

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**AĞIR İYON FÜZYON REAKSİYONLARINDA TESİR KESİTLERİ VE ENGEL
DAĞILIM FONKSİYONLARININ ÇİFTLENMİŞ KANAL YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Burcu EROL

**OCAK 2020
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Fizik Ana Bilim Dalında

Burcu EROL Tarafından Hazırlanan

**AĞIR İYON FÜZYON REAKSİYONLARINDA TESİR KESİTLERİ VE ENGEL
DAĞILIM FONKSİYONLARININ ÇİFTLENMİŞ KANAL YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 07 /01 /2020 gün ve 1836 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

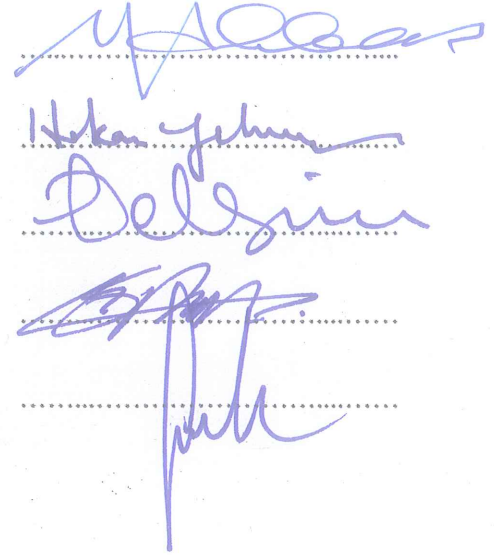
Başkan : Prof. Dr. Mehmet AKBAŞ

Üye : Prof. Dr. A. Hakan YILMAZ

Üye : Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU

Üye : Prof. Dr. Recep KESER

Üye : Prof. Dr. Ayhan KARA



Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda "Doktora Tezi" olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada, ağır iyon bölgesindeki kararlı çekirdekler ile füzyon reaksiyonlarının tesir kesitleri ve engel dağılımlarının çiftlenmiş kanal kodları ile hesaplanması, deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ve kodlar arasında bir eşitsizlik olup olmadığını tespit etmek amaçlandı ve gerçekleştirildi.

Tez çalışmamın her aşamasında, konu seçiminden sonuç kısmına kadar, değerli bilgi ve önerileriyle kendisine ihtiyaç duyduğum her anda benden yardım ve desteğini esirgemeyen, kılavuzluk eden, birlikte çalışmaktan ve öğrencisi olmaktan onur duyduğum Sayın Danışman Hocam Prof. Dr. Ahmet Hakan YILMAZ' a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam esnasında KTÜ Fizik Bölümüne her gelişimde ofisinde beni ağırlayan, desteği ile beni yalnız bırakmayan, her daim destekçim olan değerli arkadaşım Arş Gör. Zehra Merve CİNAN' a sonsuz teşekkür ederim. Ve değerli ekip arkadaşım Taylan Başkan' a gönülden teşekkür ederim.

Çalışmış olduğum Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan tüm öğretim elemanlarına çok teşekkür ederim.

Göreve başladığım andan itibaren oda ve mesai arkadaşım olan, akademik hayatın her safhasını beraber omuz omuza geçtiğimiz değerli arkadaşım Arş. Gör. Aylin Hacısalihoğlu' na çok teşekkür ederim. Kıymetli mesai arkadaşım Arş.Gör. Dr. M. Yasin HACİSALİHOĞLU' na desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarımnda her zaman bana destek olup yanımdan hiç ayrılmayan, karşılaştığım güçlükleri aşmamda bana her türlü desteği sağlayan eşim Burak Gani EROL'a çok teşekkür ederim.

Tüm tahsil hayatımı kendilerinin özverisine borçlu olduğum aileme bana olan inanç, anlayış ve desteklerinden dolayı minnetlerimi sunarım.

Burcu EROL

Trabzon-2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Ağır İyon Fűzyon Reaksiyonlarında Tesir Kesitleri ve Engel Dağılım Fonksiyonlarının iftlenmiř Kanal Yöntemi ile İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. A. Hakan YILMAZ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28.01.2020

Burcu EROL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Nükleer Reaksiyonlar.....	4
1.2.1. Nükleer Reaksiyonların Enerjisi.....	8
1.3. Nükleer Reaksiyon Çeşitleri.....	9
1.3.1. Esnek Saçılma.....	9
1.3.2. Esnek Olmayan Saçılma.....	9
1.3.3. Toplama Reaksiyonları.....	10
1.3.4. Sıyırma Reaksiyonları.....	10
1.3.5. Nakavt Reaksiyonları.....	10
1.3.6. Bileşik Nükleer Reaksiyonlar.....	11
1.4. Nükleer Yapı ve Modeller.....	13
2. AĞIR İYON REAKSİYONLARI.....	16
2.1. Ağır-İyon Etkileşmelerinin Genel Özellikleri.....	18
2.1.1. Diğer Ağır-İyon Reaksiyon Modelleri.....	20
2.2. Coulomb Uyarılması.....	20
2.3. Füzyon Reaksiyonları.....	21
2.4. Ağır İyon Füzyon Reaksiyonları.....	24
2.5. Coulomb Engeli Boyunca Füzyon.....	25
2.6. Füzyon Engel Dağılımı.....	30
2.7. Çiftlenmiş Kanal Metodu.....	30
3. YÖNTEM.....	32

3.1.	Çiftlenmiş Kanal Formalizmi.....	32
3.1.1	Tam Eşleşmiş Kanal Hesaplamaları.....	34
3.2.	Çiftlenmiş Kanal Kodları.....	35
3.2.1.	CCFULL-Ağır İyon Füzyon Reaksiyonları İçin Tüm Sıra Bağlantıları İle Çiftlenmiş Kanal Hesaplamaları.....	35
3.2.2.	CCFUS- Ağır İyon Füzyon Reaksiyonlarında Füzyon Tesir Kesitinin Hesaplanması için Basitleştirilmiş Çiftlenmiş Kanal Kodu.....	39
3.2.3.	CCDEF – Statik Nükleer Deformasyonları İçeren Füzyon Tesir Kesitleri İçin Basitleştirilmiş Çiftlenmiş Kanal Kodu.....	41
3.2.4.	Düşük Nükleer Enerjili Nükleer Reaksiyon Bilgi Tabanı Gösterimi (NRV)...	43
3.3.	Wong Formülü Yöntemi.....	47
3.4.	Engel Dağılımı.....	48
3.4.1.	Wong Formülü ile Teorik Yöntem.....	48
4.	BULGULAR.....	50
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
6.	KAYNAKLAR.....	94
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

AĞIR İYON FÜZYON REAKSİYONLARINDA TESİR KESİTLERİ VE ENGEL DAĞILIM FONKSİYONLARININ ÇİFTLENMİŞ KANAL YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Burcu EROL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. A. Hakan YILMAZ
2020, 101 Sayfa

Bu çalışmada ağır iyon füzyon reaksiyonları çiftlenmiş kanal metodu ile 48 adet reaksiyon için sistematik olarak incelenmiştir. Coulomb engeli yakınındaki ağır iyon füzyonu, deneysel çalışanların ve teorisyenlerin ilgisini çekmektedir. Çarpışmalar tipik olarak birçok açık reaksiyon kanalı varlığı ile karakterize edilir. Coulomb engelinin etrafındaki enerjilerde, süreç, bir veya iki çekirdeğin esnek saçılma, esnek olmayan uyarımlar ve füzyon operasyonlarıdır. Füzyon süreci, saçılma potansiyelini Coulomb ve yakınlık potansiyelinin toplamı olarak alan tek boyutlu engel penetrasyon modelinin etkisi olarak tanımlanır. Bu çalışmada, füzyon tesir kesitleri CC hesaplamaları ile CCFULL, CCDEF, CCFUS ve NRV kodları ve Wong formalizmi kullanılarak gelen parçacık ve hedef için 2^+ ve 3^- uyarılmalarını dikkate alarak detaylı olarak incelenmiştir. Hesaplanan tesir kesiti sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çiftlenmiş kanal kodlarından CCFULL ve CCDEF' in CCFUS a göre daha güvenilir veriler ürettiği tespit edildi. Deneysel verisi varolan reaksiyonlarda kodların doğru sonuçlar verdiği, deneysel verileri bulunmayan reaksiyonlarda ise kodların birbiri arasındaki uyumu gözlemlendi. Tüm reaksiyonlar için engel dağılımları çiftlenim değerleri altında CCFULL ve NRV kodları ile ve Wong formalizmi ile hesaplandı. Bu hesaplamaların kendi aralarındaki uyum incelendi ve modellerin birbirleri ile uyum içerisinde olduğu tespit edildi.

Anahtar Kelimeler: Ağır-iyon reaksiyonları, Çiftlenmiş kanallar methodu, Füzyon, Engel Dağılımı

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION of CROSS SECTIONS and BARRIER DISTRIBUTION FUNCTIONS in HEAVY-ION FUSION REACTIONS by COUPLED CHANNEL METHOD

Burcu EROL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program

Supervisor: Prof. A. Hakan YILMAZ

2020, 101 Pages

In this study, heavy ion fusion reactions were investigated systematically for 48 reaction by coupled channel method. Heavy-ion fusion near the Coulomb barrier is of interest to experimenters and theorists. Collisions are typically characterized by the presence of many open reaction channels. In the energies around the Coulomb barrier, the process is the elastic scattering of one or two nuclei, inelastic excitations and fusion operations. The fusion process is defined as the effect of a one-dimensional barrier penetration model that takes scattering potential as the sum of Coulomb and proximity potential. In this study, fusion cross sections were examined in detail by using CC calculations, such as CCFULL, CCDEF, CCFUS and NRV codes and Wong formalism with 2^+ and 3^- excitation for incoming particle and target. The calculated fusion cross section results were compared with the experimental data. It was determined that CCFULL and CCDEF, produced more reliable data than CCFUS. The barrier distributions for all reactions were calculated by CCFULL and NRV codes under coupling values and by Wong formalism. The harmony between these calculations was examined and the models were found to be in harmony with each other.

