`
- `mv talys ~/bin` (Herhangi bir çalışma dizininden çağrılabilen tüm yürütülebilir dosyaları içeren bir `~/bin` dizini olduğu varsayılırsa)
- Kullanıcı veya `talys.setup` bunu tamamladıktan sonra , aşağıdaki komut yazılır,
- `rehash` (tabloyu komutlarla güncellemek için)

Yukarıdaki komutlar, standart derleme seçeneklerini temsil eder. Derleme için tek kısıtlama `ecis06t.f`'nin çift kesinlikte derlenmemesidir (Koning vd., 2019).

#### 4.4.3 Doğrulama

TALYS kurulumundan sonra, `samples` dizini içindeki örnek olaylar test edilebilir. Bu dizin, tüm test olaylarını çalıştıran doğrulama komut dosyasını içerir. Her örnek olayın, Mac OS'de `gfortran` derleyicisiyle elde edilen girdi dosyalarını ve hesaplanan sonuçların saklandığı bir alt dizin `org /` içeren kendi alt dizini vardır. Ayrıca, yalnızca girdi dosyalarının saklandığı ve doğrulama komut dosyasının çıktı dosyalarını oluşturacağı yeni bir alt dizin içerir (Koning vd., 2019).

#### 4.4.4 Başlarken

Kullanıcı tarafından bir çalışma dizini oluşturulduysa, örneğin ‘‘input’’ adında, ardından TALYS aşağıdaki komutla kolaylıkla başlatılabilir.

```
talys < input > output
```

Burada ‘‘input’’ ve ‘‘output’’ dosya isimleri zorunlu değildir, istenilen isim verilebilir.

##### 4.4.4.1 Basit girdi dosyası hazırlama

Bir TALYS girdi dosyası, anahtar sözcükler ve bunlarla ilişkili değerlerden oluşur. TALYS için minimum bir girdi dosyası aşağıdaki şekildedir.

```
projectile n  
element al  
mass 27  
energy 14.
```

Bu örnek girdi dosyası TALYS' e sorulabilecek en basit soruyu temsil etmektedir. <sup>27</sup>Al çekirdeği 14 MeV' lik nötronlar tarafından bombardıman edilirse ne olur? Ancak bu basit görünen girdi dosyasının arkasında çeşitli nükleer modeller, parametreler, çıktı dosyası etiketleri için ilgilenilen ya da ilgilenilmeyen birkaç yüzden fazla varsayılan değerler mevcuttur.

Eğer kullanıcı, yukarıdaki gibi basit bir girdi dosyası kullanıyorsa bile yaratıcılar tarafından belirlenen varsayılan değerler yardımıyla oldukça detaylı bir çıktı dosyası elde eder. Varsayılandan başka belirli nükleer modelleri kullanmak, parametreleri ayarlamak veya çıktı dosyasında / dosyalarında daha spesifik bilgi almak istenirse, daha fazla anahtar sözcük gerekir. Daha fazla anahtar kelime, daha fazla esneklik ve yeterli kullanım durumunda daha iyi sonuçlar anlamına gelse de, varsayılan değerler kullanılarak yapılan hesaplamalarla bile yeterince iyi sonuçlar elde etmek mümkündür. TALYS için bir girdi dosyası oluştururken uyulması gereken temel kurallar bir sonraki bölümde anlatılacaktır. Daha fazla bilgi edinmek ve spesifik bir girdi dosyası

hazırlamak için gereken tüm parametreler ve girdi dosyasına eklenebilecek detaylarla ilgili tüm açıklamalara programın kullanım klavuzundan erişilebilir (Koning vd., 2019)

#### 4.4.4.2 Temel girdi kuralları

Teorik olarak, TALYS kullanımında, kullanıcının tarafından yapılabilecek herhangi bir girdi hatasından kaçınmak ve "varsayılan" değerlerle bir hesaplama devam etmek mümkündür. Programın yaratıcılarının TALYS' in kullanıcı dostu olması için gereken tüm ayrıntıyı düşünmüş olmaları sayesinde bu kodla çalışmak az bir çaba gerektirmektedir. Aşağıdaki basit kuralları ve olasılıkları uygulandığında, TALYS' in başarılı bir şekilde uygulanması beklenebilir.

Girdi dosyası:

- Bir giriş satırı bir anahtar kelime içerir. Yukarıda verilen basit örnekte olduğu gibi genellikle tek bir değer eşlik eder, ancak model parametreleri için bazı anahtar kelimelere aynı satırdaki endekslerin (genellikle Z ve A) eşlik etmesi gerekir.
- Bir anahtar kelime ve değerleri en az 1 boş karakterle ayrılmalıdır.
- Anahtar kelimeler rastgele sırayla verilebilir. Yanlışlıkla, aynı anahtar kelime birden fazla kullanılırsa, sonuncunun değeri benimsenir. Bu, farklı Z ve A endeksleri ile etiketlenmiş anahtar kelimeler için geçerli değildir. (Detaylar için bkz. Ref user manuel)
- Tüm karakterler küçük veya büyük harf olarak verilebilir.
- Bir anahtar kelimeye bir değer eşlik etmelidir. (Bir istisna vardır, rotasyonel anahtar kelime). Varsayılan değerleri kullanmak için, anahtar sözcükler giriş dosyasından çıkarılmalıdır.
- Sütun 1'de # ile başlayan bir girdi satırı ihmal edilir. Bu, giriş dosyasına yorum eklemek veya anahtar kelimeleri geçici olarak devre dışı bırakmak için yararlıdır.
- Minimal bir girdi dosyası her zaman ve mermi, element, kütle ve enerji anahtar kelimelerini içeren 4 satırdan oluşur. Bu 4 anahtar sözcük herhangi bir girdi dosyasında mutlaka verilmelidir.

- Bir girdi satırı 80 karakteri geçemez.

Kural 2, 3, 4 ve 6'ya bir örnek olarak, aşağıdaki girdi dosyasının ‘Basit Girdi dosyası Hazırlama’ kısmında verilene tamamen eşdeğer olduğu görülebilir:

```
# Equivalent input file
energy 14.
projectile n
mass 27
Element AL
#outbasic y
```

Aşağıdaki hatalı girdi dosyasında sadece ilk 2 satır doğru, diğer satırlarda ise 2 ve 5 numaralı kurallar ihlal edilmektedir.

```
projectile n
element al
mass27
energy
```

Bu gibi durumlarda uygulama durdurulur ve TALYS ilk karşılaşılan sorun için uygun bir hata mesajı verir. TALYS girdi dosyasındaki yazım hatalarını da tespit eder. Örneğin ‘projectile n’ yazılırsa, TALYS tarafından, anahtar kelimenin listede olmadığı söylenecektir (Koning vd., 2019).

#### 4.4.4.3 Dört temel anahtar kelime

Yukarıda açıklandığı gibi, en yüksek girdi seviyesini oluşturan 4 temel anahtar kelime vardır. Hafif bir parçacığın neden olduğu herhangi bir nükleer reaksiyon için temel parametreleri belirlerler.

### Mermi

Sırasıyla nötron, proton, döteron, triton,  $^3\text{He}$ , alfa ve gamayı temsil eden n, p, d, t, h, a, g ve a ve (mermi + hedef) şeklinde bir nükleer reaksiyon yerine kullanılan  $^0$  olmak üzere sekiz farklı sembol verilebilir. Örneğin:

projectile n

projectile d ... gibi.

Aralık: mermi n, p, d, t, h, a, g veya  $^0$ 'a eşit olmalıdır.

Merminin " $^0$ " olması durumu kullanım kılavuzunda özel durumlar başlığı altında detaylı incelenmiştir. Bu tez çalışmasında spin ve pariteler ile ilgilenilmediği için yalnızca tesir kesit hesaplamalarına yer verildiği için bu durum incelenmemiştir. Ayrıntılı bilgi için kullanım klavuzu incelenebilir (Koning vd., 2019).

### Element

Hedef çekirdeğin ya nükleer sembolü ya da yük numarası Z verilebilir. Element için olası değerler Li (3) ile C4 (124) arasındadır.  $Z > 110$  olan hedef nüklidler için element isimleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

Rg (111), Cn (112), Nh (113), Fl (114), Mc (115), Lv (116), Ts (117), Og (118), B9 (119), C0-4 (120-124). Örneğin;

element pu

element 41

element V

element B9

Aralık:  $3 \leq \text{element} \leq 124$  veya  $\text{Li} \leq \text{element} \leq \text{C4}$ .

## Kütle

Hedef çekirdeğin kütle numarası A. Hedefin doğal bir element olması durumunda, kütle 0 ile belirtilebilir. Ardından, doğal olarak oluşan her izotop için bir TALYS hesaplaması gerçekleştirir. Örneğin;

mass 239

mass 0

Aralık: kütle 0 veya  $5 < \text{kütle} \leq 339$  (Ekstra şart, hedef çekirdeğin, yani kütle ve element kombinasyonunun, proton ve nötron damlama hatları arasındaki tüm çekirdeklere karşılık gelen kütle veri tabanında bulunması gerektirir).

## Enerji

Enerji MeV mertebesindedir. Kullanıcının dört seçeneği vardır:

- Girişte gerçek sayı olarak tek bir olay enerjisi belirtilir,
- Her satırda bir olay enerjisi olmak üzere bir dizi olay enerjisi içeren bir dosya adı belirtilir. Bu dosyaya, bir karakterle başlaması ve çalışma dizininizde bulunması koşuluyla herhangi bir ad verilebilir (energies, range...vb gibi). 2. seçenek, uyarma işlevlerinin hesaplanması veya nükleer veri kitaplıklarının oluşturulması için yararlıdır. Mermi 0 ise seçenek (2) zorunludur, yani nükleer reaksiyon yerine uyarılmış bir çekirdek popülasyonu ile başlanırsa (detaylı açıklama için TALYS kullanım kılavuzu özel durumlara bakılabilir). TALYS-1.6'dan bu yana, bunun için bir dosya oluşturmak zorunda kalmadan tüm olay enerjilerini kullanmaya izin veren ek 2 seçenek vardır: (3) TALYS tarafından önceden tanımlanmış bir dosya adı. Bu, örneğin nötronlar için düşük enerjilerde daha ince bir enerji ızgarasına ve yüksek enerjilerde giderek daha geniş bir ızgaraya sahip fiziksel bağlantılı bir enerji ızgaraları içerir. Bunlar pE-E. grid biçimindedir, burada p, merminin adıdır ve iki E, sırasıyla tamsayı biçimindeki başlangıç ve bitiş enerjisidir. Grid bunun önceden tanımlanmış bir enerji ızgarasıyla ilgili olduğunu belirtir. Sık kullanılan bir örnek, TENDL kütüphanesinin nötron enerji ızgarası olan n0-200.grid'dir. EV ve keV aralığında

daha fazla enerji kullanılırken, yüksek enerjilerde otomatik olarak bir rota ızgarası kullanılır. Dosya n0-20.grid ile tam olarak aynı gelen enerji ızgarası kullanılır, ancak yalnızca 20 MeV'lik nihai enerjiye kadar. Son olarak, seçenek (4), enerji anahtar kelimesinden sonra 3 sayı vermektir: başlangıç enerjisi, bitiş enerjisi ve enerji adımı. Daha sonra, bu 3 sayıya göre eşit mesafeli bir ızgara yapılır. Örneğin;

energy 140.

energy 0.002

energy range

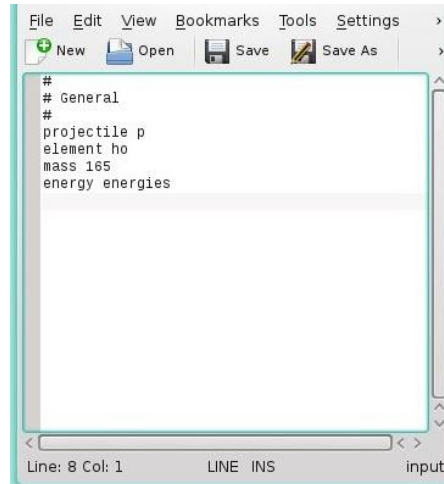
energy n0-30.grid

energy p10-100.grid

energy 0.5 20. 0.5 (Olay enerjileri: 0.5, 1, 1.5, ...20 MeV)

Aralık:  $10-11 \text{ MeV} \leq \text{enerji} < 1000 \text{ MeV}$  veya bir dosya adı; (buna karşılık gelen dosya adı en az 1 ve en fazla, olay enerjisinin maksimum "numenin"ini içermelidir. Burada numenin talys.cmb. de belirtilen bir dizi boyutudur. Şu anda numenin=500).

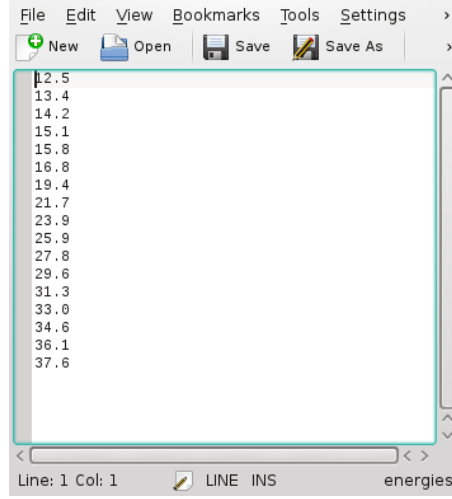
Kısaca şu ana kadar bahsedilen dört temel anahtar kelimeyi kullanarak örnek bir girdi dosyası ve enerji dosyası aşağıdaki gibidir.



```
# General
#
projectile p
element ho
mass 165
energy energies
```

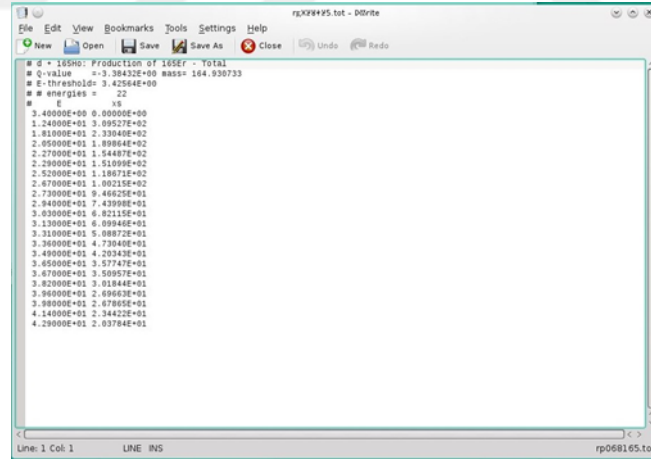
Şekil 4.30. TALYS kodu için örnek girdi dosyası

“energies” adı verilen enerji dosyasının içeriği ise;



**Şekil 4.31.** TALYS kodu enerji dosyası örneği

Şeklinde gösterilebilir. En temel hali ile hazırlanan böylesi bir girdi dosyası ile ‘‘ talys < input > output’’ komutu kullanılarak program çalıştırılır. Kod hesaplamayı bitirdikten sonra tüm üretilen izotoplara ait tesir kesit çıktı dosyaları ve diğer tüm hesaplamalara ait dosyalar oluşturulur. İncelenmek istenen izotopa ait tesir kesit çıktı dosyası örneği aşağıda verilmiştir.



**Şekil 4.32.** TALYS tesir kesit değerleri

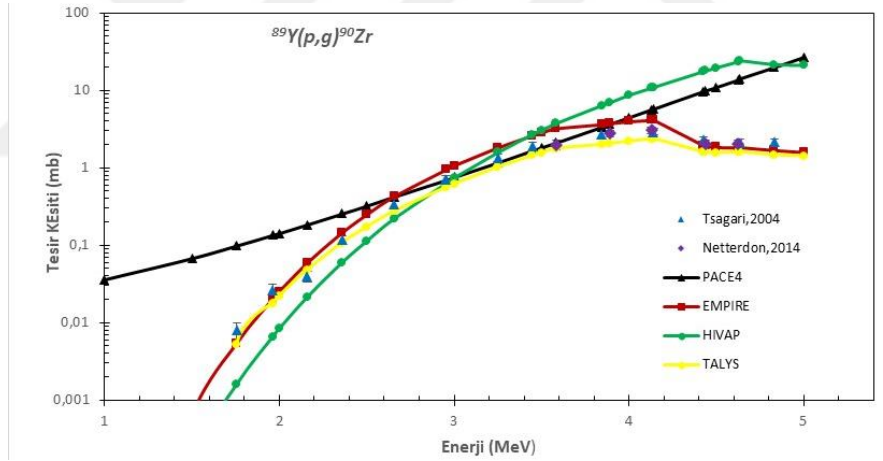
Eğer varsayılan değerler dışında parametreler kullanılacaksa tüm detaylara kullanım kılavuzundan ulaşılabilir. Ayrıca kılavuzda varsayılan olarak kullanılan değerlere ait tablolara da ulaşılabilir (Koning vd., 2019)

## BÖLÜM V

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 5.1 Proton ile Bombardıman Edilen Reaksiyonlar

Hauser-Feshbach (HF) hesaplamalarının farklı nükleer bileşenlerinin geçerliliğini araştırmak ve astrofiziksel uygulamalar için gerekli tesir kesit sistematiğine katkıda bulunmak amacıyla p-süreci enerji bölgesinde çalışılan  $^{89}\text{Y}(p, \gamma)^{90}\text{Zr}$  reaksiyonu için yapılan çalışma (Tsagari vd., 2004) ve HORUS gama ışınım spektrometresinin uygulamalarının , aynı reaksiyonun aynı enerji bölgesinde yapıldığı bir başka deneysel çalışmanın (Netterdon vd., 2014) sonuçları ile tez kapsamında kullanılan PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodları ile elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırmalı grafiği aşağıda verilmiştir.



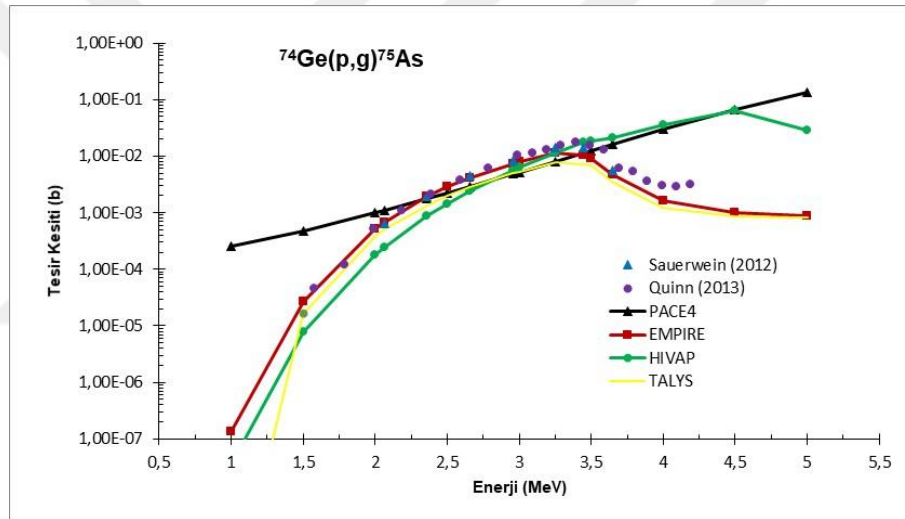
**Şekil 5.1.**  $^{90}\text{Zr}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Tsagari ve arkadaşlarının yapmış oldukları deney sonuçları ile MOST kodunun hesaplama sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Netterdon ve arkadaşları ise hesaplamalarında SIMNRA kodunu kullanmışlardır. Bu tez kapsamında yapılan hesaplamalardan deneysel veri ile en iyi uyum gösteren kodlar EMPIRE ve TALYS iken HIVAP kodunun sonuçları 3,5 MeV' e kadar deneysel verinin eğilimine uyum sağlasa da biraz daha düşük tesir kesit değerleri vermektedir. Fakat yaklaşık 3,5 MeV'

den sonra deneysel veri ile uyumsuz sonuçlar vermektedir. PACE4 kodu ise bu deney verisi için yaklaşık 2,5-4 MeV aralığında birkaç tesir kesit değerinde uyum sağlasa da genel eğilime pek uygun sonuçlar vermemektedir.

$^{75}\text{As}$

P-çekirdek bilgi ağını geliştirmek amacıyla hafif p çekirdek üretim mekanizmasını incelemek amacıyla yapılan iki farklı deneysel çalışmanın verileri ele alınarak kararlı  $^{75}\text{As}$  çekirdeğinin üretildiği  $^{74}\text{Ge}(p,\gamma)^{75}\text{As}$  reaksiyonu için kodlar yardımıyla hesaplanan tesir kesit değerlerinin deney verileri ile karşılaştırıldığı grafik aşağıda verilmiştir.



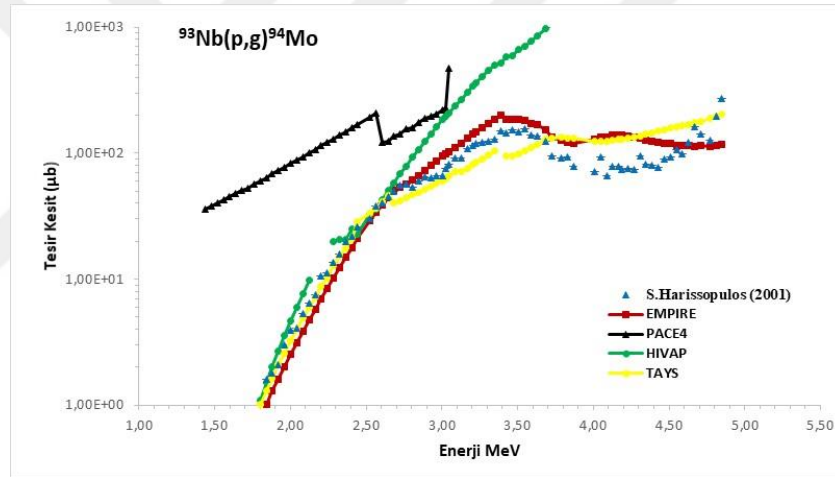
**Şekil 5.2.**  $^{75}\text{As}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmalardan Sauerwein ve arkadaşlarının yaptıkları simülasyonlarda SMARAGD kodunu kullanırken, Quinn ve arkadaşları ise SMARAGD kodunun öncül kodu olan NON-SMOKER kodunu ve TALYS kodunun; TALYS-CTFG (sabit sıcaklık Fermi gaz modeli) TALYS- BSGF (geri kaydırılmış Fermi gaz modeli) ve TALYS-GT (mikroskobik seviye yoğunluk Gariely Tablosu) gibi farklı seviye yoğunluk parametrelerini kullanmışlardır. Tez kapsamındaki tüm hesaplamalarda olduğu gibi TALYS kodu ile yapılan hesaplamalarda da programın varsayılan değerlerini kullanarak elde edilen sonuçlar kullanıldı ve diğer kodlarla bu sonuçlar karşılaştırıldı. Bu durumda

da deney ile uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Ayrıca bu deneysel veriler için EMPIRE kodunun sonuçlarının da oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. HIVAP sonuçlarının ise yaklaşık 3,5 MeV değerinden sonra veri ile uyumsuz olduğu görülmektedir. PACE4 kodunun sonuçları da bu deneysel veri için sadece birkaç tesir kesit değerinde yaklaşık sonuçlar verirken deneysel verinin genel eğilimine uyum sağlamadığı görülmektedir.

### <sup>94</sup>Mo

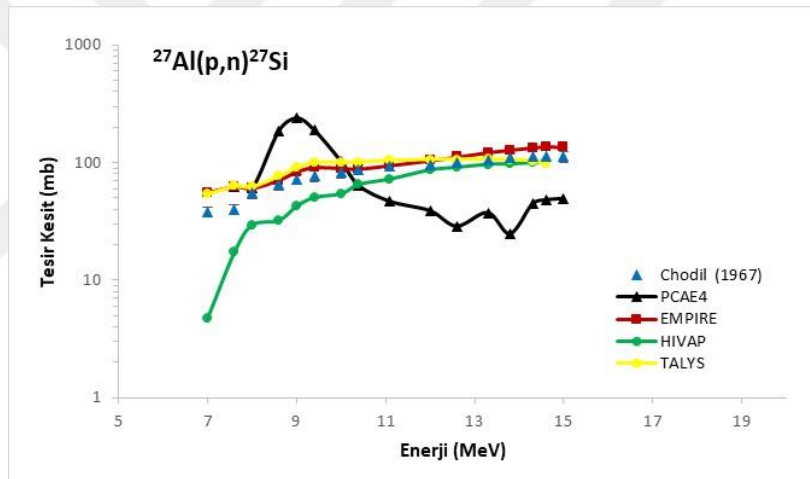
Mermi protonun enerjisinin 1,4 - 4,9 MeV arasında değiştiği p-süreci ile ilgili <sup>93</sup>Nb(p, γ)<sup>94</sup>Mo reaksiyonu için yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır (Harissopoulos vd., 2001). Elde edilen sonuçlara ait grafik aşağıdadır.



**Şekil 5.3.** <sup>94</sup>Mo için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada Harissopoulos ve arkadaşları MOST ve NON-SMOKER kodlarını kullanmışlardır. Tez kapsamında kullanılan dört kodun hesaplamalarıyla elde edilen tesir kesit değerlerinden EMPIRE, TALYS ve HIVAP kodunun 2,5 MeV değerine kadar oldukça uyumlu sonuç verdiği gözlenmiştir. Ancak bu enerji değerinden sonra HIVAP kodunun sonuçları tamamen uyumu kaybederken EMPIRE ve TALYS kodlarının nispeten daha uyumlu olduğu görülmektedir. PACE4 kodu ile elde edilen tesir kesit değerleri deney ile uyum göstermemektedir.

Nükleer haritadaki kararlı olan  $^{28}\text{Si}$  çekirdeğinden bir nötron eksik olan  $^{27}\text{Si}$  çekirdeği ele alınarak Chodil ve arkadaşlarının deneysel verileri kullanılarak  $^{27}\text{Al}(p,n)^{27}\text{Si}$  reaksiyonu için tez kapsamındaki kodlar yardımıyla elde edilen tesir kesit değerlerinin karşılaştırmaları aşağıdaki grafikte görülmektedir.  $^{27}\text{Si}$  için yarılanma süresi 4,16 saniyedir. Bu deneyin amacı 7,0 ile 15,0 MeV arasında değişen demet enerjisi ile Titanyum, vanadyum, kobalt, zirkonyum, niyobyum, gümüş, tantal ve altın elementlerinin ince hedefleri için (p, n) ve (p, 2n) reaksiyonları için uyarma fonksiyonlarını ve mutlak tesir kesitleri ölçmektir ( Chodil vd., 1967). Dolayısıyla bu amaç doğrultusunda çalışma yapmak isteyenler bu tez çalışmasındaki sonuçlarla bir kıyaslama yapabileme imkanı elde edeceklerdir.

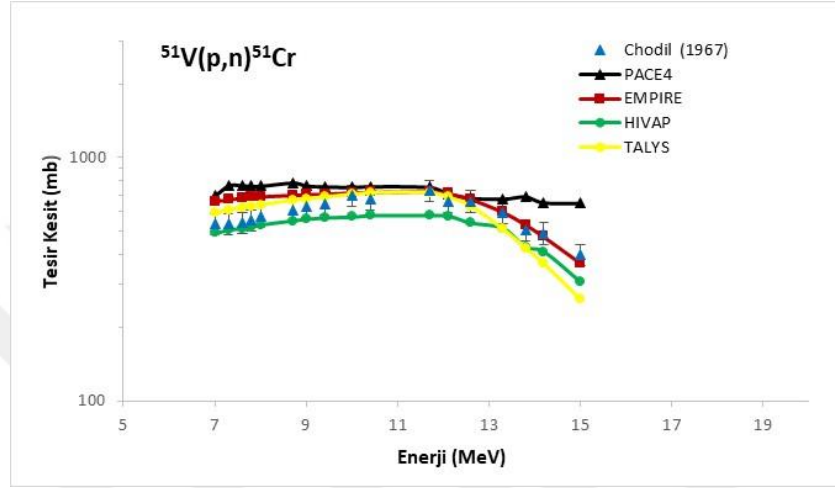


**Şekil 5.4.**  $^{27}\text{Si}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu deney verileri kullanılarak tezin temelindeki kodlarla hesaplanan tesir kesit değerlerinden en uyumlu sonuçların EMPIRE ve TALYS kodlarıyla elde edilenler olduğunun şekle bakarak söylenmesi mümkündür. HIVAP kodu ise yaklaşık 10 MeV enerji değerinden sonra veri ile uyumu yakalamıştır. PACE4 kodunun sonuçlarının ise kıyaslanamayacak kadar uyumsuz olduğu görülmektedir.

## $^{51}\text{Cr}$

Nükleer haritada, kararlılık vadisi üzerindeki  $^{52}\text{Cr}$  çekirdeğinden bir nötron eksikliği olan  $^{51}\text{Cr}$  çekirdeği ele alındığında Chodil ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışmanın verileri kullanılarak bu tez çalışmasının temeli olan dört kod ile tesir kesit değerleri teorik olarak hesaplandı.  $^{51}\text{Cr}$  çekirdeğinin yarılanma süresi 27,703 gündür.

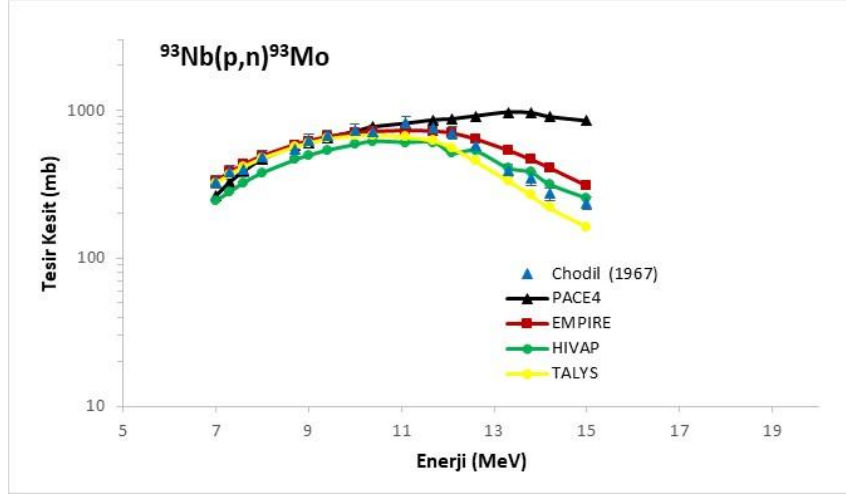


**Şekil 5.5.**  $^{51}\text{Cr}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu sonuçlar için deneysel tesir kesit değerleri ile tüm kodların tesir kesit değerlerinin uyumlu olduğu söylenebilir. Yalnızca PACE4 kodu 13 MeV değerinden sonra uyumu kaybetmiştir.

## $^{93}\text{Mo}$

Nükleer haritanın proton zengin tarafında yer alan ve  $^{94}\text{Mo}$  p-çekirdeğinden bir nötron eksikliği olan  $^{93}\text{Mo}$  izotopu için Chodil ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneysel çalışma referans alınarak, PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla hesaplanan tesir kesit değerlerinin deneysel veri ile karşılaştırılması sonucu elde edilen grafik aşağıda verilmiştir.