Keywords: Heavy-ion reactions, Coupled channel method, Fusion, Barrier Distribution

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Toplama reaksiyonunun şematik bir resmi 10
Şekil 1.2.	Sıyırma reaksiyonunun şematik bir resmi 10
Şekil 1.3.	Nakavt reaksiyonunun şematik bir resmi 11
Şekil 1.4.	Bir bileşik çekirdeğin oluşumu ve bozunması 12
Şekil 1.5.	Kabuk modelinin ve sihirli sayıların gösterimi 14
Şekil 2.1.	Etki parametresinin bir fonksiyonu olarak ağır iyon çarpışmalarında gözlenen farklı işlemler..... 17
Şekil 2.2.	İki ağır iyon arasındaki etkileşim potansiyeli..... 19
Şekil 2.3.	Üç kritik enerjinin ve dört tip ağır iyon nükleer reaksiyonunun şematik gösterimi..... 21
Şekil 2.4.	Orbital açısal momentumun çeşitli değerleri için radyal mesafenin bir fonksiyonu olarak $^{16}O+^{120}Sn$ için nükleer, Coulomb ve merkezi potansiyelinin toplamı..... 23
Şekil 2.5.	$^{16}O+Sm$ için füzyon tesir kesitleri..... 24
Şekil 3.1.	CCFULL programı giriş dosyası..... 38
Şekil 3.2.	CCFULL programı çıkış dosyası..... 39
Şekil 3.3.	$^{16}O+^{144}Sm$ için deneysel füzyon tesir kesiti hakkındaki bilgi örneği..... 43
Şekil 3.4.	Ampirik (eğri 1) ve kuantum kanal birleştirme modelleri (eğri 2) içindeki NRV bilgi tabanı kullanılarak $^{36}S+^{90}Zr$ füzyon reaksiyonu için kesiti analiz etmeye örnek. Görüntülenen deneysel veriler [45] nolu referanstan alınmıştır..... 44
Şekil 3.5.	Giriş verilerinin hazırlanması için bir görüntü örneği..... 45
Şekil 3.6.	NRV bilgi tabanında $^4He+^{64}Zn$ reaksiyonu için füzyon tesir kesitini analiz etme örneği..... 46
Şekil 4.1.	(a) $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonu için NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları..... 59
Şekil 4.2.	(a) $^{16}O+^{70}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{70}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları..... 60

Şekil 4.3.	(a) $^{16}O+^{72}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{72}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	60
Şekil 4.4.	(a) $^{16}O+^{74}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{74}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	61
Şekil 4.5.	(a) $^{16}O+^{76}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{76}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	61
Şekil 4.6.	(a) $^{16}O+^{148}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{148}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	62
Şekil 4.7.	(a) $^{16}O+^{150}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{150}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	63
Şekil 4.8.	(a) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	63
Şekil 4.9.	(a) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	64
Şekil 4.10.	(a) $^{20}Ne+^{90}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}Ne+^{90}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	65
Şekil 4.11.	(a) $^{20}Ne+^{92}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}Ne+^{92}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	65
Şekil 4.12.	(a) $^{20}Ne+^{94}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}Ne+^{94}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	66
Şekil 4.13.	(a) $^{20}Ne+^{96}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}Ne+^{96}Zr$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel	66

	dağılımları.....	
Şekil 4.14.	(a) $^{28}\text{Si}+^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	67
Şekil 4.15.	(a) $^{28}\text{Si}+^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	67
Şekil 4.16.	(a) $^{28}\text{Si}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	68
Şekil 4.17.	(a) $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları	69
Şekil 4.18.	(a) $^{28}\text{Si}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	69
Şekil 4.19.	(a) $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	70
Şekil 4.20.	(a) $^{28}\text{Si}+^{100}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{28}\text{Si}+^{100}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	71
Şekil 4.21.	(a) $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	72
Şekil 4.22.	(a) $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	72
Şekil 4.23.	(a) $^{36}\text{S}+^{204}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{36}\text{S}+^{204}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	73
Şekil 4.24.	(a) $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL,	74

	NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	
Şekil 4.25.	(a) $^{36}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{36}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	74
Şekil 4.26.	(a) $^{36}\text{S}+^{210}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{36}\text{S}+^{210}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi.....	75
Şekil 4.27.	(a) $^{28}\text{Si}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	76
Şekil 4.28.	(a) $^{28}\text{Si}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	76
Şekil 4.29.	(a) $^{40}\text{Ar}+^{176}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{40}\text{Ar}+^{176}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	77
Şekil 4.30.	(a) $^{40}\text{Ar}+^{178}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{40}\text{Ar}+^{178}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	77
Şekil 4.31.	(a) $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	78
Şekil 4.32.	(a) $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi.....	79
Şekil 4.33.	(a) $^{64}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{64}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi.....	79
Şekil 4.34.	(a) $^{70}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{70}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi.....	80
Şekil 4.35.	(a) $^{20}\text{Ne}+^{112}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{112}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	81
Şekil 4.36.	(a) $^{20}\text{Ne}+^{114}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{114}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel	81

	dağılımları.....	
Şekil 4.37.	(a) $^{20}\text{Ne}+^{116}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{116}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	82
Şekil 4.38.	(a) $^{20}\text{Ne}+^{118}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{118}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	82
Şekil 4.39.	(a) $^{20}\text{Ne}+^{120}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{120}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	83
Şekil 4.40.	(a) $^{46}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{46}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	84
Şekil 4.41.	(a) $^{48}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{48}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi.....	84
Şekil 4.42.	(a) $^{50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	85
Şekil 4.43.	(a) $^{30}\text{Si}+^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{30}\text{Si}+^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	86
Şekil 4.44.	(a) $^{30}\text{Si}+^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{30}\text{Si}+^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	86
Şekil 4.45.	(a) $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	87
Şekil 4.46.	(a) $^{58}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{58}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları.....	88
Şekil 4.47.	(a) $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi.....	88

Şekil 4.48. (a) $^{32}\text{S}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{32}\text{S}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları..... 89



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Nükleer reaksiyon çeşitleri	6
Tablo 3.1. CCFULL bilgisayar kodu girdisi.....	36
Tablo 3.2. CCFUS girdi dosya örneği.....	40
Tablo 3.3. CCFULL çıktı dosya örneği.....	41
Tablo 3.4. CCDEF girdi dosya örneği.....	42
Tablo 3.5. CCDEF çıktı dosya örneği.....	42
Tablo 4.1. Derinlik Parametresi V_0 ve yüzey yayılma parametresi a_0	51
Tablo 4.2. 2+ durumlarına ait deformasyon parametreleri ve uyarılma enerjileri....	55
Tablo 4.3. 3- durumlarına ait deformasyon parametreleri ve uyarılma enerjileri.....	57

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Kütle numarası
Z	: Atom numarası
MeV	: Milyon elektron volt
β_2	: Kuadrupol deformasyon parametresi
β_3	: Oktupol deformasyon parametresi
$\sigma_{\text{füz}}$: Füzyon tesir kesiti
$E_{\text{c.m.}}$: Kütle merkezi enerjisi
V_0	: Derinlik parametresi
a_0	: Yüzey yayılma parametresi
μ	: İndirgenmiş kütle
CN	: Birleşik çekirdek
CC	: Çiftlenmiş kanal
T_i	: Parçacık kinetik enerjisi
m_i	: Parçacık kütlesi
Q	: Reaksiyon enerjisi
n	: Nötron
p	: Proton
α	: Helyum parçacığı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İki ağır iyon arasındaki çarpışma, en basit ifade ile kısa mesafeli bir nükleer çekim ve uzun menzilli bir Coulomb itme kuvvetinden oluşan merkezi bir potansiyelde hareket eden iki sert kürenin çarpışması olarak tanımlanmaktadır. Ağır iyonların füzyonu son yıllarda birçok nükleer fizikçinin ilgisini çekmiştir. Bu yenilenen ilgi, bir yandan, sadece uygun enerji aralıklarına sahip ağır iyon hızlandırıcıların artan varlığından kaynaklanmıştır. Bununla birlikte diğer yandan, daha derin bir motivasyon, bir ağır iyon füzyon reaksiyonunun, bir nükleer çok cisim sisteminin maruz kalabileceği en sert düzenlemelerden biri olması gerçeğinde yatmaktadır. Ayrıca, yüksek uyarılmış çekirdekler üretme imkanı da sunmaktadır. Ağır iyon reaksiyonlarının ortaya çıkması ile birlikte, nükleer fizik yeni bir sınır kazanmıştır. Çekirdeğin içyapısını ve nükleer özelliklerini anlamak için birçok çalışma yapılmıştır. Bunlar çekirdeğin yapısını açıklamaya çalışan nükleer modellerin gelişmesine yol açmıştır. Ancak çekirdeklerin etkileşimi ve bileşenleri çok karmaşık ve anlaşılması zordur. Parçacık hızlandırıcılarından ağır iyon ışınlarının elde edilmesi, ağır iyon reaksiyon dinamiği ile birlikte nükleer yapının karmaşıklıklarını anlamak için birçok olanak sağlamıştır. Klasik tanımlama açısından belirli çekirdeklerin ayrıntılarını test etmek için, hedef çekirdeklerin, hedef çekirdeklerinin boyutundan daha kısa olan λ dalga boyuna sahip gelen (gelen parçacık) çekirdekleriyle bombalanması gerekir. Bununla birlikte, kuantal veya dalga etkileri önemlidir ve nükleer fizikteki enerji alanındaki (0-1000MeV) olayların nicel bir açıklaması için kuantum mekaniği gereklidir. Gelen parçacık bir hedef çekirdeğe dağıldığında, sonuç temel olarak üç faktörün birleşimine bağlıdır:

- (i) Reaksiyon mekanizması
- (ii) Gelen parçacık ve hedef arasındaki etkileşimin doğası
- (iii) İlgili çekirdeklerin iç yapısı

Nükleer reaksiyon, nükleer maddenin çeşitli yönlerine odaklanan tek başına geniş bir konudur. Nükleer reaksiyon çalışmaları, farklı etkileşimli çekirdeklerin yanı sıra gelen parçacığın bombardıman enerjilerini seçerek gerçekleştirilebilir. [1,2]. Proton ve alfa gibi daha hafif gelen parçacıklar durumunda, reaksiyon tipleri bileşik çekirdek (CN) reaksiyonları ve doğrudan reaksiyonlarla sınırlıdır. Bununla birlikte, ağır iyon reaksiyonunda, CN' ye büyük miktarda uyarma enerjisi ve açısal momentum verilebilir. Bu, süper ağır elementlerin sentezine yol açabilir.