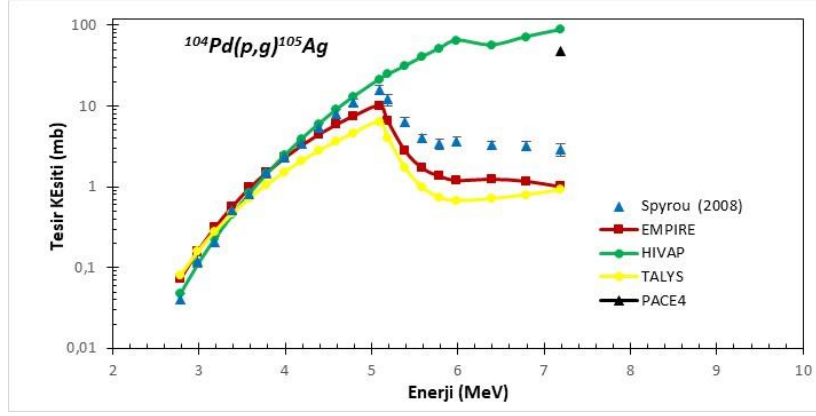


**Şekil 5.6.**  $^{93}\text{Mo}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesisir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Deney ile teorik olarak hesaplanan tesisir kesit değerleri arasında, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarının sonuçları için sonuçların oldukça uyumlu olduğu PACE4 kodu için ise yaklaşık 12,5 MeV değerine kadar uyumun iyi olduğu sonrasında ise hesaplanan tesisir kesit değerinin deneysel veriden yüksek olduğu görülmektedir.

$^{105}\text{Ag}$

Kararlı  $^{107}\text{Ag}$  çekirdeğinden iki nötron eksik  $^{105}\text{Ag}$  izotopunun üretildiği, p-süreci ile ilgili Pd izotopları üzerine proton gönderilerek gerçekleştirilen (p, $\gamma$ ) reaksiyonlarının tesisir kesitlerinin ölçülmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmanın (Spyrou vd., 2008), nükleer veri kütüphanesi EXFOR' dan alınan verileri , tez kapsamındaki dört farklı kod ile hesaplanan tesisir kesit sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafik aşağıda verilmiştir.

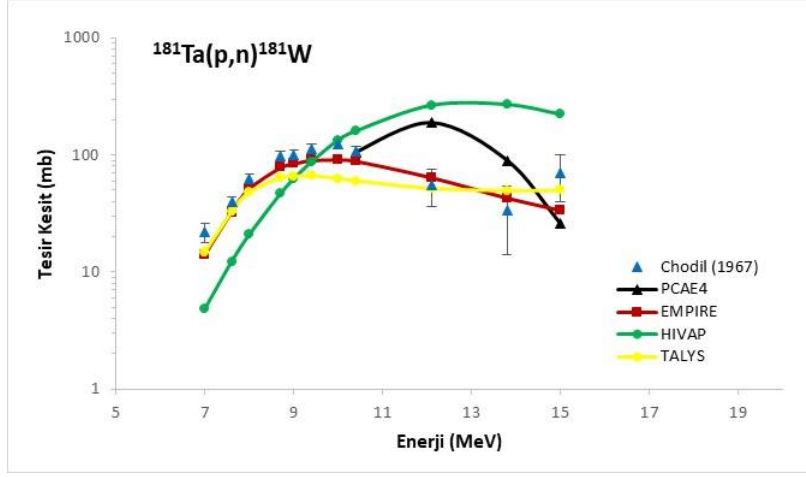


**Şekil 5.7.**  $^{105}\text{Ag}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu referans çalışmada tesir kesit hesaplamaları TALYS kodunun farklı seviye yoğunluk parametrelerini kullanılarak yapılmıştır. Tez kapsamında kullanılan diğer kodlarla birlikte TALYS kodu ile de hesaplamalar yapılmıştır. Ancak TALYS kodunun varsayılan değerleri kullanılmıştır. Sonuçlardan görüldüğü gibi deneysel ölçümlerle en uyumlu sonucu veren EMPIRE kodunun sonuçlarıdır. TALYS kodunun varsayılan değerlerle elde edilen sonuçları da deneysel veri ile uyum içindedir. HIVAP kodu ise 5 MeV değerine kadar iyi sonuçlar verirken bu değerden sonra deney verisinden daha yüksek tesir kesit değerleri verdiği görülmüştür. PACE4 kodu ile bu reaksiyon için en son enerji değeri olan 7 MeV değeri dışında diğer enerjilerde sonuç elde edilememiştir.

### $^{181}\text{W}$

Nükleer haritadaki kararlı  $^{184}\text{W}$  çekirdeğinden 3 nötron eksik  $^{181}\text{W}$  izotopu için, Chodil deneyinin başka bir (p,n) reaksiyonu olan;  $^{181}\text{Ta}(p,n)^{181}\text{W}$  reaksiyonu incelendi. Deneyin tesir kesit verileri kodlar yardımıyla hesaplanan tesir kesit değerleriyle karşılaştırıldı ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafikte verildi.

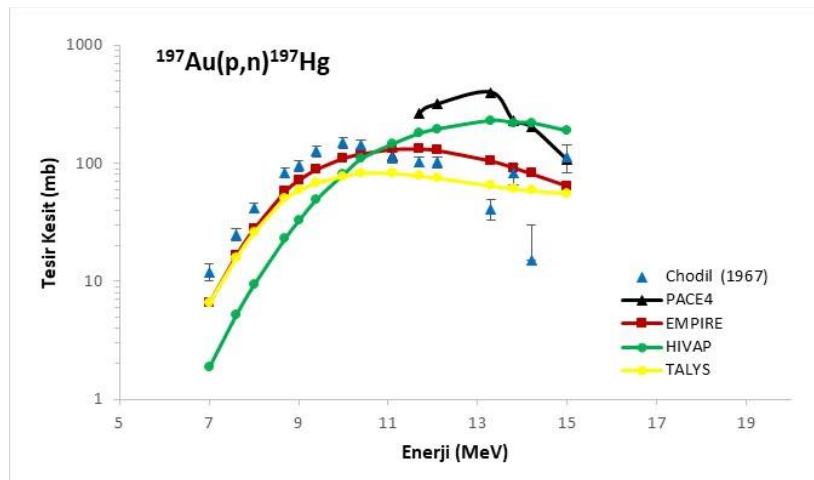


**Şekil 5.8.**  $^{181}\text{W}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

$^{181}\text{W}$  için en uyumlu hesaplama sonuçlarının EMPIRE kodu ile elde edilen sonuçlar olduğu söylenebilir.

### $^{197}\text{Hg}$

Nükleer haritanın proton zengin tarafında buluna  $^{197}\text{Hg}$ , kararlı olan  $^{198}\text{Hg}$  çekirdeğinden bir nötron eksiktir ve yarılanma süresi 2,672 gündür. Deneysel veri ile teorik hesaplamaların sonuçlarının karşılaştırılması aşağıda verilmiştir.



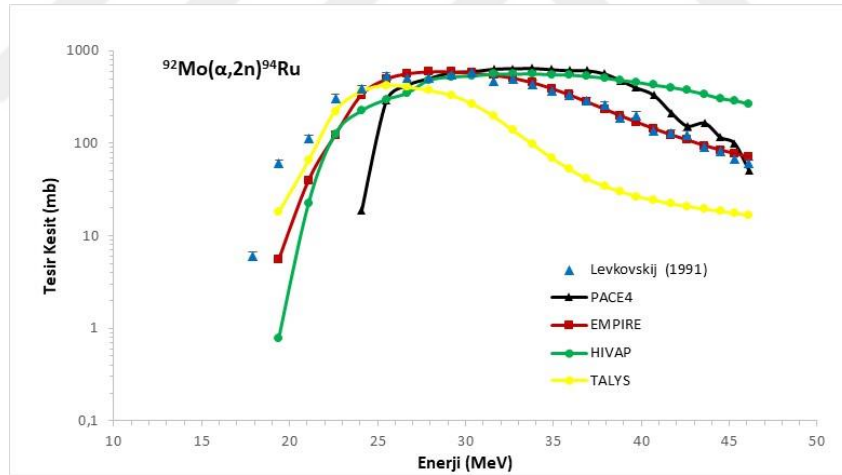
**Şekil 5.9.**  $^{197}\text{Hg}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Grafikten görüldüğü gibi deney sonuçları ile teorik hesaplamalar arasında ne uyumlu sonuçların EMPIRE kodu ile elde edildiği görülmektedir. TALYS kodu ile elde edilen sonuçlar ise yaklaşık 9 MeV değerinden sonra deneysel verinin altında sonuçlar vermiştir. Diğer iki kod ile elde edilen hesaplamalar deney ile uyumlu değildir.

## 5.2 Alfa ile Bombardıman Edilen Reaksiyonlar

### $^{94}\text{Ru}$

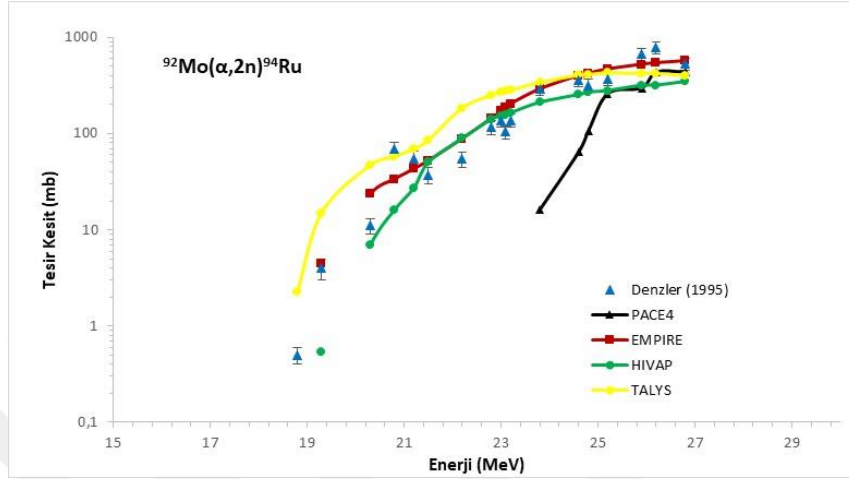
Kararlı  $^{101}\text{Ru}$  çekirdeğinden yedi nötron eksikliği olan  $^{94}\text{Ru}$  izotopunun yarı ömrü 51,83 dakikadır. Bu izotop için, deneysel veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deney sonuçlarının ait olduğu, orta enerjili (E=10-50 MeV) proton ve alfaların orta kütleli (A=40-100) çekirdeklerin üzerine gönderildiği reaksiyonlara ait tesir kesit değerlerinin (Levkovskij, 1991) sonuçlarının tez çalışması kapsamında ele alınan kodlarla elde edilen teorik tesir kesit sonuçlarının karşılaştırılması aşağıda verilmiştir.



**Şekil 5.10.**  $^{94}\text{Ru}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışma için yapılan hesaplamalardan en uyumlu sonuçlar EMPIRE kodu ile elde edildiği görülmektedir. HIVAP kodunun hesaplamaları ise 25-35 MeV aralığında deneysel veriye uyum sağlasa da diğer değerler için uyumlu sonuçlar elde edilememiştir.

Bir başka örnek ise;  $^{94}\text{Ru}$ , anne çekirdeğinden  $^{94\text{m}}\text{Tc}$  radyofarmasotiğinin elde edildiği deneysel çalışmada  $^{92}\text{Mo}(\alpha,2n)^{94}\text{Ru}$  (Denzler vd., 1995) reaksiyonuna ait deneysel veriler ile kodlar yardımıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin sonuçlarının karşılaştırılması aşağıdaki grafikte verilmiştir.

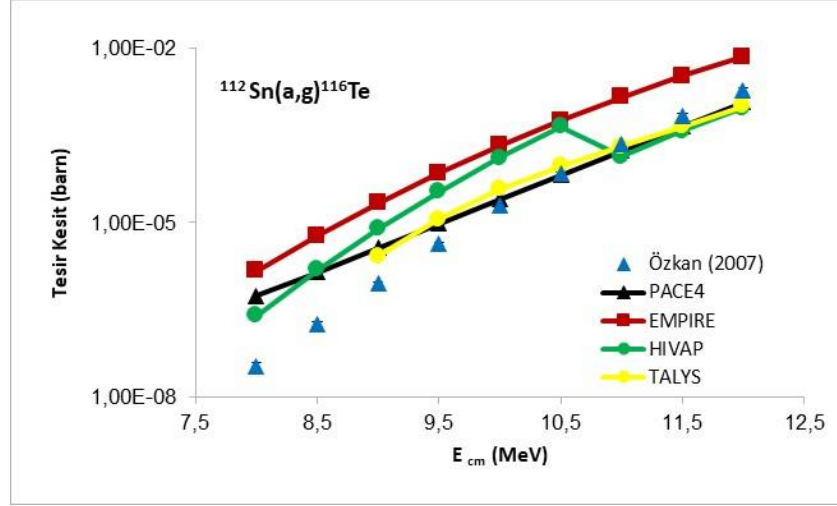


**Şekil 5.11.**  $^{94}\text{Ru}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışma da bir önceki deney ile aynı reaksiyon mekanizması ile benzer enerji değerleri için gerçekleştirilmiş olsa da her iki deneyde de kendi içinde farklı tesir kesit değerleri elde edildiği görülmektedir. İki deney sonucuna bakılarak bu çalışma için de teorik hesaplamalar için en uyumlu sonuçların EMPIRE kodu ile elde edildiğini söylemek mümkündür. bu deney için yapılan HIVAP kodunun sonuçları da bir önceki çalışmaya benzer enerji aralığında uyumludur. Yaklaşık 22,8 MeV değerinden sonra uyumlu olduğu grafikten de görülebilir.

### $^{116}\text{Te}$

P süreci enerji aralığında  $^{112}\text{S}$  hedef ile yapılan alfa yakalama reaksiyonu sonucunda  $^{128}\text{Te}$  kararlı çekirdeğinden on iki nötron eksikliği olan  $^{116}\text{Te}$  izotopunun elde edildiği deneysel çalışma (Özkan vd., 2007) ele alınıp tez kapsamında 4 kodun yardımıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin grafiği aşağıda verilmiştir.

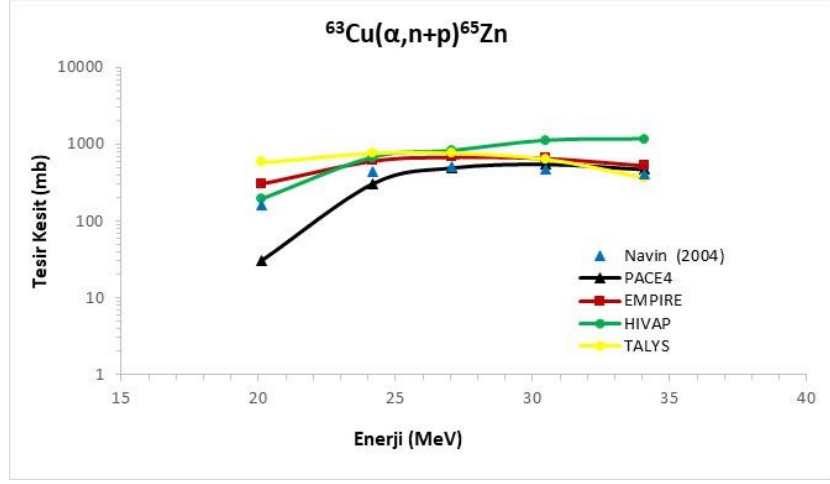


**Şekil 5.12.**  $^{116}\text{Te}$  için deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada teorik hesaplamalar NON-SMOKER kodu ile yapılmıştır. Tez kapsamında kullanmış olduğumuz kodlar içerisinde deneysel veri ile en uyumlu sonuç veren kodun TALYS ve PACE4 olduğu görülmektedir. HIVAP kodu da belli bir enerji değerinden sonra (~11 MeV kütle merkezi enerjisi) deneysel veri ile uyumu yakalamıştır. EMPIRE kodu ise deneysel veri ile eğilim olarak uyumlu olsa da, biraz daha yüksek tesir kesit değeri vermektedir.

### $^{65}\text{Zn}$

Coulomb bariyeri yakınında kararsız helyum ışınlarının neden olduğu doğrudan ve bileşik reaksiyonların incelendiği deneysel çalışmada (Navin vd, 2004) elde edilen buharlaşma ürünlerinden biri olan kararlı  $^{66}\text{Zn}$  çekirdeğinden bir nötron eksik  $^{65}\text{Zn}$  (yarılanma süresi 243,66 gün) çekirdeği ele alınıp, kodlar ile hesaplanan teorik tesir kesit değerleri ile deneysel verinin karşılaştırılması ile elde edilen sonuçlara ait grafik aşağıda verilmiştir

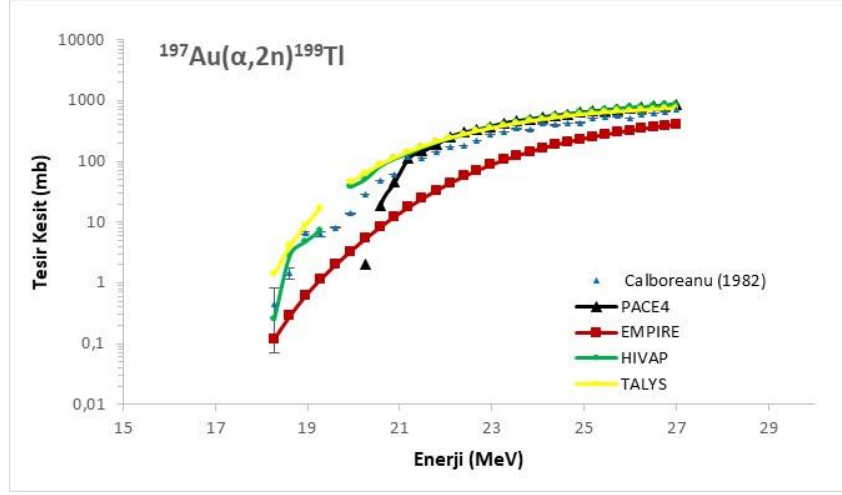


**Şekil 5.13.**  $^{65}\text{Zn}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesis kesit değerlerinin karşılaştırılması

$^{63}\text{Cu}$  hedef üzerine  $^4\text{He}$  mermisinin gönderildiği bu çalışmada deneysel sonuçlar CASCADE istatistiksel model kodu ile elde edilen teorik tesis kesit sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında kullanılan kodlarla yapılan hesaplamalar için en uyumlu sonuçları EMPIRE kodunun verdiği görülmektedir. TALYS ve PACE4 için yaklaşık 25 MeV değerinden sonra deneysel veri ile uyum yakalanırken, HIVAP kodunun sonuçlarında 28 MeV değerinden sonra tesis kesit değeri deneysel veriden biraz daha büyüktür.

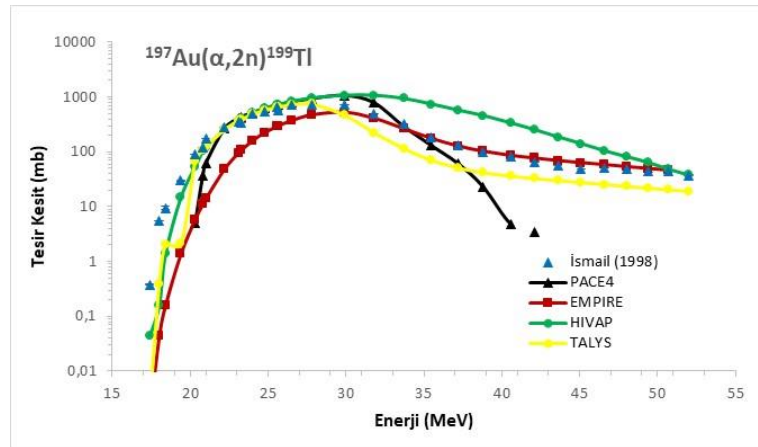
### $^{199}\text{Tl}$

Nükleer haritadaki kararlı  $^{204}\text{Tl}$  çekirdeğinden beş nötron eksik  $^{199}\text{Tl}$  izotopu kararlılık vadisinin proton zengin kısmında yer alır ve yarılanma süresi 9,67 dakikadır. Deneysel verilerin veri kütüphanesi EXFOR dan alındığı, altın hedef üzerine  $(\alpha, n)$  ve  $(\alpha, 2n)$  reaksiyonlarına gama de-eksitasyon rekabetinin etkisinin incelendiği deneysel çalışmanın (Calboreanu vd., 1982) sonuçları gama de-eksitasyon dahil olmak üzere buharlaşma istatistiksel teorisi açısından yorumlanmaktadır. Bu buharlaşma reaksiyonun ürünü için tez kapsamındaki kodlarla hesaplanan tesis kesitlerin deneysel veri ile karşılaştırılmasıyla elde edilen grafik aşağıda görülmektedir.



**Şekil 5.14.**  $^{199}\text{Tl}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Ta, Ir, Au ve Re hedef üzerine alfa kaynaklı reaksiyonların uyarılma fonksiyonlarının analizinin yapıldığı başka bir deneysel çalışmanın (İsmail, 1998) EXFOR dan elde edilen verileri ile hesaplanan tesir kesit değerlerinin karşılaştırılmasından elde edilen grafik aşağıda verilmiştir İsmail ve arkadaşları tesir kesit hesaplamalarını ALICE/91 ve Hauser-Feshbach formalizmine sahip STAPRE kodlarıyla yapmışlardır. Tez kapsamında kullanılan kodların güvenilirliğini anlayabilmek adına bu çalışmada da bir önceki çalışmayla aynı reaksiyon mekanizması olan Ta hedef üzerine alfa mermisinin gönderildiği reaksiyon seçilerek tesir kesitleri hesaplanmıştır.



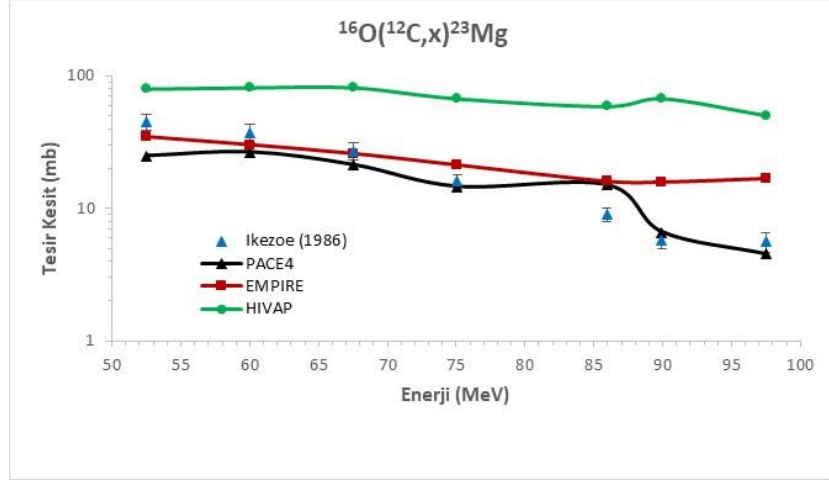
**Şekil 5.15.**  $^{199}\text{Tl}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Aynı reaksiyon mekanizmasının farklı enerji bölgelerindeki iki farklı grup tarafından yapılan çalışmaların sonuçları için; 30 MeV enerji değerine kadar HIVAP ve TALYS kodlarının hesapladığı tesir kesit değerleri deneysel verilerle daha uyumlu sonuçlar vermiştir. EMPIRE kodunun sonuçları ise 30 MeV enerji değerine kadar deneysel verilerden düşük sonuçlar verirken, 30 MeV' den sonra deneysel veri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Ayrıca PACE4' da 20 MeV ile yaklaşık 30 MeV enerji aralığında deney ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu durumda bu şekilde bir reaksiyon mekanizması için çalışılacaksa kodların iyi sonuç verdiği enerji bölgeleri dikkate alınmalıdır.

### 5.3 Ağır İyon ile Bombardıman Edilen Reaksiyonlar/Ağır İyon Kaynaklı Reaksiyonlar

$^{23}\text{Mg}$

Nükleer haritanın proton zengin kısmında bulunan ve kararlı  $^{24}\text{Mg}$  çekirdeğinden bir nötron eksik  $^{23}\text{Mg}$  izotopunun yarılanma süresi 11,317 saniyedir. Bu izotopun üretildiği deneysel çalışmanın verileri nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınmıştır (Ikezoe vd., 1986). Füzyon reaksiyonlarında alt sınırlayıcı açılal momentumu araştırmak için buharlaşma kalıntılarının ölçümlerinin yapıldığı bu deneysel çalışmadaki  $^{23}\text{Mg}$  tesir kesit verileri ile tez kapsamındaki kodlardan PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodları kullanılarak hesaplanan tesir kesit değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları aşağıda görüldüğü gibidir. TALYS kodu ağır iyon bombardıman reaksiyonlarında kullanılmadığı için hesaplamalara dahil edilmemiştir.

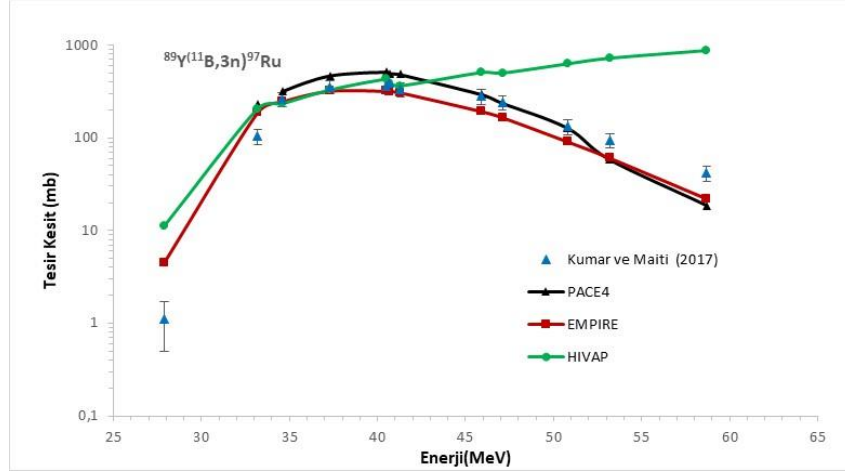


**Şekil 5.16.**  $^{23}\text{Mg}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesis kesit değerlerinin karşılaştırılması

70-130 MeV laboratuvar enerjisi aralığında gerçekleştirilen bu deneyin istatistiksel hesaplamaları zamana bağlı Hartree-Fock teorisine göre yapılmıştır. Tezde kullanılan dört kod ile elde edilen tesis kesit hesaplamalarının sonuçlarına göre EMPIRE ve PACE4 kodlarının sonuçlarının deney verisi ile uyumlu olduğu ancak HIVAP kodunun sonuçlarının genel eğilime uygun olmasına rağmen deneysel veriden daha yüksek değerler verdiği gözlemlenmiştir.

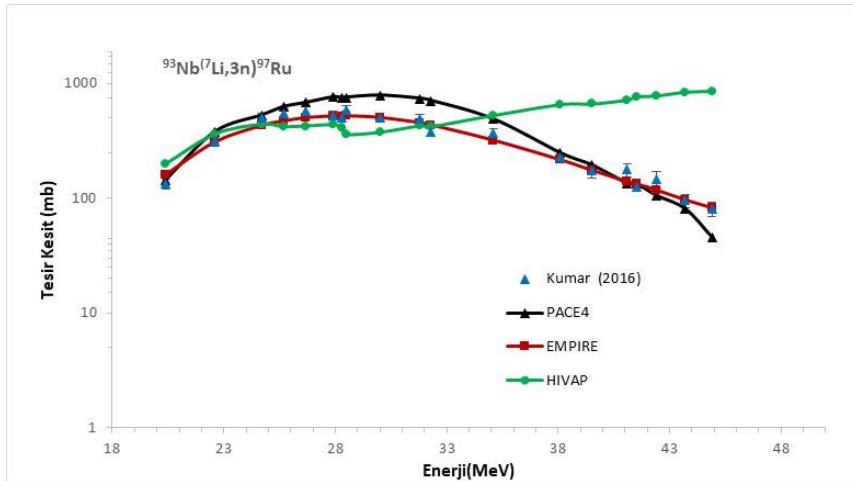
### $^{97}\text{Ru}$

Kararlı  $^{101}\text{Ru}$  çekirdeğinden dört nötron eksik olan,  $^{97}\text{Ru}$  çekirdeğinin yarı ömrü 2,9 gündür. Bu izotop ile ilgili,  $^{89}\text{Y}$  ve  $^{93}\text{Nb}$  hedefleri üzerine gönderilen  $^{11}\text{B}$  mermisiyle gerçekleştirilen reaksiyonlarda (bariyerin yakınında ve üzerindeki, düşük enerjilerde), üretilen kalıntıların tesis kesitlerini ölçerek ağır iyon reaksiyonlarının araştırılması ve bunları açıklamak için farklı nükleer modellerin etkinliğini kontrol etmek amacıyla yapılan bir deneysel çalışma (Kumar ve Maiti, 2017) ele alındı. Çalışmadaki teorik sonuçlar bu tez kapsamında kullanılan PACE4 kodu ve ayrıca EMPIRE kodunun farklı seviye yoğunluk parametreleri kullanılarak kıyaslanması yapılmış olduğundan, tez kapsamındaki teorik hesaplamalar hem PACE4 kodu ile hem de EMPIRE kodunun varsayılan parametreleri ile yeniden yapıldı. Ayrıca HIVAP kodu ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen tesis kesit değerlerinin de olduğu tüm sonuçları veren grafik aşağıdadır.



**Şekil 5.17.**  $^{97}\text{Ru}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesis kesit değerlerinin karşılaştırılması

Yine aynı çalışma grubunun başka bir yıl yapmış olduğu çalışmada (Kumar vd.,2016),  $^{97}\text{Ru}$  izotopu bu kez  $^7\text{Li}$  mermi ve  $^{93}\text{Nb}$  hedef kullanılarak üretilmiştir. Benzer şekilde bu çalışmada da grup PACE4 ve EMPIRE kodlarıyla elde ettikleri teorik sonuçları ve deney verilerini karşılaştırmışlardır. Tez çalışması kapsamında aynı kodlar HIVAP kullanılarak sonuçlar yeniden hesaplanmış ve sonuçlara ilişkin grafik aşağıda verilmiştir.