Ağır iyon alt engel füzyon reaksiyonlarının araştırma alanı, 70'lerin sonunda, basit bir potansiyel modelin öngörülmesi bakımından deneysel olarak büyük bir füzyon tesir kesiti geliştirmesinin keşfedilmesiyle başlamıştır. Füzyon; gelen parçacık ve hedef, birleşik bir sistem oluşturmak için birleştiğinde oluşur. Doğrudan reaksiyon teorisinde füzyonu, doğrudan reaksiyon kanallarının temelinden akının emilmesi olarak modelleriz. Füzyon tesir kesitlerini elde etmek için yapılan deneysel çalışmalar, Coulomb engeli yakınındaki enerjilerde kanal birleştirme etkilerinin önemini ilk kanıtını sağlamıştır. Ölçülen tesir kesitleri; basit engel sızma (penetrasyon) modelinin öngörülerinden çok daha büyük bir eksendir[3]. Füzyonun geliştirilmesi ve eşik anomalisi, son on yılda kayda değer deneysel ve teorik ilginin konusu olmuştur. Yetmişlerde gelişen füzyon dinamikleri çalışmasına özel bir ilgi, füzyonun ağır reaksiyonlar arasında olduğu bilincinin ardından Stabil çekirdekler 1) kitle vadisinin proton bakımından zengin tarafında stabiliteden uzak egzotik çekirdekler üretebilir ve 2) çok ağır elementlerin sentezi için çok önemlidir. Ağır iyon füzyonuna dair dikkate alınması gereken diğer bir odak noktası, periyodik tabloyu nötronlar ve hafif yüklü parçacıklar ve ağır aktinit hedefleri kullanılarak sentezlenebilecek elemanların ötesine uzatma arayışıdır. Gelen ve hedef çekirdeklerin proton ve nötronlarının yeni elemana sağladığı ağır iyon füzyon işlemi ile, bu yeni bölgeye ulaşmak için daha ağır karbon, oksijen ve ötesi ışınlar ihtiyaç duyuluyordu. Bu gibi ışınlar sağlayabilecek çeşitli imkanlar 1970'lerin sonunda uygun hale geldikçe nükleer fiziğe olan ilginin nedeni, hafif iyon ışınları tarafından indüklenebilen nükleer uyarılmalardan, yalnızca ağır iyon füzyon işleminin ulaşabileceği yüksek açısal momentum gerektirenlere kaymıştır. Füzyon, engel üstü ışın enerjilerinin kullanıldığı çoğu durumda reaksiyon tesir kesitinin büyük bir bölümünü oluşturduğu için, bu reaksiyonun kapsamlı bir çalışmasının nükleer fizik araştırmasının odak merkezi olması doğal bir süreçti. İşlemin teorik tanımları başlangıçta oldukça basitti, ancak tesir kesitlerinin esas bağımlılığını ışın enerjisine, sistem boyutuna ve kaynaşmış sistemin açısal momentum aralığına verdiler.

Füzyon, iki ayrı çekirdeğin birleşik bir sistem oluşturmak için bir araya getirildiği bir reaksiyon olarak tanımlanır. Olay enerjisi çok büyük olmadığı ve sistem çok hafif olmadığı zaman, reaksiyon süreci esas olarak itici Coulomb kuvveti ve çekici nükleer etkileşim arasındaki güçlü iptali ile yaratılan Coulomb engelini üzerinde kuantum tünelleme tarafından yönetilir. Teorik çalışmaların yanı sıra kapsamlı deneysel çalışmalar da Coulomb engelini yakınındaki ve altındaki enerjilerdeki füzyon reaksiyonlarının çarpışan çekirdeklerin nispi hareketinin birkaç nükleer içsel harekete bağlanmasıyla güçlü bir şekilde etkilendiğini ortaya koymuştur. Ağır iyon alt-engel füzyon reaksiyonları bu nedenle, son on yılda fizik ve kimyanın birçok dalında popüler bir konu olan çiftlenimlerin varlığında kuantum tünellemedeki genel sorunu ele almak için iyi bir fırsat sağlar. Deneysel tekniklerdeki son gelişmeler ile birlikte, füzyon kesitleri küçük enerji aralıklarında yüksek hassasiyetle ölçülebilmektedir. Son yıllarda bu tür yüksek hassasiyetli deneysel veriler, ağır iyon alt-engel füzyon reaksiyonlarına karşı yeni bir ilgi yaratmıştır. Örneğin, çiftlenimlerin füzyon engeli dağılımı [4] aracılığıyla füzyon reaksiyonları üzerindeki etkilerinin detaylı bir çalışmasını sağlamış ve bu sayede de alt engel füzyon reaksiyonları için herhangi bir teorik çerçeveyi test etmek için iyi bir fırsat sunmuşlardır. Teorik olarak, bağıl hareketin göreceli hareket ile gerçek serbestlik dereceleri arasındaki birleşmenin füzyon üzerindeki etkilerini ele almanın standart yolu bütün ilgili kanallar da dahil olmak üzere çiftlenmiş kanal denklemlerini sayısal olarak çözmektir.

Çiftlenmiş kanallar (CC) yöntemiyle ilgili gelişmeler [5,6], engel bölgesindeki füzyon uyarma fonksiyonunun çoğu zaman çok farklı davranışlarının mükemmel bir tanımını sağlamıştır [7]. Çiftlenmiş kanalların füzyon işleminin açıklamasında, süreçte çok sayıda etkileşim engelini yer aldığı görüşü olduğu ve yüksek kaliteli füzyon uyarma işlevlerinin çifte farklılaşmasının doğrudan engellerin dağılımını yansıttığı gösterilmiştir [8,9].

Çiftlenmiş kanal etkilerini inceleyebilmemize olanak sağlayan çeşitli kodlar mevcuttur. Bu tezde kullanılan kodlar CCFULL [10], CCFUS [11], CCDEF [12] ve NRV [13] dir.

CCFULL bilgisayar programı [10] giriş potansiyeli paketinde minimum olarak uygulanan içeri giren dalga sınır koşullarından faydalanmaktadır. Hesaplamalar, çiftlenmiş denklem sayısını sınırlandırmak için dönen çerçeve (NoCoriolis) yaklaşımında gerçekleştirilir. İyon-iyon potansiyeli daima bir Woods-Saxon formu olarak parametrelendirilir ve sanal potansiyeller kullanılamaz. En büyük farklardan biri, statik ve

dinamik deformasyon genliklerinde, tüm bağlantıların dönme yanı sıra yüzey uyarımlarının da hesaplanmasıdır. Bu nedenle kod, çok fononlu uyarımların rol oynadığı ağır ve yumuşak sistemlerin kaynaşmasını açıklamak için daha uygundur. Son olarak, kod aynı zamanda reaksiyona giren çekirdeğin temel durumları arasındaki çift transferini içerir ve Dasso ve Vitturi tarafından [14] tanımlanan bir makroskopik form faktörü ile tarif edilir [8].

Füzyon işleminin basitleştirilmiş modellerine sahip olmak yararlıdır böylece tesir kesitlerini hesaplamak için kolayca kullanılabilir. Örneğin, küresel bir çekirdeğin deforme olmuş bir füzyonda hedef, bazen hedefin dönme uyarma enerjilerini görmezden gelebilir ve deforme çekirdeğin merkez eksene göre oryantasyonunun bir fonksiyonu olarak statik yaklaşım ile füzyon tesir kesitini hesaplayabilir. Hedefin tüm yönelimlerinin ortalaması alınarak elde edilen ortalama tesir kesiti, Fernandez-Niello, Dasso ve Landowne tarafından geliştirilen CCDEF [12] bilgisayar kodundan elde edilebilir.

Diğer bir yararlı bilgisayar kodu, Coulomb pozisyonunda Hamiltonyen etkileşim engelini köşegenleştiren CCFUS'tur. Dasso ve Landowne [11] tarafından geliştirilmiştir ve çoğu zaman sabit birleştirme modeli olarak adlandırılmaktadır.

NRV, Joint Institute for Nuclear Research' de hazırlanmıştır. İnternet üzerinden çalışan bu bilgi tabanı, nükleer özelliklerin modellenmesi ve doğrudan tarayıcıda çalışan çeşitli nükleer dinamikleri süreçlerinin modellenmesi için çok sayıda deneysel veriyi çekirdeklerin ve nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin özellikleri üzerine entegre eder. Bugün NRV bilgi tabanı hem nükleer fizik araştırması hem de eğitim kaynağı için güçlü bir araçtır.

1.2. Nükleer Reaksiyonlar

Çekirdek özelliklerini belirlemek için nükleer reaksiyonlar ve nükleer saçılmadan yararlanılır. Nükleonların enerjisini değiştiren reaksiyonlar, bağlanma ve uyarılma enerjilerini, enerji seviyelerinin kuantum sayıları ve seviyeler arasındaki geçiş oranlarını ölçmek için kullanılabilir. Parçacık hızlandırıcıları nükleer reaksiyonları yüklü parçacıkları (elektronlar, protonlar, alfalar veya "ağır iyonlar") hedef çekirdeğe çarpıtılarak üretir. Aynı zamanda nükleer reaksiyonlar doğada ve uzayda da üretilebilir. Nötron ışınları, yüklü bir parçacık ışınının, zayıf bağlı nötronları hedef çekirdekten koparmasıyla nükleer reaktörlerden elde edilir. Bu ışınlar ikincil ürünler olarak tanımlanırlar. Foton, mezon, müon ve nötrino gibi parçacıklar da nükleer reaksiyonlara sebep olabilirler. Bir nükleer

reaksiyonun gerçekleşmesi için, reaksiyondaki gelen parçacık içindeki nükleonların, hedef çekirdeğin nükleonlarıyla etkileşime girmesi gerekir.

Bu nedenle, protonlar arasındaki Coulomb engeli olarak adlandırılan elektromanyetik itmenin üstesinden gelmek için enerjinin yeterince yüksek olması gerekir. Enerji Coulomb engelini altındaysa, reaksiyon gerçekleşmeyecek çekirdekler saçılacaktır. Rutherford tarafından yapılan ilk deneylerde, hedef çekirdeklerin boyutunu ölçmek için doğal radyoaktif kaynaklardan üretilen düşük enerjili alfa parçacıkları kullanılmıştır.