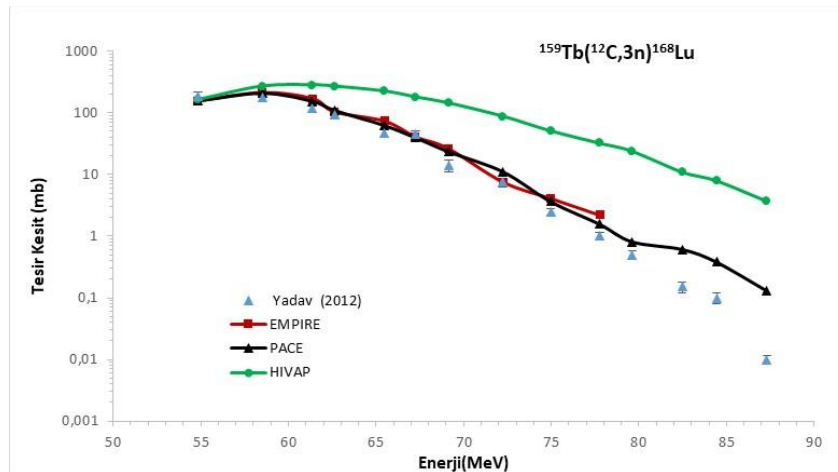


**Şekil 5.18.**  $^{97}\text{Ru}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesis kesit değerlerinin karşılaştırılması

Böylesi bir reaksiyon mekanizması için seçilecek en uygun teorik hesaplama kodu şekilden de görüldüğü gibi EMPIRE ve PACE4 kodlarıdır. HIVAP kodu yaklaşık 45 MeV değerine kadar uyumlu sonuçlar verirken (Şekil 5.17) bu değerden sonra deneysel veriden daha yüksek tesir kesit değerleri vermektedir. Şekil 5.18 için de benzer şekilde bu reaksiyonun hesaplanan tesir kesit değerlerinde en uyumlu sonuçlar PACE4 ve EMPIRE kodu ile elde edilenlerdir. Burada da HIVAP kodunun sonuçları belli bir enerji değerine kadar uyum sağlamıştır. Burada bu çalışmalar ile örneklendirmedeki amaç; farklı bombardıman çekirdekleri için de uyumlu sonuçlar verdiği için; kodların alternatif reaksiyon geliştirme açısından elverişli olduğunu vurgulamaktır.

### <sup>168</sup>Lu

Nükleer haritanın proton zengin bölgesinde bulunan <sup>168</sup>Lu izotopu kararlı olan <sup>175</sup>Lu çekirdeğinden sekiz nötron eksiktir. Yarı ömrü 5.5 dakika olan bu izotopun deneysel olarak gözlemlendiği çalışma (Yadav vd., 2012) tez kapsamında değerlendirilmek üzere ele alındı. <sup>12</sup>C+<sup>159</sup>Tb sisteminin nükleon başına ~4-7/MeV enerjisi aralığında, düşük enerjili eksik füzyon deneyinin sonuçları ve kodlar yardımıyla elde edilen teorik tesir kesit değerleri karşılaştırılmasıyla elde edilen grafik aşağıda verilmiştir. Yadav ve arkadaşları bu çalışmadaki teorik hesaplamaları PACE4 kodunun farklı seviye yoğunluk parametre değerleri ile gerçekleştirmişlerdir. Tez kapsamında yine PACE4 kodunun varsayılan değerleri kullanılarak yapıldı.

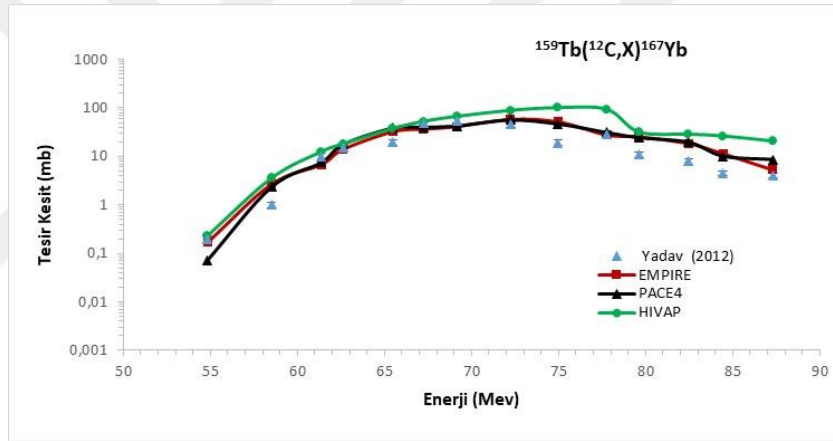


**Şekil 5.19.** <sup>168</sup>Lu için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Sonuçlardan da görüldüğü gibi deneysel veri ile en uyumlu sonuçları veren kod PACE4 kodudur. EMPIRE kodu da deneysel veri ile uyumlu olsa da yaklaşık 80 MeV değerinden sonra sonuç vermemiştir. HIVAP kodu ise 60 MeV değerine kadar deneyle uyumlu sonuç vermiştir. Bu enerji değerinden sonra oldukça yüksek tesir kesit sonuçları vermektedir.

### $^{167}\text{Yb}$

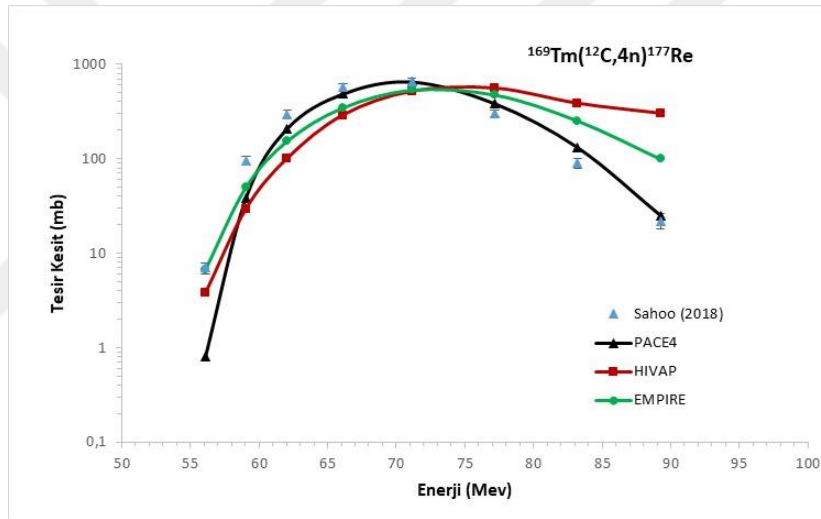
Bir önceki örnekte ki reaksiyon sisteminin ( $^{12}\text{C}+^{159}\text{Tb}$ ) başka bir buharlaşma ürünü 17,5 dakika yarı ömürlü  $^{167}\text{Yb}$  izotopu,  $^{168}\text{Yb}$  p-çekirdeğinden bir nötron eksiktir.  $^{167}\text{Yb}$  için üç kodun yardımıyla hesaplanan tesir kesit değerlerinin deney verileri ile karşılaştırıldığı sonuçlar aşağıdaki grafikte görülmektedir.



**Şekil 5.20.**  $^{168}\text{Lu}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Yine bu izotop için de referans çalışmadaki teorik hesaplamalar PACE4 kodu ile elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere EMPIRE kodu da böyle bir reaksiyon mekanizması ve enerji aralığında oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca bu reaksiyon için HIVAP kodunun tesir kesit değerleri de 80 MeV enerji değerinden sonrası dışında deney ile oldukça uyumludur.

Kararlı olan  $^{185}\text{Re}$  çekirdeğinden 8 nötron eksiği olan  $^{177}\text{Re}$  izotopunun yarılanma süresi 14 dakikadır. 5-7,5 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}+^{169}\text{Tm}$  sisteminin her bir buharlaşma ürününün uyarılma fonksiyonlarının ölçüldüğü, eksik füzyon üzerine giriş kanallarının etkisi isimli referans çalışmanın (Sahoo vd., 2018) deneysel verileri EXFOR' dan alınmıştır. Bu çalışmada da yine tesir kesit değerleri PACE4 istatistiksel kodu yardımıyla elde edilmiştir. Bu tez kapsamında ki amaç tesir kesit değerlerini farklı kodlarla hesaplayıp birbirleri ile ve deney ile kıyaslamak olduğundan, bu çalışma için teorik hesaplamalar PACE4 kodu ile de yeniden yapılmak üzere diğer iki kod ile yapıldı. Sonuçlar aşağıda gösterildiği gibidir.

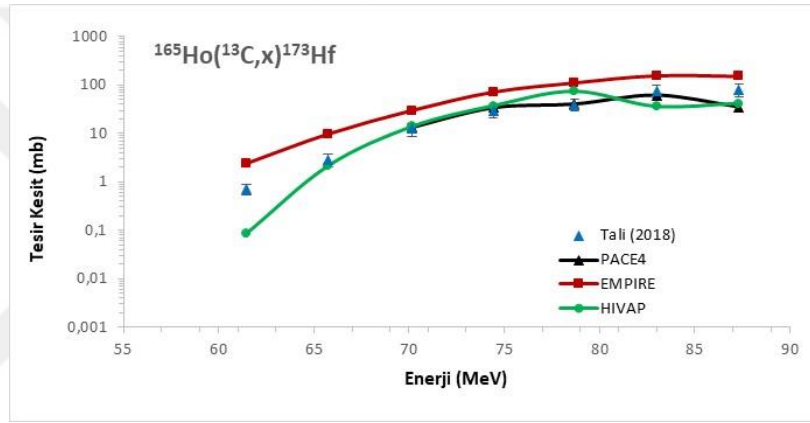


**Şekil 5.21.**  $^{177}\text{Re}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Yukarıda belirtildiği gibi referans çalışmanın teorik hesaplamaları PACE4 kodu ile yapılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi deneysel veri ile en uyumlu sonuçları veren kod PACE4 kodudur. Ancak bu enerji değerleri ve  $^{12}\text{C}+^{169}\text{Tm}$  reaksiyon sistemi için EMPIRE ve HIVAP kodları da oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

## <sup>173</sup>Hf

<sup>178</sup>Hf kararlı çekirdeğinden beş nötron eksikliği olan <sup>173</sup>Hf izotopunun yarı ömrü 24 saattir. <sup>13</sup>C + <sup>165</sup>Ho sisteminin nükleon başına ~ 4-7 MeV enerji aralığında gerçekleştirilen deney sonucunda (Tali vd.,2018) elde edilen füzyon buharlaşma ürünlerinden olan <sup>173</sup>Hf izotopunun deneysel ve hesaplanan tesir kesit değerlerine ait grafik aşağıda verilmiştir. Amacı eksik füzyon reaksiyon dinamiklerini incelemek olan bu çalışmada tesir kesit değerlerini hesaplamak için PACE4 kodu kullanılmıştır. Tez kapsamında elde edilen tesir kesit değerleri PACE4 için yeniden yapılmış ve ayrıca diğer iki kodun (EMPIRE ve HIVAP) sonuçlarıyla birlikte aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



**Şekil 5.22.** <sup>173</sup>Hf için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

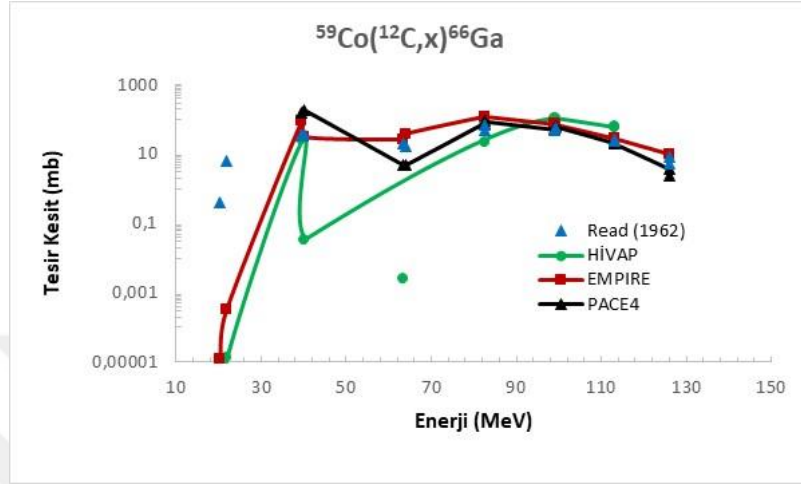
Sonuçlardan da görüldüğü gibi en iyi tesir kesit değerlerini veren kod PACE4 dur. HIVAP kodu da 75 MeV değerinden sonra biraz dalgalanma gösterse de deneysel veri ile uygundur. EMPIRE kodunun hesapladığı sonuçların deneysel veriden yüksek olduğu görülmektedir.

### 5.4 Proton Zengin Radyoizotop Reaksiyonları

## <sup>66</sup>Ga

Kararlılık vadisindeki <sup>69</sup>Ga çekirdeğinden üç nötron eksikliği olan <sup>66</sup>Ga çekirdeği ele alınarak, ağır iyonların orta kütleli elementlerle reaksiyonunda bileşik çekirdek oluşum

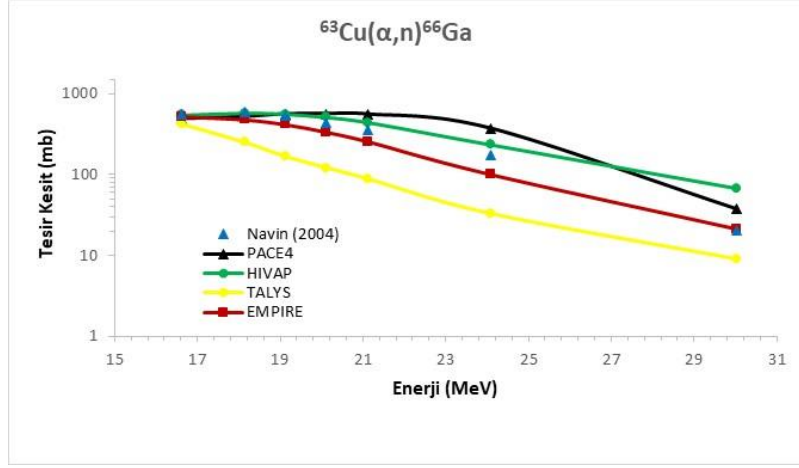
mekanizmaları inceleyen bir deneysel çalışmanın (Read vd. 1962) verileri ile teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen tesir kesit değerleri karşılaştırılmıştır ve sonuçları içeren grafik aşağıda verilmiştir. Tıpta teşhis amaçlı Pozitron Emisyon Tomografisinde (PET) kullanılan  $^{66}\text{Ga}$  radyoizotopunun yarı ömrü 9,5 saattir .



**Şekil 5.23.**  $^{66}\text{Ga}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışma için en iyi sonuçların EMPIRE ile elde edilen sonuçlar olduğu söylenebilir. PACE4 kodu ise yaklaşık 60 MeV enerji değerinden sonra deney verisi ile tam eşleşme sağlarken HIVAP kodunun bu enerji aralığında ve böylesi bir sistem için iyi sonuç vermediği söylenebilir.

$^{66}\text{Ga}$  çekirdeğinin elde edildiği bir başka deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile teorik kodlarla elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı grafik aşağıda verilmiştir. Coulomb bariyeri yakınında kararsız helyum ışınlarının neden olduğu doğrudan ve bileşik reaksiyonlar, isimli bu çalışmada  $^{63}\text{Cu}$  hedef üzerine  $^4\text{He}$  mermisinin gönderildiği bu çalışmada deneysel sonuçlar CASCADE istatistiksel model kodu ile elde edilen teorik tesir kesit sonuçları ile karşılaştırılmıştır. (Navin vd, 2004).

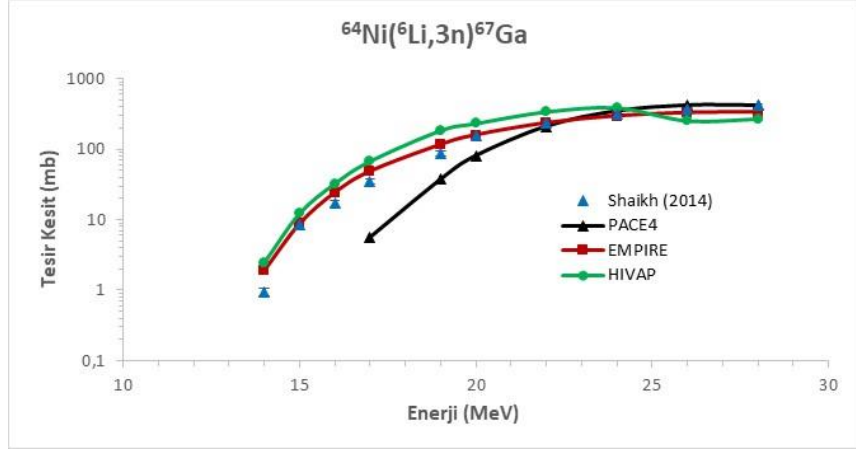


**Şekil 5.24.**  $^{66}\text{Ga}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesis kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışma için elde edilen tesis kesit değerleri için EMPIRE ve HIVAP kodları iyi sonuç verirken, TALYS kodu deney verisinden düşük sonuçlar verirken PACE4 kodu deneysel veriden daha yüksek tesis kesit değerleri vermiştir.

### $^{67}\text{Ga}$

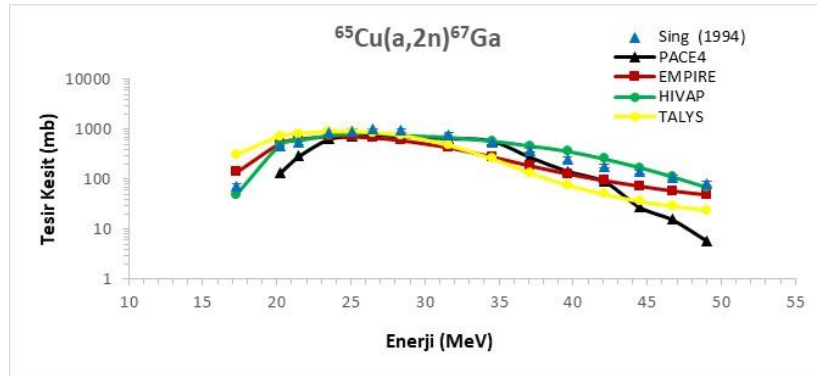
$^{64}\text{Ni}$  hedefli  $^6\text{Li}$  mermi için toplam füzyon (TF) uyarma fonksiyonu, Coulomb bariyeri etrafındaki enerjilerde çevrim içi karakteristik  $\gamma$  ışını algılama yöntemi kullanılarak ölçüldüğü bir çalışma ile elde edilen  $^{67}\text{Ga}$  çekirdeği için elde edilen teorik tesis kesit değerleri ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.  $^{69}\text{Ga}$  kararlı çekirdeğinden iki nötron eksikliği olan bu çekirdeğin tıpta kanser teşhis ve tedavisinde kullanılır ve yarı ömrü 3,2617 gündür. Bu çalışmada (Saikh vd., 2014) deneysel sonuçlar PACE4 kodu ile elde edilen teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında teorik hesaplamalar hem PACE4 kodu kullanılarak yeniden hesaplanmış hem de diğer; EMPIRE ve HIVAP kodları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. TALYS kodu ile sadece hafif iyonlar mermi olarak gönderilebildiği için bu çalışma ile karşılaştırması yapılmamıştır.



**Şekil 5.25.**  $^{67}\text{Ga}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR'dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesis kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu reaksiyon için  $^6\text{Li}$  mermi olduğu için TALYS kodu ile hesaplama yapılmadığından diğer kodların tesis kesit sonuçlarının deneysel veri ile karşılaştırılması sonucunda en iyi sonucu veren kodların EMPIRE ve HIVAP kodları olduğu söylenebilir. PACE4 kodunun sonuçları ise 20 MeV den sonra deneysel veri ile uyum göstermektedir.

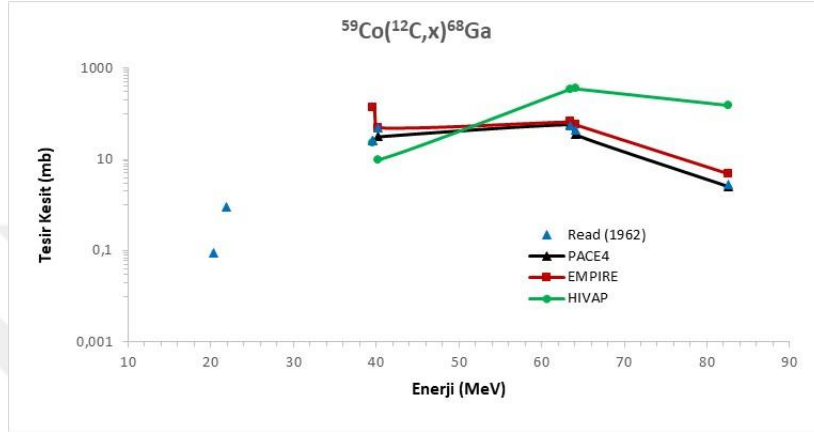
$^{67}\text{Ga}$  için başka bir çalışma daha ele alınmıştır (Sing vd., 1994) ve bu deney içinde veriler yine EXFOR'dan elde edilmiştir. Cu hedef üzerine ( $\alpha, xnyp$ ) tipi reaksiyonların uyarılma fonksiyonlarının analizinin yapıldığı referans çalışmada deney sonuçları ALICE kodu ile hesaplanan teorik tesis kesit sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan dört farklı kod ile hesaplanan değerler ile deneysel verinin karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlara ait grafik aşağıda verilmiştir.



**Şekil 5.26.**  $^{67}\text{Ga}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesis kesit değerlerinin karşılaştırılması

## <sup>68</sup>Ga

Yukarıda <sup>66</sup>Ga için yapılan deneysel çalışmada ki bir başka buharlaşma ürünü, kararlı halinden bir nötron eksik olan, nükleer tıpta görüntülemeye kullanılan 1,129 saat yarı ömürlü, <sup>68</sup>Ga çekirdeği için deneysel sonuçlarla teorik tesir kesit hesaplamalarının sonuçları aşağıda verilmiştir. (Read vd., 1962)

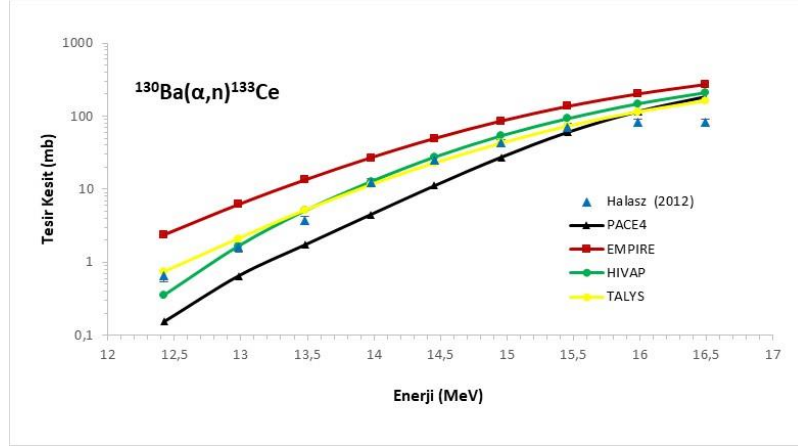


**Şekil 5.27.** <sup>68</sup>Ga için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Kodlar yardımıyla elde edilen tesir kesit sonuçlarına bakıldığında ilk birkaç enerji değeri dışında 40 MeV' den sonra hem PACE4 hem de EMPIRE kodu ile elde edilen sonuçlar deneysel veri ile iyi eşleşmektedir. HIVAP kodu ise deneyle uyumlu sonuç vermemektedir.

## <sup>133</sup>Ce

Kararlı olan <sup>140</sup>Ce çekirdeğinden 7 nötron eksik <sup>133</sup>Ce izotopunun üretildiği <sup>130</sup>Ba ve <sup>132</sup>Ba üzerinde  $\alpha$  kaynaklı reaksiyonların araştırılması ve bunların ağır p çekirdeklerinin sentezindeki önemi üzerine yapılan çalışmanın (Halasz vd., 2012) sonuçları ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodları ile yapılan hesaplamaların sonuçları aşağıdaki grafikte verilmiştir. <sup>133</sup>Ce için yarılanma süresi 1,6 saattir.

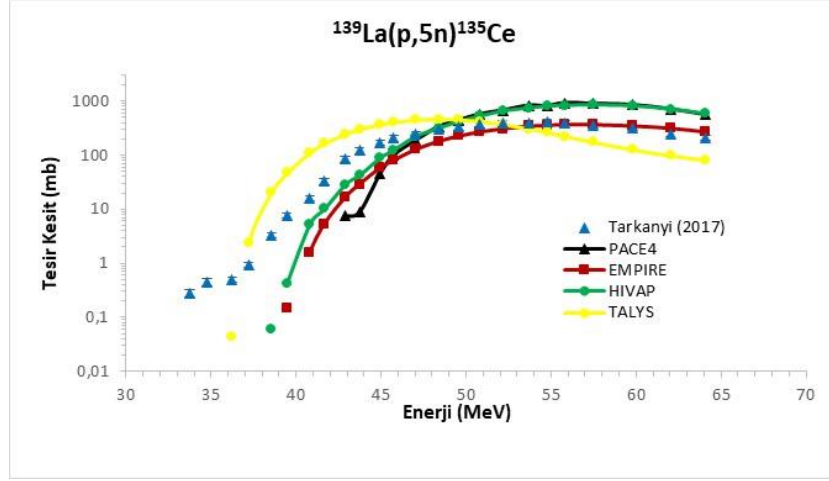


**Şekil 5.28.**  $^{133}\text{Ce}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesisir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Referans çalışmada deney verisi NON-SMOKER, SMARAGD ve TALYS ile yapılmıştır. TALYS koduyla yeniden yapılan hesaplamalar ve diğer kodların sonuçları incelendiğinde TALYS ve HIVAP kodlarının sonuçları deney sonuçları ile tam uyum içindedir. Fakat EMPIRE ve HIVAP kodları genel eğilime uysa da değer olarak uyumsuzdur.

### $^{135}\text{Ce}$

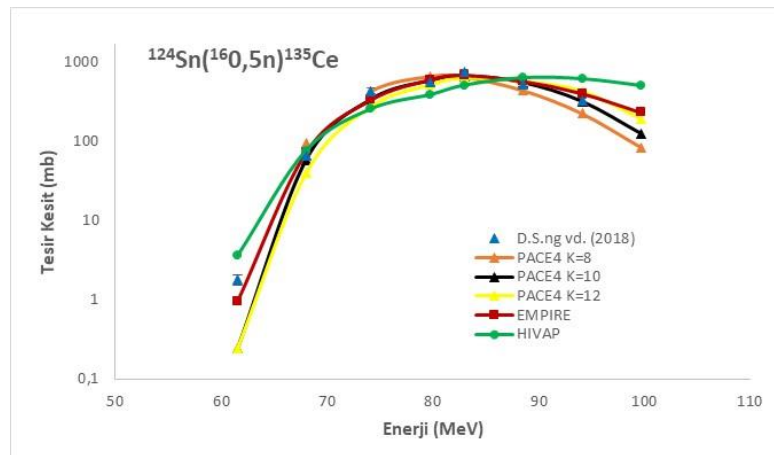
$^{135}\text{Ce}$  izotopu kararlı olan izotopundan beş nötron eksiktir.  $^{133}\text{Ce}$  için yarılanma süresi 17,7 saattir. 34-65 MeV enerji aralığında medikal radyonüklid üretimi amacıyla La üzerine alfa parçacığı gönderilerek gerçekleştirilen deney (Tarkanyi vd., 2017) verileri için yapılan hesaplamaların sonuçlarına ait grafik aşağıdadır.



**Şekil 5.29.**  $^{135}\text{Ce}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesisir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu deneyin teorik hesaplamaları TALYS tabanlı kütüphaneleri kullanan TENDL-2014 ve TENDL-2015 kodları ile hesaplanmıştır. Sonuçlara göre EMPIRE kodunun 45 MeV değerinden sonra deney ile uyumlu olduğu söylenebilir. PACE4 ve HIVAP kodlarının sonuçları ise eğilim olarak benzese de değer olarak deneysel verinin üzerindedir.

$^{135}\text{Ce}$  izotopunun buharlaşma ürünü olduğu  $^{16}\text{O}$  mermi çekirdeğinin  $^{124}\text{Sn}$  hedef üzerine gönderildiği başka bir deneysel çalışma (Sing vd.,2018) ele alındığında, reaksiyon için yapılan hesaplamalar ile elde edilen sonuçlara ait grafik aşağıda görülmektedir.

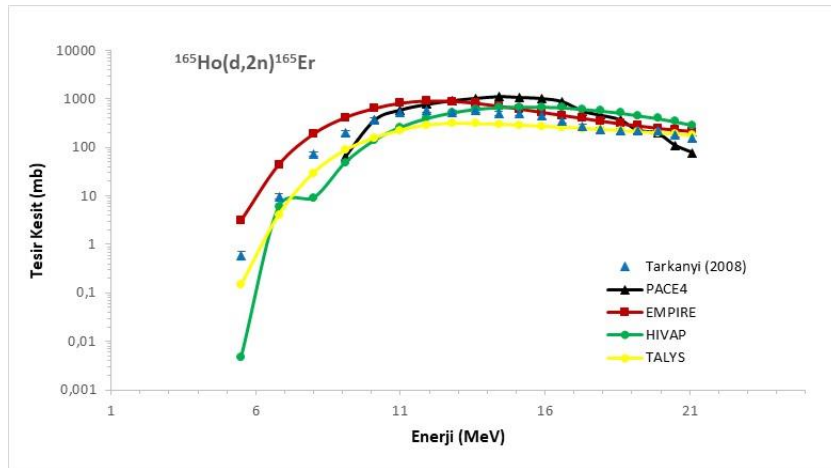


**Şekil 5.30.**  $^{135}\text{Ce}$  için deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesisir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Referans çalışmada teorik hesaplamalar için PACE4 kodunun farklı seviye yoğunluk parametreleriyle elde edilen sonuçlar deneysel veri ile kıyaslanmıştır. Tez kapsamında da yine PACE4 koduyla ve seviye yoğunluk parametresi değişimin sonuçları ne yönde etkilediğini görmek adına hesaplamalar tekrardan yapılmıştır. Bu durumda seviye yoğunluk parametresinin değişimin sonuçlar üzerinde majör bir etkisinin olmadığını söylemek mümkündür. Tüm parametre değerleri için PACE4 sonuçları veri ile uyum içindedir. EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarının sonuçları da veri ile iyi eşleşme göstermektedir.

### $^{165}\text{Er}$

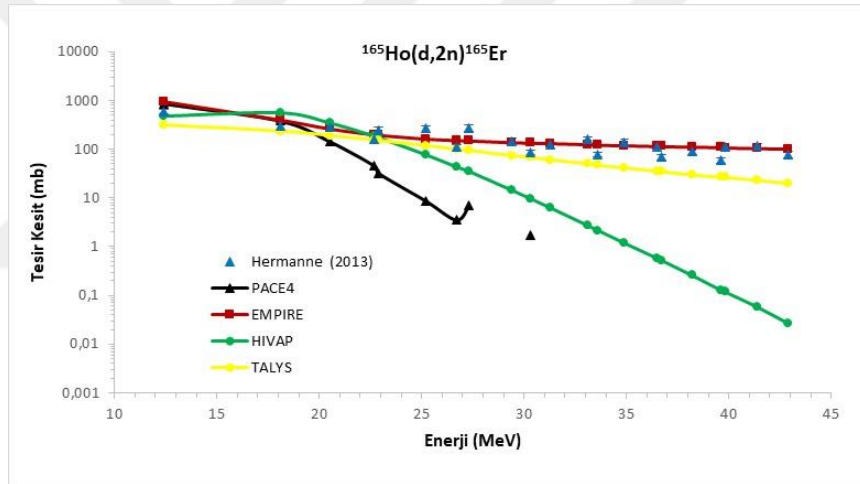
Tıpta tedavi edici amaçla kullanılan  $^{165}\text{Er}$  radyoizotopunun yarı ömrü 10,4 saattir. Kararlı  $^{167}\text{Er}$  izotopundan iki nötron eksikliği olan bu izotopun üretimi ile ilgili ele alınan referans çalışma  $^{165}\text{Ho}(d, 2n)$  ve  $^{165}\text{Ho}(d, p)$  reaksiyonlarının 20 MeV' e kadar olan enerjilerdeki üretim mekanizmaları ile ilgilidir (Tarkanyi vd., 2008).  $^{165}\text{Er}$  izotopu  $^{165}\text{Ho}(d, 2n)$  reaksiyonu ile üretilmiştir. Bu çalışmanın teorik hesaplamaları ALICE, EMPIRE ve GNASH kodlarıyla elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında EMPIRE kodu ile kendi çalışmamızı da yaparak diğer kodlarında hesaplama sonuçlarında eklenerek elde edildiği grafik aşağıda verilmiştir.