Gelen parçacık ile hedef çekirdek çarpıştığında gelen demet parçacığı (beamparticle) esnek olarak hedef çekirdeği temel durumunda bırakır. Çekirdek içten uyarılır ve daha sonra ışımaya veya nükleon yaymak suretiyle bozunur. Gelen parçacık, hedef çekirdek ve reaksiyon ürünleri tanımlanarak bir nükleer reaksiyon tarif edilir. Örneğin, bir nötron; bir proton, 1_1H , ve bir karbon izotopu, ${}^{14}_6C$, üretmek için bir azot, ${}^{14}_7N$, çekirdeğine çarpıştığında, reaksiyon şöyle yazılır:



Bazen reaksiyon ${}^{14}_7N(n, p){}^{14}_6C$ olarak kısaltılır. Herhangi bir reaksiyon denkleminin bir dizi korunum koşulu uygulanır:

1. A kütlesi ve Z yükü, reaksiyon okunun her iki tarafında dengede olmalıdır.
2. Reaksiyondan önceki toplam enerji, reaksiyondan sonraki toplam enerjiye eşit olmalıdır. Toplam enerji, parçacık kinetik enerjileri artı parçacık durgun kütlelerinin enerji eşdeğeri, $E = mc^2$ 'yi içerir.
3. Reaksiyon öncesi ve sonrasında lineer momentum eşit olmalıdır. İki parçacık final durumu için bu, bir parçacığın momentumunun bir ölçümünün diğer parçacığın momentumunu belirlediği anlamına gelir.
4. Kuantum kuralları, nükleer seviyelerin açısal momentum, parite ve izospin dengelemesini yönetir.

Reaksiyon ürünlerinin açıları ve kinetik enerjileri (kinematik değişkenler) ölçülerek spesifik bir reaksiyon incelenir. Hedefin çevresinde her bir ürünün beklenen yükü ve enerjisi için parçacık ve radyasyon dedektörleri tasarlanmıştır.

Belirli bir kinematik değişken kümesi için en önemli ilgi alanı reaksiyon kesitidir. Kesit, belirli bir reaksiyonun meydana gelme ihtimalinin bir ölçüsüdür. Alan boyutuna sahip olan σ miktarı, deneysel oranla ölçülür.

$\sigma = \text{Yayılan reaksiyon parçacıklarının sayısı} / (\text{birim alandaki gelen demet parçacık sayısı})(\text{gelen demet içindeki hedef çekirdek sayısı})$

Kesit, çekirdeğin matematiksel bir modelinden kuantum mekaniği kurallarını uygulayarak da hesaplanabilir. Kesitlerin ölçülen ve hesaplanan değerlerinin birçok reaksiyon için karşılaştırılması, nükleer modelin varsayımlarını doğrulamaktadır.

Tablo 1.1., birçok nükleer reaksiyon türünü ve bize çekirdekler ve nükleer enerji hakkında ne öğrettiklerini göstermektedir.

Tablo 1.1. Nükleer reaksiyon çeşitleri

Reaksiyon	Ne Öğrenildi
Nükleon-nükleon saçılması:	Temel Nükleer Kuvvet
Çekirdeğin esnek saçılması:	Çekirdek boyut ve etkileşim potansiyeli
Uyarılmış durumlara esnek olmayan saçılma:	Enerji seviyesinin konumu ve kuantum sayıları
Süresizliğe esnek olmayan saçılma:	Dev rezonanslar (titreşim modları)
Transfer ve yok etme:	Tabaka Modelinin Detayları
Füzyon reaksiyonları:	Astrofiziksel işlemler
Fisyon reaksiyonları:	Sıvı damla modelinin özellikleri
Bileşik çekirdek oluşumu:	Çekirdeğin istatistiksel özellikleri
Multifragmentasyon:	Nükleer maddenin aşamaları
Pion reaksiyonları:	Nükleer “glue” incelenmesi
Elektronsaçılması:	Çekirdeklerin kuark yapısı

Bir proton hedefi üzerindeki protonların ve nötronların esnek saçılma kesitleri, nükleon-nükleonun yeniden oluşturulması için temel verileri verir. Tam bir nükleer yapı teorisi ve dinamiği, bu temel etkileşimle başlamalıdır.

Nükleer boyutların, şekillerin, bağlanma enerjilerinin ve diğer nükleer özelliklerin sistematiği, nükleer modellerin açıklamaya zorlandığı verilerdir. Tabaka Modeli, büyük nükleer veri kaynağını tutarlı bir nükleer yapı teorisi olarak birleştirmiştir. Bu verilerin

çoğu esnek ve esnek olmayan çekirdeklerin çizelgesinde bulunan çekirdeklerden elektronların, protonların ve nötronların saçılmasının sonucudur.

Yeterince yüksek uyarma enerjilerinde, bir çekirdek dev rezonanslar adı verilen bir dizi normal kolektif salınımdan geçebilir. Çekirdek, uyarma enerjisine katılan ve paylaşan tüm nükleonlarla farklı frekanslarda bir zil gibi çalar.

Füzyon reaksiyonları, daha büyük bir çekirdek oluşturmak için iki çekirdeğin birleşmesidir. Birçok füzyon reaksiyonu büyük miktarda enerji açığa çıkarır. Bir örnek, reaksiyon ürünlerinde helyum ve bir nötron artı büyük miktarda kinetik enerji oluşturmak için iki hidrojen izotopinin (trityum ve döteryum) birleştirilmesidir:



Bu reaksiyon potansiyel bir elektrik kaynağı gibidir. Füzyonun bir başka örneği Güneşe ve diğer düşük kütleli yıldızlara güç veren reaksiyon setidir:



Bu zincirden net enerji çıktısı oluşan her ${}^4\text{He}$ çekirdeği için 26.7MeV'dir.

Bileşik çekirdek oluşumu, iki çekirdeğin tek bir uyarılmış çekirdeğe birleştirildiği bir reaksiyondur. Uyarılmış çekirdek nispeten uzun bir süre yaşar ve nasıl oluştuğunu “unuttur”. Bu uyarma durumundan kaynaklanan bozunma, nükleonların, bileşik çekirdeğin ısıtılmış sıvı damlasından buharlaşması, gama bozunması veya bileşik çekirdeğinin fisyonu yoluyla olmaktadır. Bu süreç, karmaşık çekirdeklerin uyarılmış durumlarının ortalama özelliklerini anlatır.

Yüksek enerjili çekirdeklerin diğer çekirdeklerle çarpıştığı çoklu dağılma reaksiyonları, beklenmedik yoğunluk ve uyarma enerjisi koşullarında nükleer madde oluşturma yöntemidir.

Nükleonlar arasındaki temel kuvvet, π mezon (pion) değişimi ile ortaya çıkar. Bu parçacıklar, yüksek enerjili proton reaksiyonlarında oluşturulduğunda nükleer hedefleri bombardıman etmek için kullanılabilirler. Pion bir çekirdekle etkileşime girdiğinde bağlı nükleonlardan biriyle serbest bir nükleon üzerinde reaksiyon ile karşılaştırıldığında değiştirilen ve genişletilen bir rezonans oluşturur. Bu değişimler komşu nükleonlardan kaynaklanmaktadır [15,16].

1.2.1. Nükleer Reaksiyonların Enerjisi

$T(P, x)R$ reaksiyonunu düşünelim. Elektron bağlanma enerjilerini ihmal ederek, reaksiyondaki enerji dengesi için aşağıdaki ifadeye sahibiz.

$$m_p c^2 + T_p + m_T c^2 = m_R c^2 + T_R + m_x c^2 + T_x \quad (1.6)$$

T_i ; i. parçacığın kinetik enerjisi

m_i ; i. türlerin kütle enerjisidir. (R ve x'nin uyarılmış bir durumda oluşturulduğundan, m değerlerinin temel durum kütlelerinden farklı olabileceğine dikkat edilmeli.)

Reaksiyonun Q değeri, ürünün kütle enerjilerindeki ve reaktiflerdeki fark olarak tanımlanır.

$$Q = [m_p + m_T - (m_x + m_R)] c^2 = T_x + T_R - T_p \quad (1.7)$$

Q pozitifse, reaksiyonun ekzotermik, Q negatif ise reaksiyon endotermiktir.

Nükleer reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli bir durum şöyledir,

$$Q + T_p > 0 \quad (1.8)$$

Q nükleer reaksiyonlar için önemli bir niceliktir.

Hem ürünlerin hem de tepkenlerin kütleleri biliniyorsa, Q değeri kütle fazlalığı, Δ ;

$$Q = \Delta(\text{gelen}) + \Delta(\text{hedef}) - \sum \Delta(\text{ürünler}) \quad (1.9)$$

Q , bir nükleer reaksiyonda, reaksiyona giren ve çıkan parçacıkların kütlelerinin ya da kinetik enerjilerinin bilinmesiyle ölçülebilir. Bununla birlikte, momentumun korunmasını kullanarak, P nin hareket yönüne göre x 'in sadece T_x 'inin ve θ 'nin Q 'nun belirlenmesinde yeterli olduğunu gösterebiliriz [17].

1.3. Nükleer Reaksiyon Çeşitleri

İki atom çekirdeği çarpıştığında farklı reaksiyonlar meydana gelebilir. $A + a \rightarrow b + B$, $A + a$ gibi tipik reaksiyonlar için başlangıç veya giriş kanalı ve $b + B$ çıkış kanalı olarak bilinir. Nihai sonucun yapısına bağlı olarak, nükleer reaksiyon aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

1.3.1. Esnek Saçılma

Esnek saçılmada, etkileşimli parçacıkların kendine özgü durumları çarpışmadan önce ve sonra değişmeden kalır ($Q = 0$). Kinetik enerji, kütle sisteminin merkezinde saçılmadan önce ve sonra aynıdır. Bu, çarpışma parametresi açısından çevresel bir çarpışmadır. Bu kesitin ölçümü önemlidir, çünkü analizi optik potansiyel parametrelerini verir. Genellikle, bu kanal şu şekilde yazılabilir: $a + A \rightarrow A + a$

1.3.2. Esnek Olmayan Saçılma

Bu saçılma türünde, saçılmadan önce ve sonra etkileşimli olan tanecikler değişmeden kalır ancak etkileşimli parçacıkların herhangi biri veya her ikisi de, başlangıç kinetik enerjisinde bir $a + A \rightarrow A^* + a'$ azalmasıyla karşılıklı uyarım işlemi yoluyla uyarılabilir. Bu esnek olmayan saçılma için kesit, uyarılmış durumların nükleer dönüşü ve paritesi hakkında bilgi sağlar.