**Şekil 5.31.**  $^{165}\text{Er}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesisir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmanın hesaplanan tesir kesit değerleri için deneysel veri ile en uyumlu sonuçların EMPIRE kodu ile elde edildiği söylenebilir. Fakat TALYS kodu da 6 -11 MeV arasında deneysel veriden düşük sonuçlar verse de bu enerjide değerinden sonra deney verisi ile iyi eşleşmiştir. HIVAP kodunun da 6 -11 MeV enerji değerleri arasında deneyden düşük yaklaşık 15 MeV enerji değerinden sonra ise deney verisinden yüksek tesir kesit sonucu verdiği bunların arasında kalan değerlerde ise veri ile uyumlu olduğu söylenebilir. PACE4 kodu ise deney verisi ile eğilim olarak benzer sonuçlar vermesine rağmen hesaplama sonuçları genel anlamda veri ile uyumlu değildir.

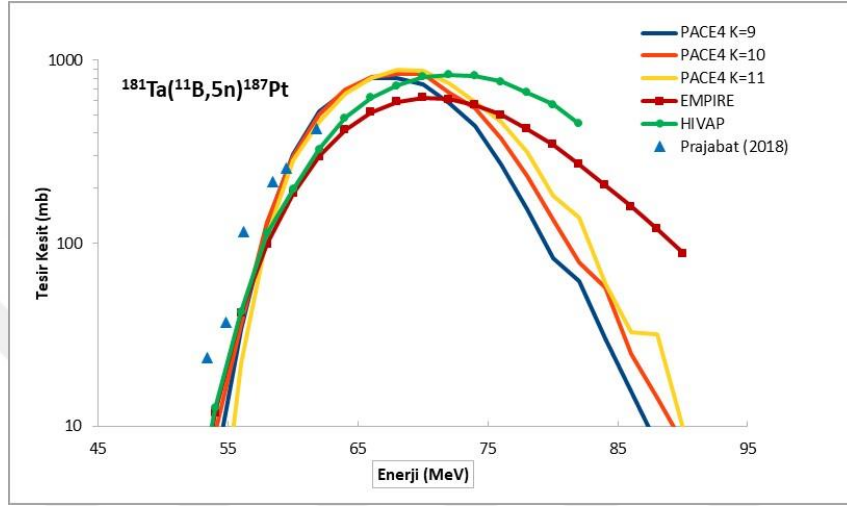
$^{165}\text{Er}$  izotopu için aynı reaksiyon mekanizmasıyla üretildiği başka bir deneysel çalışma (Hermanne vd., 2013) verileri ile elde edilen sonuçlara ait grafik aşağıda görüldüğü gibidir.



**Şekil 5.32.**  $^{165}\text{Er}$  için nükleer veri kütüphanesi EXFOR dan alınan deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ,HIVAP ve TALYS kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmanın teorik tesir hesaplamaları da yine EMPIRE kodu kullanılarak elde edilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi en uyumlu sonuçlar EMPIRE kodu ile elde edilmiştir. TALYS kodu için de 35 MeV değerinden sonra veriden düşük sonuçlar verse de deneysel veri ile eşleşmesinin iyi olduğu söylenebilir. HIVAP kodunun hesaplamaları ise yaklaşık 20 MeV enerji değerine kadar uyumlu olsa da sonrasında keskin bir düşme eğilimindedir. PACE4 kodu ile hesaplamaların bu tür reaksiyon mekanizmaları için uygun sonuçlar vermediği de gözlemlenmiştir.

Kararlı  $^{195}\text{Pt}$  çekirdeğinden 8 nötron eksik  $^{187}\text{Pt}$  radyonüklidinin yarılanma süresi 2,36 saattir. Ta hedef üzerine  $^{11}\text{B}$  kaynaklı reaksiyon ile üretilen reaksiyon için yapılan deneysel çalışmanın (Prajabat vd., 2018) teorik tesir kesit hesaplamalarıyla karşılaştırılan grafikleri aşağıda verilmiştir.



**Şekil 5.33.**  $^{187}\text{Pt}$  deneysel sonuçlar ile PACE4, EMPIRE ve HIVAP kodlarıyla elde edilen teorik tesir kesit değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmanın teorik tesir kesit hesaplamaları PACE4 kodunun farklı seviye yoğunluk parametreleri ile yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında da teorik hesaplamalar aynı kod ile yeniden yapılmıştır. Bunun yanı sıra diğer kodlarla da hesaplanmıştır. Deney 4,8-5,7 MeV/A (52,8-62,7 MeV) enerji aralığında gerçekleştirilmiş olmasına rağmen deneysel tesir kesit değerleri 53,4 ile 61,8 MeV aralığında sınırlıdır. Fakat kodlar ile elde edilen teorik tesir değerleri yaklaşık 90 MeV değerine kadar sonuç vermiştir. Deney sonuçları ile teorik tesir kesit sonuçları için tüm sonuçların birbirleri ile ve deney verisi ile eşleştiği söylenebilir.

## BÖLÜM VI

### SONUÇLAR

Bulgular kısmında yer verilen referans çalışmalar için PACE4, EMPIRE, HIVAP ve TALYS kodlarıyla; tesir kesit değerleri ile kıyaslama yapılırken, bu amaç doğrultusunda çalışma yapmak isteyenler için, bu tezdeki sonuçlarla kıyaslama yapılabileceğini belirtmek istedik.

PACE4 kodu ile çalışırken sonuçlardan da görüldüğü gibi, proton kaynaklı reaksiyonlarda deney ile uyuşmayan sonuçlar vermesi sebebiyle proton yakalama reaksiyonları için çok geçerli bir kod olmadığı ortaya çıkarıldı. Alfa kaynaklı reaksiyonlarda da çok olumlu sonuçlar elde edilmediğinden, bu kodun proton ve alfa kaynaklı reaksiyonlarda uygun olmadığı, alfa parçacığından daha ağır mermi çekirdekler ile füzyon buharlaşma reaksiyonlarını simüle eden bir kod olduğu ortaya çıkarıldı..

Birkaç keV ile 200 MeV enerji aralığında çalışan EMPIRE kodunun ise proton ve alfa kaynaklı reaksiyonlarda ve ağır iyon reaksiyonlarında deneysel veri ile örtüşen sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu anlamda EMPIRE kodunun çok kapsamlı bir kod oluşu ve farklı amaçlara hitap edebilecek bir kod olması sebebiyle çok fazla değişkenin ihtiyaca göre hesaplamalara dahil edilmesiyle farklı amaçla kullanılacak reaksiyonların tesir kesit hesaplamalarında kullanılabileceği ortaya çıkarıldı. Bu tez çalışmasında EMPIRE kodunun en yalın hali ile çalışılmasına rağmen birçok reaksiyon türünde deneysel çalışmalarla örtüşen sonuçlar vermesi EMPIRE kodunun proton zengin çekirdek reaksiyonu çalışmalarında kullanılabilir bir kod olduğu ortaya çıkarıldı.

HIVAP kodu çok farklı türdeki reaksiyonlar için üretilmiş bir koddur. Bu kodun en büyük avantajı; tesir kesit hesaplamalarında yer alan birçok parametre için çoklu bağımsız parametre kaynaklarının kullanılabilmesidir.(Reisdorf, Patin parametreleri vb. gibi). Tez kapsamında farklı referans çalışmaları için incelenen reaksiyon türlerinde HIVAP kodu genel anlamda deneysel veri ile eşleşen sonuçlar vermiştir. Ancak dikkat çeken husus tezde kullanılan dört kod ile yapılan hesaplamalarda her bir reaksiyon için kullanılan kodların varsayılan (default) değerleri kullanılmıştır. Bu alanda çalışma

yapacak araştırmacılar için seçilen herhangi bir veya birkaç kod üzerinde daha detaylı çalışma yapılmak isteniyorsa, ihtiyaca göre farklı parametre kombinasyonları ile daha hassas sonuçların elde edilmesi mümkündür. HIVAP kodu için bu tezde kullanılan parametre seti materyal metot kısmında ilgili kısımda verilmiştir. HIVAP kodu ile yapılacak çalışmaların 400 MeV uyarılma enerjisi ile sınır olduğu ortaya çıkarılmıştır.

TALYS kodu başlangıçta 1 keV-200 MeV enerji değerleri ile sınırlı iken TALYS 1.4 versiyonundan itibaren 1 GeV enerjilere kadar çıkabilmiş bir programdır. TALYS kodunun yalnızca merminin nötron, proton, döteron, triton, <sup>3</sup>He ve alfa olduğu reaksiyonlarda kullanılabilir olduğu unutulmamalıdır. Bu tez kapsamındaki referans deneysel çalışmalar için TALYS ile hesaplanan tesir kesit değerlerinin veri ile oldukça uyumlu olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Ayrıca radyonüklid üretilen reaksiyon mekanizmalarında TENDL gibi, TALYS veri kütüphanesi tabanlı kodlar da yaygın olarak kullanılmaktadır. TALYS uygulamadaki kullanım kolaylığı sebebiyle bu tür çalışmalarda yaygın kullanıma sahiptir..

Tez çalışmasında; aynı buharlaşma ürününün olduğu farklı reaksiyon mekanizmaları için dört kod ile tesir kesit değerleri hesaplandığında uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir (şekil 5.10 ve şekil 5.11, şekil 5.14 ve şekil 5.15, şekil 5.17 ve şekil 5.18 gibi). Farklı bombardıman ve hedef çekirdekleri için de uyumlu sonuçlar verdiği için bu kodların alternatif reaksiyon geliştirme için elverişli oldukları söylenebilir.

Bu tez çalışmasındaki temel motivasyon; bu alanda çalışmalar yapmak isteyen yurt içindeki araştırmacılar için birkaç farklı teorik bilgisayar kodunun kurulumu, kullanımı, programların limitleri, hangi tür reaksiyonlara iyi cevap verdiği ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını belirleyebilecekleri bilgisayar kodlarını kullanabilmelerini sağlamak, bu kodları karşılaştırmak ve bu kodları kullanabilecekleri alanları belirlemek ve bu tür kodları kullanarak daha fazla egzotik çekirdek üretebilecek reaksiyonlar belirlemelerine katkı sağlamaktır.

Dünyada gün geçtikçe gelişen nükleer fizik çalışmalarında pek çok ilerleme mevcuttur. Özellikle radyoaktif iyon hüzmesi ile çalışacak olan ve önümüzdeki yıllarda çalışmaya başlayacak olan; Fransa' da bulunan nükleer araştırma merkezi GANIL' deki SPIRAL

(2022), İtalya da bulunan SPES (2023) ve Almanya' da bulunan GSI' daki FAIR (2025) projeleri ile daha fazla yeni araştırma ve deneyler yapılması mümkün olacaktır. Bu anlamda; bu merkezlerde çalışacak Türkiye' den gidecek olan kullanıcılara bu merkezleri daha fazla kullanabilme potansiyeli sağlayacak deney önerileri hazırlamalarına katkı sağlayacak bu kodlar ile ilgili hazırlanan bu tez çalışması bu alanda çalışacaklar için önemli bir kaynak teşkil edecektir.



## KAYNAKLAR

Arlandini, C., Käppeler, F., Wisshak, K., Gallino, R., Lugaro, M., Busso, M. and O. Straniero, “Neutron capture in low-mass asymptotic giant branch stars: cross sections and abundance signatures”. *The Astrophysical Journal* 525 (2), 886, 1999.

Arnould, M. and Goriely, S., “The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status”, *Physics Reports*, 384 (1), 1 – 84, 2003.

Audouze, J. and Truran, J. W., “P-process nucleosynthesis in postshock süpernova envelope environments”. *Astrophysical Journal* 202, 204–213, 1975.

Bal, S.H.,  $^{11}\text{B} + ^{186}\text{W} @ 68\text{MeV}$  Reaksiyonu ile elde edilen 5n kanalının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2005.

Bass, R., Nuclear Reactions with Heavy Ions, *Springer-Verlag*, Berlin, 1980

Bayrak,O., Hafif-ağır iyon reaksiyonlarının yeni bir potansiyel yaklaşımı ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 2004.

Bazin, D., Tarasov, O.B., Lewitowicz, M. and Sorlin, O., “The code LISE: a new version for Windows”, *Nuclear Physics A*, 701, 661- 665, 2002b.

Bazin, D., Tarasov, O.B., Lewitowicz, M. and Sorlin, O., “The program LISE: a simulation of fragment separators”, *NIM A*, 482 ,307- 327, 2002a.

Benlliure, J. H., Helariutta, K., Schmidt, K.H. and Ricciardi, M.V., “Reaction mechanisms involved in the production of neutron-rich isotopes”, *Third International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei*, Sanibel Island, Florida, USA, 400- 407, 2003.

Bertulani, C. A., and Hussein M.S., “Current status of nuclear physics Research”, *Brazilian Journal of Physics*, 45, 730- 755, 2015.

Burbidge, E.M., Burbidge, G.R., Fowler, W.A. and Hoyle, F. “Synthesis of the elements in stars”. *Reviews of Modern Physics*, 29, 547–650, 1957.

Calboreanu, A., Pencea, C. and Salagean, O., “The effect of gamma de-excitation competition on the ( $\alpha$ , n) and ( $\alpha$ , 2n) reactions on gold and antimony”, *Nuclear Physics A*, 383 (2), 251-263, 1982.

Cameron, A.G.W., Stellar Evolution, Nuclear Astrophysics, and Nucleogenesis, Chalk River Technical Report CRL-41(2nd Ed.);AECL-454, *Atomic Energy of Canada Ltd.* Ontario, Canada, 1957.

Chaudhuri, G., Mallik, S., and Das Gupta, S., “ Nuclear multifragmentation: basic concepts”, *Pramana -Journal of Physics Indian Academy of Sciences*, 82 (5), 907–917, 2014.

Chodil, G., Jopson, R.C., Mark, H., Swift, C.D., Thomas, R.G. and Yates, M.K., “(p, n) and (p, 2n) cross sections of nine elements between 7.0 and 15.0 MeV”, *Nuclear Physics A*, 93 (3),648- 672, 1967.

Cowan, J.J., Thielemann, F. K. and Truran, J. W., “The R-process and nucleochronology”, *Phys. Rep.* 208, 267- 394, 1991.

Denzler, F.O., Rösch, V. and Qaim, S. M., “Excitation functions of  $\alpha$ -particle induced nuclear reactions on highly enriched  $^{92}\text{Mo}$ : comparative evaluation of production routes for  $^{94\text{m}}\text{Tc}$ ”, *Radiochimica Acta*, 68, 13-20, 1995.

Duppen, P. A., Noyaux Exotiques: Production, Proprietes Et Specificites, *Instituut voor Kern- en Strlingsfysica University of Leuven*, Belgium, 1997.

Enge, H., Introduction to Nuclear Physics, *Addison –Wesley Publishing Company*, USA, 1966.

Flowers, P., Theopold, K. And Langley, R., Chemistry 2e, *OpenStax, Rice University*, Houston, Texas, 2019.

Freeman, E.L., Fusion Reaction Cross-section Measurements Near  $^{100}\text{Sn}$ , M.Sc Thesis, *The University of Tennessee*, Knoxville, 2008.

Garima, S., Heavy Ion Fusion Reactions Araound The Coulomb Barrier, M.Sc Thesis, *Thapar Institute of Engineering & Technology*, Punjab, 2019.

Gavron, A., “Statistical model calculations in heavy ion reaction”, *Phys.Rev. C*, 21, 230- 236, 1980.

Harissopulos, S., Skreti, E., Tsagari, P. and Souliotis, G. A., “Cross section measurements of the  $^{93}\text{Nb}(p, \gamma)^{94}\text{Mo}$  reaction at  $E_p=1.4 - 4.9$  MeV relevant to the nucleosynthetic p process”, *Physical Review C*, 64, 055804, 2001.

Hayward, E., Photonuclear Reactions, *National Bureau of Standards Monograph*, Washington D.C., 1970.

Herman, M., R. Capote, M. Sin, A. Trkov, B.V. Carlson, P. Oblozinsk\_y, C.M. Mattoon, H. Wienkey, S. Hoblit, Young-Sik Cho, G.P.A. Nobre, V. Plujko and V. Zerkin, “EMPIRE-3.2 Malta modular system for nuclear reaction calculations and nuclear data evaluation user's Manual”, [https://zbook.org/read/5cc8b\\_empire-3-2-malta-modular-system-for-nuclear-reaction.html](https://zbook.org/read/5cc8b_empire-3-2-malta-modular-system-for-nuclear-reaction.html), 2013.

Herman, M., and Trkov, A., “ENDF-6 Formats Manual”, National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory, <https://www-nds.iaea.org/public/endl/endl-manual.pdf>, 2018

Hermanne, A., Adam-Rebeles, R., Tarkanyi, F., Takacs, S., Csikai, J., Takacs, M.P. and Ignatyuk, A., “Deuteron induced reactions on Ho and La: experimental excitation functions and comparison with code result”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 311, 102-111, 2013.

Hodgson, P.E., Gadioli E. And Gadioli-Erba, E., Introductory Nuclear Physics, **Oxford University Press**, Oxford, 2003.

Ibraheem, A., Hassanain, M. A. and El-Azab, M., Elastic Scattering of Neutron Halo Nuclei, **Proceeding of the Sixth Nuclear and Particle Physics Conference (NUPPAC-2007)**, 2007.

Ikezoe, H.; Shikazono, N.; Tomita, Y.; Ideno, K.; Sugiyama, Y.; Takekoshi, E.; Tachikawa, T. and Nomura, T., “Measurements of evaporation residues to investigate lower limiting angular momenta in fusion reactions”, **Nuclear Physics A**, 456 (2), 298-316, 1986.

İsmail, M., “Measurement and analysis of the excitation function and isomeric cross section ratios for s-induced reaction on Ir, Au, Re and Ta nuclei”, **PRAMANA Journal of Physics**, 50 (2), 173-189, 1998.

Kelić, A., M. V. Ricciardi and K.-H. Schmidt, Spallation reactions – physics and applications, **XVII International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Application**, Varna, Bulgaria, 24-30 September, 2007.

Kılıç, E., Hızlı Nötron Tepkimeleri İçin İstatistik Model Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2004.

Koning, A., S. Hilaire and S. Goriely, “Talys user manuel”, **TENDL-2019 nuclear data library (psi.ch)**, 2021.

Krane, K.S., Introductory Nuclear Physics, **Willey&Sons**, New York, 1988.

Kumar, D., and Maiti, M., “Measurement of the cross section of the residues from the  $^{11}\text{B}$ -induced reaction on  $^{89}\text{Y}$  and  $^{93}\text{Nb}$ : Production of  $^{97}\text{Ru}$  and  $^{101\text{m}}\text{Rh}$ ”, **Physical Review C**, 95, 064602, 2017.

Kumar, D., Maiti, M., and Lahiri, S., “Experimental probe for the production of  $^{97}\text{Ru}$  from the  $^7\text{Li}+^{93}\text{Nb}$  reaction: A study of precompound emissions”, *Physical Review C*, 94, 044603, 2016.

Levkovskij, V.N., Act.Cs.By Protons and Alphas, *Moscow*, 1991.

Litvinov, Y.A., Basic Nuclear Properties of Neutron-Deficient Nuclei investigated via High Precision Mass Measurements in the Element Range of  $36 < Z < 92$ , Phd Thesis, *Giessen University*, Germany, 2003.

Lobo, N., Study of  $^{20}\text{Ne}$  Induced Reaction in  $^{59}\text{Co}$ : Incomplete and Complete Fusion, M.Sc Thesis, *Addis Ababa University*, Ethiopia, 2016.

McLane, V., “EXFOR basics, a short guide to the nuclear reaction data exchange format”, National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory, <https://www.nndc.bnl.gov/exfor/compilations/nds-206.pdf>, 2000.

Meyer, B.S., “The r-, s-, and p- processes in nucleosynthesis”, *Annu. Rev. Astron.Astrophys*, 32, 153-190, 1994.

Meyerhof, W.E., Elements of Nuclear Physics, *McGraw-Hill,Inc*, New York, 1967.

Navin, A., Tripathi, V., Blumenfeld, Y. and Nanl, V., “Direct and compound reactions induced by unstable helium beams near the Coulomb barrier”, *Physical Review C*, 70, 044601, 2004.

Nettrdon, L., Derya, V., Endres, J. and Fransen, C., “The  $\gamma$ -ray spectrometer HORUS and its applications for nuclear astrophysics”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 754, 94-100, 2014.

Nieto, T.K., Production and  $\beta$  Decay Half-Lives of Heavy Neutron-Rich Nuclei Approaching The Stellar Nucleosynthesis r- Process Path Around  $A=195$ , Phd Thesis, *Universidad de Santiago De Compostela*, Espana, 2007.

Otsuka, T., “Exotic nuclei and nuclear forces”, *Physica Scripta*, T152, 2013.

Özkan, N. G., Murphy, A.S.J., Boyd, R.N and A.L. Cole, “Cross section measurements of the  $^{102}\text{Pd}(p, \gamma)^{103}\text{Ag}$ ,  $^{116}\text{Sn}(p, \gamma)^{117}\text{Sb}$ , and  $^{112}\text{Sn}(\alpha, \gamma)^{116}\text{Te}$  reactions relevant to the astrophysical rp- and  $\gamma$ -processes”, *Nucl. Phys. A*, 710, 469- 485, 2002.

Özkan, N., Efe, R. T. Güray, A. Palumbo, J. Görres, H. Y. Lee, L. O. Lamm, W. Rapp, E. Stech, M. Wiescher, Gy. Gyürky, Zs. Fülöp, and E. Somorjai, “Astrophysical S factor for  $\alpha$ -capture on  $^{112}\text{Sn}$  in the p-process energy range”, *Physical Review C*, 75, 025801, 2007.

Patin J.B., Experimental Cross Sections for Reactions of Heavy Ions and  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{248}\text{Cm}$  Targets, PhD Thesis, *University of California*, Berkeley, 2002.

Pfützner, M., M. Karny, L. V. Grigorenko, and K. Riisager, “Radioactive decays at limits of nuclear stability”, *Reviews. of Modern Physics*, 84, 567- 635, 2012.

Prajapat, R., Kumar, D., Kumar, K. and Chauhan, A., “Production of  $^{187}\text{Pt}$  radionuclide from  $^{11}\text{B}$ -induced reaction on  $^{nat}\text{Ta}$ ”, *Proceedings of the DAE Symp. on Nucl. Physics.*, India, 63, 2018.

Rapp, W., Heil, M., Hentschel, D. and Kaeppeler, F., “ $\alpha$ - and neutron-induced reactions on ruthenium isotopes”, *Phys. Rev. C*, 66, 015803, 2002.

Read, J.J., I. M. Ladenbauer-Bellis and R. Wolfgang, “Compound nucleus formation mechanisms in reaction of heavy ions with medium-mass element”, *Physical Review*, 127(5), 1722- 1731, 1962.

Reisdorf, W. and Schadel M., “How well do we understand the synthesis of heavy elements by heavy-ion induced fusion?”, *Z. Phys. A - Hadrons and Nuclei*, 343, 47- 57, 1992.

Reisdorf, W., “Analysis of fissionability data at high excitation energies”, *Z. Phys. A - Atoms and Nuclei*, 300, 227- 238, 1981.

Sahoo, R.N., Kaushik, M., Sood, A. and Kumar, P., “Entrance channel effect on incomplete fusion”, *Acta Physica Polonica B*, 48(3), 2018.

Saikh, M., Roy, S., Rajbanshi, S. and Pradhan, M., “Investigation of  ${}^6\text{Li} + {}^{64}\text{Ni}$  fusion at near-barrier energies”, *Physical Review C*, 90, 024615, 2014.

Satchler, G.R., Introduction to Nuclear Reaction, *The Macmillon Press Ltd.*, Oxford, 1983.

Sing, D., Sneha B. L., P. K. Giri, A. Mahato, R. Tripathi, H. Kumar, S. A. Tali, S. Parashari, A. Ali, R. Dubey, M. A. Ansari, R. Kumar, S. Muralithar and R. P. Singh; “Measurement of excitation functions of evaporation residues in the  ${}^{16}\text{O} + {}^{124}\text{Sn}$  reaction and investigation of the dependence of incomplete fusion dynamics on entrance channel parameters”, *Physical Review C*, 97, 064610, 2018.

Sing, N.L., Patel, B.J., Chintalapudi, S.N., Somayajulu, D.R.S. and Chintalapudi, S.N., “Analysis of the excitation functions of ( $\alpha$ , xnyp) reactions on natural copper”, *PRAMANA Journal of Physics*, 42,(4), 349-363, 1994.

Somorjai, E., Fülöp, Z. and Oberhummer, Z., “Experimental cross section of  ${}^{144}\text{Sm}(\alpha, \gamma)$   ${}^{148}\text{Gd}$  and implications, for the p-process”, *Astron.&Astrophys*, 333, 1112- 1116, 1998.

Spyrou, A., Lagoyannis, A., Demetriou, P. and Harissopoulos, S., “Cross section measurements of ( $p, \gamma$ ) reactions on Pd isotopes relevant to the p process”, *Physical Review C*, 77, 065801, 2008.

Şahin, E., N=50 Civarında Nötron-Zengin Çekirdeklerin Kabuk Yapısının İncelenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.

Tali, S.A., Kumar, Hç, Ansari, M. A., Ali, A., Singh, D., A. Rahbar and Giri, P. K., “Study of incomplete fusion reaction dynamics in  ${}^{13}\text{C} + {}^{165}\text{Ho}$  system and its dependence on various entrance channel parameters”, *Nuclear Physics A*, 970, 208-223, 2018.

Tanihata, I., H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, N. Yoshikawa, K. Sugimoto, O. Yamakawa, T. Kobayashi, and N. Takahashi, “Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p-shell region”. *Physical Review Letters*, 55(24), 2676- 2679, 1985a.

Tanihata, I., H. Hamagaki, O. Hashimoto, S. Nagamiya, Y. Shida, N. Yoshikawa, O. Yamakawa, K. Sugimoto, T. Kobayashi, D.E. Greiner, N. Takahashi and Y. Nojiri, “Measurements of interaction cross sections and radii of He isotopes”, *Physics Letters B*, 160, 380-384, 1985b.

Tanihata, I., “Neutron halo nuclei”, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 22,157-198, 1996.

Tarasov, O. B. and Bazin,D., “Development of the program LISE: application to fusion–evaporation”, *Nucl. Instr. and Meth. B*, 204,174- 178, 2003.

Tarasov, O. B. and Bazin , D., “LISE++: design your own spectrometer”, *Nuclear Physics A*, 746, 411c–414c, 2004a.

Tarasov, O.B. and Villari, A.C.C., “Fusion–fission is a new reaction mechanism to produce exotic radioactive beams”, *NIM B*, 266, 4670-4673, 2008.

Tarasov, O.B., “Analysis of momentum distributions of projectile fragmentation products”, *Nuclear Physics A*, 734, 536- 540, 2004b.

Tarkanyi, F., A. Hermanne, S. Takács, F. Ditrói, B. Király, S.F. Kovalev and A.V.Ignatyuk, “Experimental study of the  $^{165}\text{Ho}(d, 2n)$  and  $^{165}\text{Ho}(d, p)$  nuclear reactions up to 20 MeV for production of the therapeutic radioisotopes  $^{165}\text{Er}$  and  $^{166\text{g}}\text{Ho}$ ”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 266, 3529-3534, 2008.

Thornthwaite, A.M., Structure of The Neutron-Deficient Nuclei  $^{173}\text{Au}$  and  $^{173}\text{Pt}$  and Their  $\alpha$ -Decay Descendants, Phd Thesis, *University of Liverpool*, Liverpool, 2014.

Tsagari, P., M. Kokkoris, E. Skreti, A. G. Karydas, S. Harissopoulos, T. Paradellis, and P. Demetriou, “Cross section measurements of the  $^{89}\text{Y}(p, \gamma)^{90}\text{Zr}$  reaction at energies relevant to p-process nucleosynthesis”, *Physical Review C*, 70, 015802 2004.

Vermeulen, D., H. -G. Clerc, C. -C. Sahm, K. -H. Schmidt, J. G. Keller, G. Münzenberg and W. Reisdorf, “Cross sections for evaporation residue production near the N=126 shell closure”, *Z. Phys. A - Atoms and Nuclei* , 318, 157- 169, 1984.

Wallerstein, G. I. Iben, Jr., P. Parker, A. M. Boesgaard, G. M. Hale, A. E. Champagne, C. A. Barnes, F. Käppeler, V. V. Smith, R. D. Hoffman, F. X. Timmes, C. Sneden, R. N. Boyd, B. S. Meyer and D. L. Lambert, “Synthesis of the elements in stars: forty years of progress”, *Rev. Mod. Physics*, 69, 995, 1997.

Woosley, S.E. and Howard W.M., “The p-processes in supernovae”, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 36, 285- 304, 1978.

Yadav, A., Sharma, V. J., Singh, P. P. and Singh, D. P., “Large influence of incomplete fusion in  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$  at  $E_{\text{lab}} \approx 4\text{--}7$  MeV/nucleon”, *Physical Review C*, 85,034614, 2012.

Zerkin, V., “Interactive plotting of nuclear data” <https://www.nds.iaea.org/public/zvview/>, 2021

## ÖZ GEÇMİŞ

Birgöl EREN ..... tarihinde .....’ de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini .....’de tamamladı. .... yılında girdiği ..... bölümünü 2005 yılında tamamladı. Aynı yıl ..... Enstitüsü’nde yüksek lisansa başladı. .... yılında yüksek lisans programını tamamlayıp aynı yıl .....’nde doktora programına başladı. Doktora çalışmaları sırasında çeşitli araştırmalar yapmak ve deneysel çalışmalara katılmak üzere ..... yılları arasında merkezi .....’da yer alan ..... (.....) kurumunda ..... projesine araştırmacı olarak katıldı. Bilim dalındaki ilgi alanı, nükleer fizik, yüksek enerji ve parçacık fiziği, nükleer enerji, dedektör geliştirme ve dedektör elektroniğidir.

## TEZ ÇALIŞMASINDA ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası sunum üretilmiştir. Bu üretilen çalışma aşağıda sunulmuştur.

Eren, B. and S. Ertürk, Results from the PACE4 Code for Fusion Evaporation Reaction Cross-Section Calculations, *IVX. International Conference on Nuclear Structure Properties*, 2-4 June, 2021