1.3.3. Toplama Reaksiyonları

Bu tür bir reaksiyonda; gelen parçacık, hedef çekirdeğin çevresinden geçerken hedef çekirdekten nükleonlar kazanır. Şematik resim aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1.1):



Şekil 1.1. Toplama reaksiyonunun şematik bir resmi

1.3.4. Sıyırma Reaksiyonları

Bu tür bir reaksiyonda; gelen parçacık, hedef çekirdeğin çevresinden geçerken nükleonları hedef çekirdeğe aktarır. Şematik resim aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1.2):

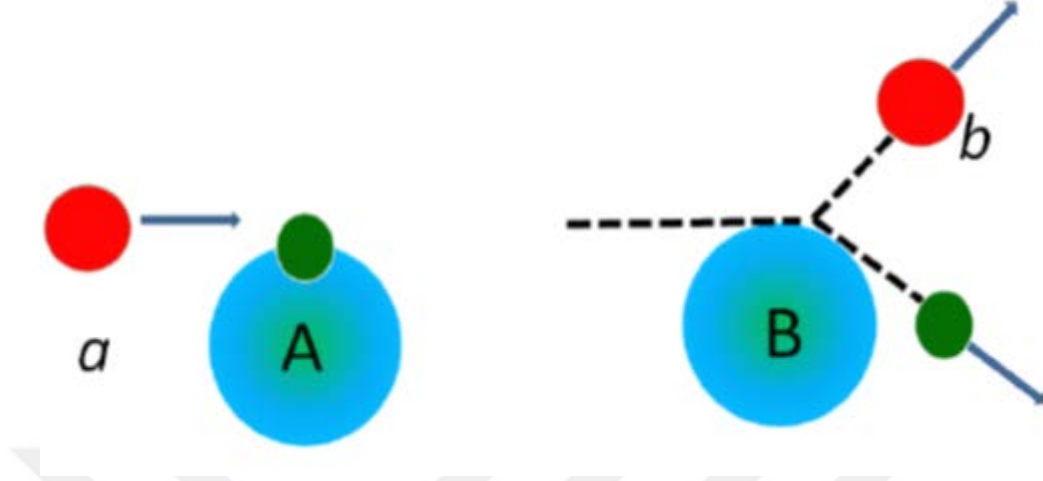


Şekil 1.2. Sıyırma reaksiyonunun şematik bir resmi

1.3.5. Nakavt Reaksiyonları

Bu tür reaksiyonlarda; bir çekirdek, hedef çekirdekten gelen parçacık tarafından dışarı atılır. Bu, son durumda üç parçacık üretecektir. Bu reaksiyonda gelen parçacık, hedef

nükleon veya hafif çekirdeği vurmadan önce serbest kalır, yarı- esnek olmayan saçılma olarak da bilinir (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Nakavt reaksiyonunun şematik bir resmi

Doğrudan etkileşim sürecinde iki çekirdek sadece bir bakış açısına temas eder. Bu nedenle, bu tür reaksiyonlar çevresel reaksiyonlar olarak da bilinir. Bu tür reaksiyonlarda, nükleer parçacıkların, nükleer kabukta mevcut olan diğer nükleonları rahatsız etmeden hedef çekirdeğe girdiği veya ayrıldığı varsayılmaktadır. Bu tür reaksiyonların zaman aralığı $\approx 10^{-22}$ sn'dir. Doğrudan reaksiyonlar, orta duruma geçmeden başlangıçtan son bölüme ilerleyebilir. Doğrudan tepkimeler hedef çekirdeğin temel durumu ile bir zemin veya bir artık çekirdeğin belirli bir uyarılmış hali arasında ilişki ile ilgili bilgi sağlamada çok uygundur (örtüşme).

1.3.6. Bileşik Nükleer Reaksiyonlar

İki çekirdek arasındaki çarpışma süreci, çok yüksek açısal momentum ve uyarma enerjisi olan bileşik çekirdeğin oluşumuna yol açabilir $E^* = E_{c.m.} + Q$ uyarma enerjisi olan bileşik çekirdeğin oluşumuna yol açabilir. Bileşik çekirdek durumu, enerji bileşik çekirdeği oluşturan tüm nükleonlar arasında eşit olarak paylaşılana kadar devam eder. Bu bileşik çekirdeğin tipik ömrü $\approx 10^{-16}$ sn. Elde edilen bileşik çekirdek, protonlar, nötronlar, α parçacıkları, γ ışınları gibi parçacıklar yayarak ve çok ağır bileşik çekirdekler için farklı şekillerde kaybedebilecekleri çok yüksek uyarma enerjisi ve geniş açısal momentum

aralığı taşır. Şekil 1-4'te gösterildiği gibi iki orta kütleli çekirdeklere ayrılır. Çekirdeği bir sıvı damlası olarak kabul ederek bu teoriyi görselleştirmek yardımcı olur. Bileşik damla, yüksek uyarma enerjisinde ve bileşenlerinin bir veya daha fazlasının buharlaşması ile yüksek sıcaklıkta bozunur veya bir veya daha fazla bileşen parçacığının buharlaşması ile soğur.



Şekil 1.4. Bir bileşik çekirdeğin oluşumu ve bozunması

Klasik olarak, gelen parçacık ve hedef çekirdeklerin kimliği azalmadıkça bu çekirdekler klasik yörüngelerde taşınır olarak kabul edilebilir. Çarpışma parametresi b veya karşılık gelen açısal momentum l göz önüne alındığında, üç farklı reaksiyon türü sınıflandırılabilir. Örneğin,

(i) Grazing çarpışması ($b \approx b_{gr}$): Grazing etkisi parametresi, Grazing yörüngesinin çekirdekler arasında hatırı sayılır miktarda nükleer etkileşime yol açan etki parametresi olarak tanımlanabilir. Bu etki parametresinde nükleer etkileşim doğada küçüktür. Bu etki parametresinde doğrudan reaksiyonlar ortaya çıkabilir.

(ii) Uzak çarpışma ($b > b_{gr}$): Bu çarpışmalar tamamen Coulomb alanıyla belirlenir. Bu, çekirdekler arasındaki karşılıklı Coulomb etkileşiminin neden olduğu uyarmalara yol açabilir.

(iii) Yakın çarpışma ($b < b_{gr}$): Bu çarpışma türü, daha küçük grazing etkisi parametresi (b_{gr}) için meydana gelir, burada gelen parçacığın ve hedefin kuvvetli şekilde bozunmasına karşı güçlü karşılıklı nükleer etkileşim meydana gelebilir. Bu, bileşik

çekirdeği (CN) oluşturabilir veya dağıtıcı çarpışma da olabilir. Klasik saçılma olayları dağıtıcı çarpışmalarda da önemlidir. [4,18].

1.4. Nükleer Yapı ve Modeller

Nükleer sistemin bileşenlerini bilmek güzel bir başlangıç olsa da, etkileşimlerini ve oluşturdukları yapıları araştırmak bir sonraki mantıklı adımdır. Tepkimeler ve bozunmalar tek nükleer yapı problemlerimiz olduğundan, model inşası her zaman çok merkezi bir rol oynamıştır.

Nükleer sistemi modellemeye yönelik ilk girişimlerden biri, nötronun keşfedilmesinden kısa bir süre sonra Niels Bohr tarafından yapıldı. Deneysel olarak, bazı reaksiyonlarda yayılan parçacığın yayılmasının çok daha uzun sürdüğü, ardından gelen parçacığın çekirdeğin hacmini geçmesi için geçen zamanın alınması gerektiği daha uzun sürdü. Bir şey reaksiyonu geciktiriyordu ve Bohr şimdiki ünlü bileşik çekirdeği fikrini önerdi [18]. Buradaki fikir, A ve b çekirdekleri arasındaki reaksiyonun, D ve e parçacıklarının emisyonundan önce bir ara C adımına sahip olmasıdır.

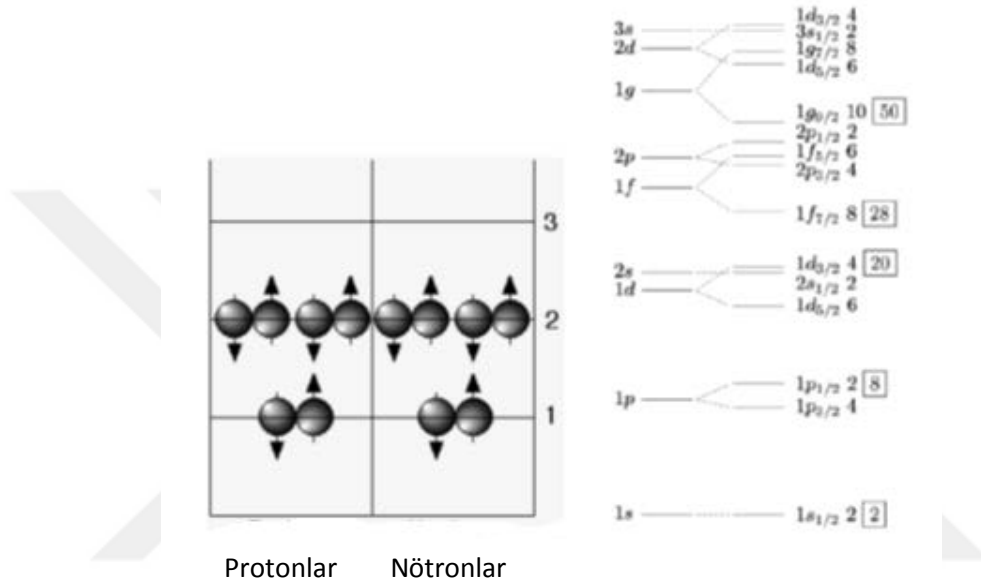


Ara aşamada, gelen parçacığın enerjisi çekirdekteki tüm parçacıklar arasında dağıtılarak, durumun nasıl yaratıldığına dair herhangi bir bilgiyi yok eder. Daha sonra enerji, tesadüfen, tek bir nükleon (veya alfa parçacığı) üzerinde sona erer ve bu daha sonra yayılır. Belki de şaşırtıcı bir şekilde bu model çok başarılıydı ve bugüne dek hala doğrudan reaksiyonlar ve bileşik reaksiyonlar gibi hızlı reaksiyonlardan bahsediyoruz.

Bileşik çekirdeklerden, 1949'da Mayer ve Jensen tarafından gerçekleştirilen nükleer kabuk modeli olan nükleer modellerde bir sonraki önemli gelişmeye atlıyoruz. Atom elektronlarının kabuk modeli gibi, nükleer kabuk modelinin de bir ortalama alanlı model olduğunu belirtmekte fayda var. Yani, bir tek nükleon tarafından hissedilen gücün diğer nükleonların bütün özelliklerinden bağımsız olduğu varsayılmaktadır.

Elektronlar gibi, protonlar ve nötronlar fermiyonlardır ve elektronik kabuk modeli gibi nükleer kabuk modeli de dışarlama ilkesine dayanır. Belirli bir tipteki her parçacık, nükleonları daha yüksek enerji durumlarına zorlayan benzersiz bir kuantum sayısı setine

sahip olmalıdır. Protonlar ve nötronlar iki farklı parçacık olduğundan, her biri kendi kabuk yapısına sahiptir ve Şekil 1.5.' de görülen klasik resme yol açar. Burada, ^{12}C 'ye karşılık gelen altı proton ve altı nötron görüyoruz, iki parçacık, her bir dönüşten biri, birinci seviyede $s_{1/2}$ ikinci kabuk, $p_{3/2}$, dört nükleona uyuyor ve şema devam ediyor benzer şekilde.



Şekil 1.5. Kabuk modelinin ve sihirli sayıların gösterimi

Kabuk modeli, nükleer uyarma enerjilerini ve bu uyardımların spin kuantum sayılarını ve çekirdeğin bağlayıcı enerjisini, yani bir proton veya bir nötronu çekirdekten çıkarmak için harcadığı enerji miktarını açıklamada çok başarılıdır. Kabukların tam dağılımı, şeklin sağ tarafında görülebilir. Solda temel parçacıklar vardır ve sağda alt seviyelerin farklı gruplara ayrılması görülür. Bu bölünme, yörüngesel açısal momentum ile etkileşime giren tek tek nükleer spinlerin dönüşünden kaynaklanır ve şekilde de işaretlenmiş olan bir dizi sihirli sayıya veya kabuk boşluklarına yol açar. Enerji seviyesindeki bir sonraki seviyeye olan uzaklık sihir seviyeleri için göreceli olarak daha büyük olduğundan, bir veya her iki kabuğun içinde sihirli sayıdaki nükleonlara sahip olan çekirdekler sıkı bir şekilde bağlanmıştır ve bu nedenle komşu çekirdeklerden nispeten daha karardır. Bu, atom fiziğindeki asal gazlara benzer.

Kabuk modeli ile (d, p) belirli bir nötron kabuğuna bir nötron eklerken, (p, d) tipinde bir reaksiyon bir nötronun kabuğundan basitçe uzaklaştırılmasına karşılık gelen direkt reaksiyonları g6rebiliriz. Kabuk modeli her bir n6kleonu bağımsız bir par7acık olarak ele alırken ve reaksiyon verilerini 7ok g6zel bir şekilde a7ıklarken, kolektif modeller n6kleer yapının diğer y6nlerini tarif etmede b6y6k başarı elde etti. G67l6 bir n6kleer kuvvetin 7ok kısa bir menzile sahip olduğu g6zlemine dayanılarak bir kolektif model inşa edildi, bu modele g6re bir n6kleon yalnızca en yakın komşularıyla etkileşime girecekti. Bu, sıvılarda g6r6len 6zelliklere benzediğinden n6kleer davranışta da sıvı damlası modeli 6nerilmiştir.

Sıvı damlası modelinde yapılan değişiklikler, 7ekirdeğin deformasyonunun a7ıklamasında başarılı olmuştur. Bir sıvı damlası gibi, 7ekirdek deforme olabilir ve daha sonra d6nd6r6lebilir. N6kleer deformasyon ve d6nme teorisi, 1975 yılında Aage Bohr ve Ben Mottelson' un Nobel 6d6l6 almasına yol a7tı [19].

2. AĞIR İYON REAKSİYONLARI

Ağır iyon kaynaklı reaksiyonlar genellikle bir alfa parçacığından daha ağır olan gelen parçacıklar tarafından tetiklenen reaksiyonlar olarak ele alınır. İncelenen gelen parçacıkların aralığı, hafif iyonlar C, O, Ne'den orta kuvvetli iyonlara, S, Ar, Ca, Kr gibi ağır parçacıklar, Xe, Au ve hatta U ya kadardır. Ağır iyonların neden olduğu reaksiyonlar, onları diğer reaksiyonlardan ayıran bazı benzersiz özelliklere sahiptir. Bir ağır iyonun 5 MeV / nükleon veya daha fazla enerjideki dalga boyu, iyonun boyutlarına göre küçüktür. Sonuç olarak, bu iyonların etkileşimleri klasik olarak tarif edilebilir. Bu çarpışmalardaki

açısız momentumun değeri nispeten büyüktür. Örneğin; $\ell_{\max} = \frac{R}{\lambda} \left(1 - \frac{B}{E}\right)^{1/2}$ bağıntısını

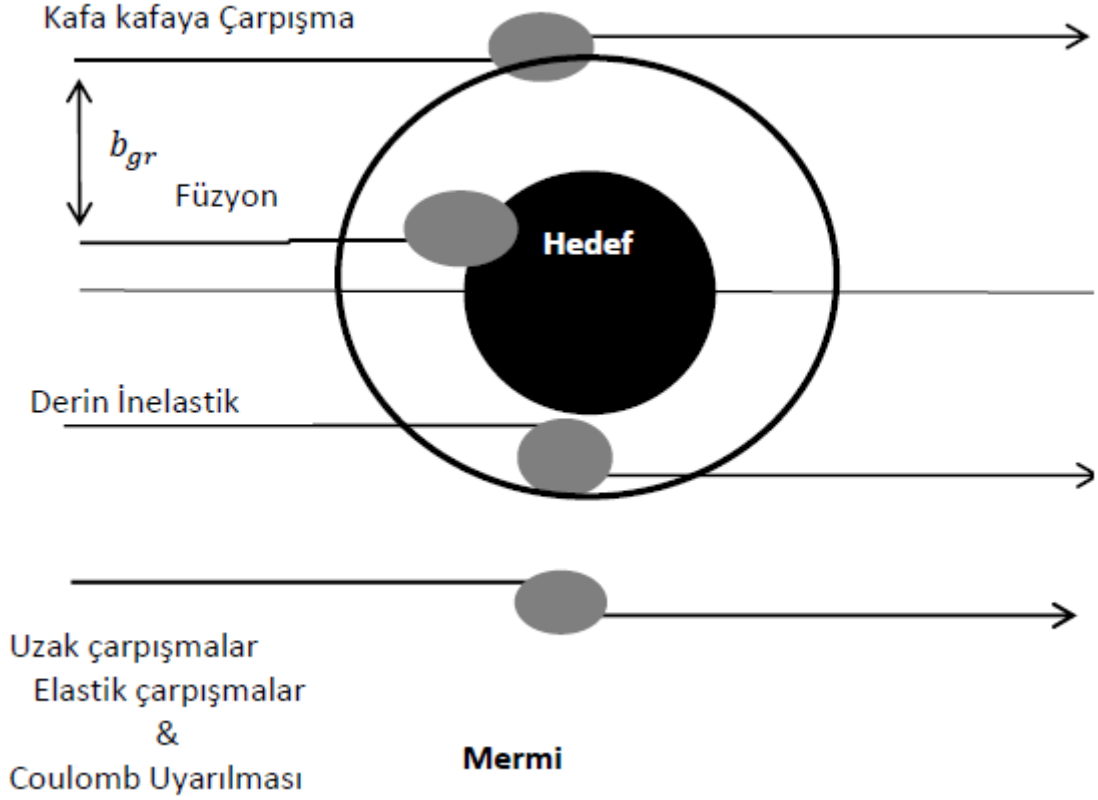
kullanarak; 226Mev de $^{40}\text{Ar} + ^{165}\text{Ho}$ için $\ell_{\max} = 1630$ sonucunu elde ederiz.

Bu değer nükleonun neden olduğu reaksiyonlarda yer alan açısız momentuma kıyasla nispeten büyüktür. Son olarak, çoğu zaman gelen parçacık ve hedefin atom sayılarının ürünü oldukça büyüktür ve bu çarpışmalarda etkili olan Coulomb kuvvetlerinin varlığına işaret eder.

Ağır iyon kaynaklı reaksiyonların incelenmesi, nükleer araştırmaların ön planda olduğu bir bölgedir. Olağandışı nükleer türler yapmak için ağır iyon kaynaklı reaksiyonlar kullanılarak, nükleer yapı ve dinamiklerin 'sınırlarında' çeşitli yönlerini keşfedilebilir ve böylece daha derin bir kavrayış elde edilebilir. Bir başka büyük dürtü, çarpışan çekirdeklerin dinamiklerini ve termodinamiğini incelemektir [17].

Ağır iyon kaynaklı reaksiyonlarda, iki ağır çekirdek birbirine yaklaştığında, aralarında uzun menzilli bir Coulomb itme kuvveti ve kısa menzilli çekici bir nükleer kuvvet devreye girer. Bu iki kuvvet hem itici hem de çekici kuvvetin birbiriyle dengelendiği ve engelin Coulomb engel olarak adlandırıldığı bir engeldir. İki ağır çekirdeğin nispi hareket enerjisi, çekirdeklerin kaynaşması veya yakalanması için Coulomb engelini üstesinden gelmek için yeterli olmalıdır. Kütle, enerji, açısız momentum vb. gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak çeşitli nükleer reaksiyonlar meydana gelebilir. Klasik resme göre, etki parametresinin (b) boyutuna bağlı olarak, Şekil 2.1. 'de gösterildiği gibi farklı tiplerde nükleer reaksiyonlar ortaya çıkabilir. Etki parametresi (b), kuvvet merkezi

ile gelen parçacığın olay yönü arasındaki dikey mesafe olarak tanımlanır. Ağır iyon çarpışmalarında, klasik resim kavramı ilişkili de Broglie dalga boyu nükleer yarıçaptan çok daha küçük olduğu için geçerlidir.



Şekil 2.1. Etki parametresinin bir fonksiyonu olarak ağır iyon çarpışmalarında gözlenen farklı işlemler

Etki parametresi çok büyükse (yani uzak çarpışmada), bu da engel enerjilerinin altındadır ve reaksiyon, Coulomb uyarma eşliğinde Rutherford saçılması ile sonuçlanır. Etki parametresi düştüğünde ($b \approx b_{gr}$ (grazing çarpışması)) etkileşimli çekirdekler nükleer esnek olmayan saçılma ve nükleon transferi gibi işlemlerin gerçekleştiği nükleer etkileşimi hissetmeye başlar. Etki parametresi daha da azalır ($b < b_{gr}$), nükleer etkileşim Coulomb itmesinin üstesinden gelir ve çarpışma çekirdeklerinin nispi kinetik enerjisi, iki çekirdek hedef ve gelen benzeri sistemlere ayrılmadan önce iç uyarıma dönüştürülür. Bu tür işlemler derin esnek olmayan çarpışmalar (DIC) olarak bilinir. Son olarak, merkezi çarpışmalar, iki çekirdeğin kaynağını, nükleon ve etkileşimli çekirdeğin toplamına eşit yük sayısına sahip başka bir çekirdeği oluşturmak üzere sonuçlandırır. Bu bileşik sistem, birleşik çekirdek

oluşturmak için her serbestlik derecesinde dengeye gelebilir. Birleşik çekirdek, giriş kanalının tüm hafızasını kaybeder. Bir birleşik çekirdek oluşumundan sonra, bu birleşik çekirdek başlangıçta uyarma enerjisinden dolayı oldukça yüksek uyarılmış durumdadır. Bu yüksek uyarılmış birleşik çekirdek için baskın bozunma veya parçalanma kanalları [20,21] parçacık emisyonu (n, p) veya fisyon ve gama ışını emisyonudur. Bu parçacık emisyonu çoğu zaman parçacık buharlaşması olarak adlandırılır ve bozunma modu buharlaşma kalıntısı (ER) olarak adlandırılan bir çekirdeğe yol açar. Fisyon, yüksek enerjilerde ve açısız momentumda en baskın bozunma kanalı olur. Açısız momentumdaki artış ile merkezkaç potansiyeli engel yüksekliğini artırır ve potansiyel paketinin derinliğini azaltır. Sonuç olarak açısız momentumun keskin kritik değerinden sonra(kritik açısız momentum) enerji paketi kaybolur. Kritik açısız momentumda, yakalamadan sonraki sistem tüm serbestlik derecesini dengelemeden hemen önce yeniden ayrılır. Bu şekilde, açısız momentum, bileşik olmayan çekirdek işlemlerine ve diğer esnek olmayan işlemlere neden olacak şekilde daha da artar.

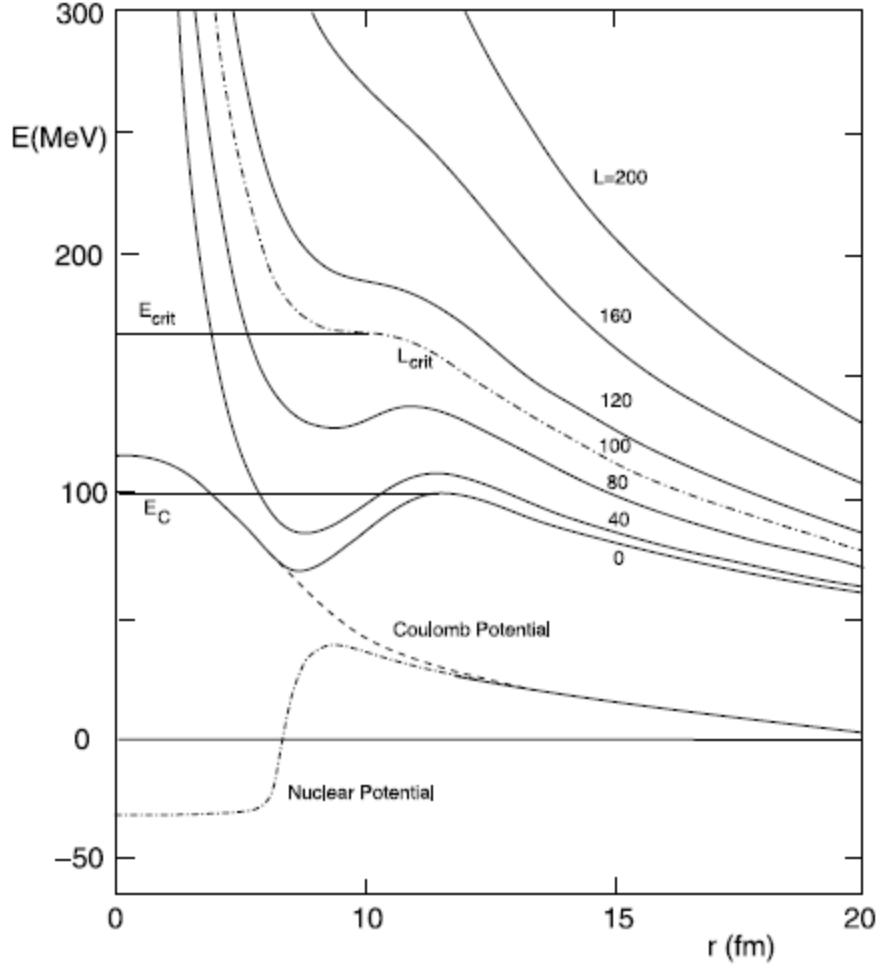
2.1. Ağır-İyon Etkileşmelerinin Genel Özellikleri

Protonlar ve çekirdekler arasındaki reaksiyonların aksine, ağır çekirdekler arasındaki etkileşimler, güçlü emilim ile karakterize edilir, yani reaksiyonlar, ağırlıklı olarak nükleer yüzeylerde veya yakınında meydana gelir. Bu anlamda, gelen parçacık olarak α parçacığı zaten güçlü emilim gösterdiğinden, çekirdeklerin $A \geq 4$ ile diğer çekirdeklerle reaksiyonları ağır-iyon reaksiyonları olarak kabul edilir. Ağır-iyon reaksiyonlarının teorik açıklaması birçok bakımdan zordur. Öte yandan, ağır-iyon reaksiyonları nükleer fizikte birçok faydalı uygulamaya sahiptir.

Ağır-iyon etkileşmelerinin özelliklerini şöyle sıralayabiliriz:

1. Reaksiyon kanallarının sayısı genellikle çok fazladır.
2. Açıklama çoğunlukla yaklaşık reaksiyon modelleriyle sınırlıdır.
3. Bir çok nihai kanal ağır-iyon (HI) reaksiyonlarını füzyon buharlaşma reaksiyonları ile nükleer spektroskopi için birçok farklı nihai çekirdeğe ve bunların uyarılmış durumlarına ulaşmak için çok yönlü bir araç haline getirir.
4. Büyük atom sayısı Z ve yüksek ağır-iyon elektrik alanları, yakın mesafedeki esnek saçılma sırasında hedef çekirdekleri uyarmak için yaygın olarak kullanılır (Coulomb Uyarılması).

5. Ağır-iyon reaksiyonlarının uygulanması için önemli bir alan, periyodik tablonun mümkün olduğu kadar uzağa (şu anda $Z = 118$ 'e kadar) hızlı fisyon ile rekabet halinde, çok ağır çekirdeklerin füzyonu ile genişletilmesidir.



Şekil 2.2. İki ağır iyon arasındaki etkileşim potansiyeli

Şekil 2.2.' de gösterildiği gibi, iki ağır iyon arasındaki etkileşim potansiyeli üç bölümden oluşur;

1. Düşük enerjilerde, yani daha büyük mesafelerde (büyük etki parametresi, ileri saçılma) güçlü bir Coulomb potansiyeli ile esnek saçılma baskındır. Coulomb altı saçılması, spektroskopide çekirdeklerin uyarılması için önemli bir araçtır (Coulomb uyarma). Saçılma, merkezi kısmı genellikle oldukça sıg bir potansiyel olan optik model ile tanımlanır (nükleon-çekirdek potansiyelleri ile karşılaştırıldığında).

2. Yüksek enerjilerde, merkezi potansiyeli V çok yüksek seviyelere ulaşabilir bu nedenle değerler (klasik olarak) çekirdeğin füzyonunu engellemekle kalmaz, aynı zamanda rotasyonel kırılmaya neden olabilecek bir merkezi engel oluşturur.
3. Coulomb engeli, elektron yakalamanın bileşik sistemlere füzyonunun üstündeki orta enerjilerde (ve küçük etki parametrelerinde geriye saçılma) mümkündür. Yüksek uyarılmış bileşik çekirdeğin daha sonra buharlaştırılması, nihai çekirdeklerin özelliklerinin incelenmesi için tercih edilen bir yöntemdir. Burada çekirdek (hadronic) etkileşimi, çekirdekler yeterince üst üste geldiğinde önemlidir [22].

2.1.1. Diğer Ağır-İyon Reaksiyon Modelleri

Hafif iyonlarda olduğu gibi, ağır iyonlar, doğrudan ve tam füzyonlu bileşik-çekirdek reaksiyonlarının sınırlayıcı durumlarıyla reaksiyon sürelerine göre sınıflandırılabilir. Model açıklamaları tarafından yapılan değişikliklerle benzerlik gösterir.

1. olası çıkış kanallarının sayısı
2. yüksek uyarma enerjisi ve
3. yüksek açısal momentum

Sonuç olarak, açıklama için örneğin bozulmuş dalga born (DWBA) yaklaşımı yerine çiftlenmiş kanallar ile genellikle gereklidir. Gerçek bileşik sistemler için tüm termodinamik denge, genellikle denge öncesi veya tamamlanmamış füzyon gibi etkilerle elde edilemez. İlgili reaksiyon mekanizması derin esnek olmayan saçılmadır. Giden-parçacık spektrumlarında, birleşik çekirdek kütlelerinden daha küçük parçacık kütlelerinde bulunur. Moleküler rezonanslar ayrıca tam füzyonunu önleyen yüksek açısal momentumlu sistemlerin bir sonucudur. Öte yandan, çok sayıda çıkış kanalı, yüksek uyarma enerjileri ve açısal momentum ağır iyon füzyon-buharlaştırma reaksiyonlarını, özellikle yüksek spin durumlarında, nükleer spektroskopi için neredeyse ideal bir araç haline getirmektedir [22].

2.2. Coulomb Uyarılması

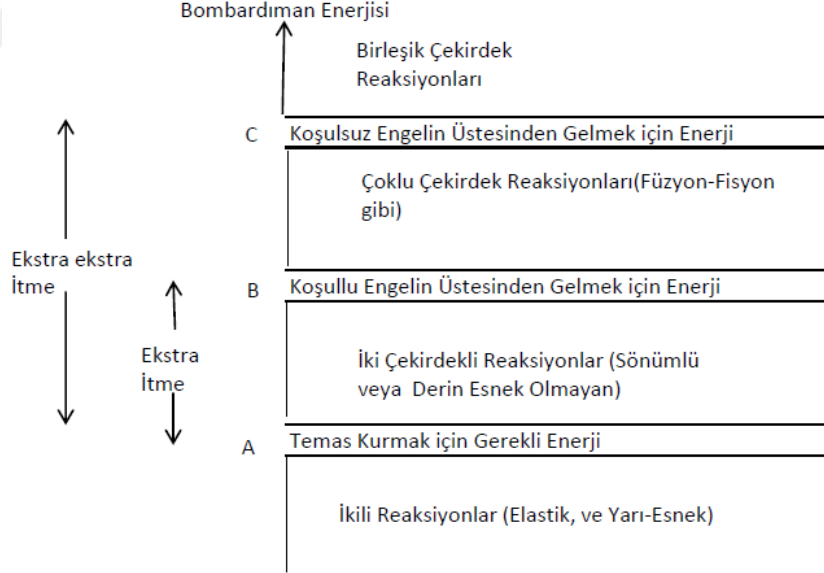
Bir ağır iyon ve bir çekirdek arasındaki Coulomb etkileşimi nedeniyle potansiyel enerji aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$E_c = \left(Z_1 Z_2 e^2 / R \right) \approx 1.2 \left(Z_1 Z_2 / A^{1/3} \right) \text{MeV} \quad (2.1)$$

Gelen parçacık ve hedef çekirdek arasındaki güçlü, uzun menzilli elektrik alanı nedeniyle gelen ağır iyonun elektromanyetik olarak hedef çekirdeği uyarması mümkündür. Bu Coulomb uyarılması olarak adlandırılır. Deforme olmuş hedef çekirdekteki dönme bantları, dipol fotonların emilimi ile uyarılmış hale gelebilirler. Bu teknik, bu tür çekirdeklerin yapısını incelemek için kullanışlıdır. Bu reaksiyonlar için tesir kesitleri çok büyük olduğundan (çekirdekle uzun mesafeli etkileşimleri içerir), özellikle yoğunluğun düşük olduğu radyoaktif yapılı egzotik çekirdeklerin yapısını incelerken kullanım için uygundur [17].

2.3. Füzyon Reaksiyonları

Şekilde, reaksiyonları indüklemek için gereken enerji açısından çeşitli reaksiyon mekanizmaları arasındaki farkın başka bir sunumunu gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Üç kritik enerjinin ve dört tip ağır iyon nükleer reaksiyonunun şematik gösterimi

İyonları temas ettirmek ve etkileşim kurabilmek için gereken enerjiye sahipsek, $V(R_{\text{int}})$ etkileşim engeli olmak üzere, reaksiyon tesir kesiti, bu etkileşim engeli açısından aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$\sigma_R = \pi R_{\text{int}}^2 \left[1 - \frac{V(R_{\text{int}})}{E_{\text{cm}}} \right] \quad (2.2)$$

etkileşim yarıçapı;

$$R_{\text{int}} = R_1 + R_2 + 3.2 \text{ fm} \quad (2.3)$$

i. çekirdeğin yarıçapı;

$$R_i = 1.12 A_i^{1/3} - 0.94 A_i^{-1/3} \text{ fm} \quad (2.4)$$

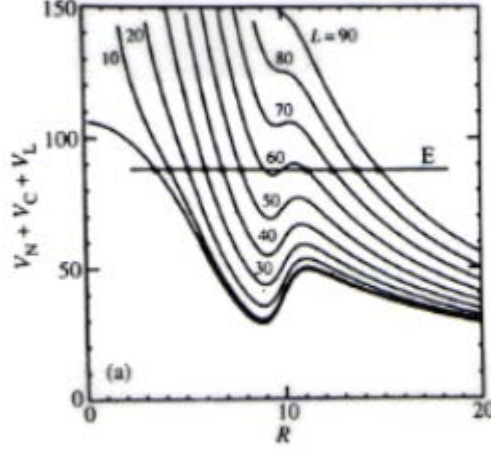
ve etkileşim engeli;

$$V(R_{\text{int}}) = 1.424 \frac{Z_1 Z_2}{R_{\text{int}}} - b \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.5)$$

olarak verilir burada b yaklaşık olarak 1 MeV/fm olarak kabul edilmektedir.

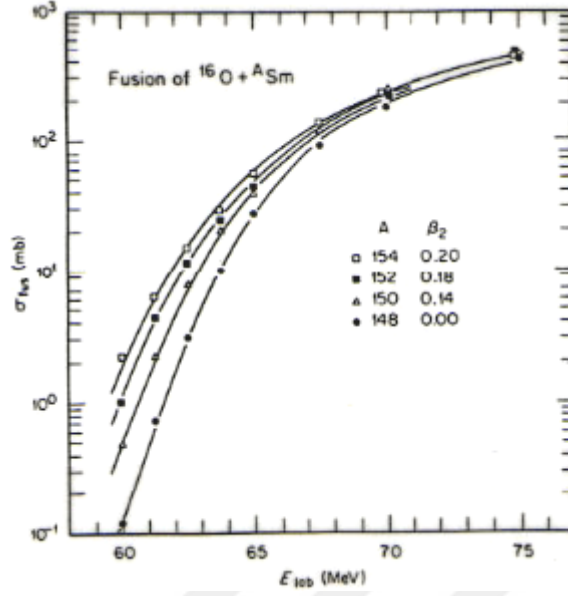
İyonların füzyonuna neden olmak üzere iç içe geçmesini sağlamak için gerekli enerjiye ekstra itme enerjisi denir. İyonların gerçekten kaynaşmasına ve oluşum şekillerini unutmamasına neden olmak için gereken enerji, ekstra-ekstra itme enerjisi olarak adlandırılır.

Füzyon olasılığı, çarpışan iyonların atom sayılarının ürününün hassas bir fonksiyonudur. İyonlar arasındaki Coulomb kuvveti arttıkça füzyon kesitinin ani düşüşü, derin esnek olmayan reaksiyon mekanizmasının ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Bu ve füzyon kesitinin diğer özellikleri, çarpışan iyonlar arasındaki potansiyel açısından açıklanabilir. Bu potansiyel, üç katkıdan, Coulomb potansiyeli, nükleer potansiyel ve merkezkaç potansiyelinden oluşur. Bu potansiyelin açısal momentumun (l) bir fonksiyonu olarak değişimi, Şekil 2.4.' te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Orbital açısal momentumun çeşitli değerleri için radyal mesafenin bir fonksiyonu olarak $^{16}\text{O}+^{120}\text{Sn}$ için nükleer, Coulomb ve merkezi potansiyelinin toplamı.

Açısal momentumun küçük değerlerinde, potansiyelde bir cep olduğuna dikkat edilmelidir. İyonlar, bu cepte tutulduğunda füzyon oluşur. Sıkışmazlarsa birleşme yapmazlar. Coulomb potansiyelinin yüksek değerleri ile l ' nin herhangi bir değeri için potansiyelde az miktarda cep vardır veya hiç cep yoktur, böylece hiçbir füzyon olayı gerçekleşmez. Belirli bir gelen parçacık enerjisi ve Coulomb potansiyeli için, potansiyelde cebi olmayan (açısal momentumun kritik değeri) ve dolayısıyla füzyon olayı olmayan açısal momentum değerleri vardır. Yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi, nükleer, Coulomb ve merkezi potansiyelinin toplamı olan füzyona l -bağımlı bir engel vardır. Bu engel aynı zamanda çarpışan iyonların nispi deformasyonunun ve oryantasyonunun hassas bir fonksiyonudur. Şekil 2.5.' te ^{16}O nun çeşitli Sm izotopları ile füzyonu için uyarma fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.5. $^{16}\text{O}+\text{Sm}$ için füzyon tesir kesitleri

^{16}O iyonunun yakın küresel ^{148}Sm 'ye kıyasla deforme ^{154}Sm ile etkileşime girdiği durum için kayda değer bir düşük gerilimli ve geliştirilmiş bir tesir kesiti gözlemlenir. Bu gelişme, iyonların potansiyel olarak daha düşük bir Coluomb bileşeni ile sonuçlanan daha büyük bir R değerinde temas edeceği gerçeğinden dolayı, deforme çekirdek ile çarpışma için füzyon engelini azaltılmasının sonucudur [17].

2.4. Ağır İyon Füzyon Reaksiyonları

Füzyon, ağır iyon çarpışmalarında baskın olan mekanizmadır. Füzyon, iki ayrı çekirdeğin bileşik çekirdek adı verilen bir bileşik sistem oluşturmak üzere kaynaştığı bir reaksiyon olarak tanımlanır. Bir füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için, etkileşimli çekirdekler arasındaki nispi hareket uzun mesafeli Coulomb itme kuvveti ve kısa menzilli nükleer çekici kuvveti arasındaki güçlü iptal ile oluşturulan Coulomb engelini üstesinden gelmek zorundadır. Bu nedenle, iki çekirdek Coulomb engeli içinden geçerek veya kuantum mekanik tünelleme yoluyla füzyona uğrayacaktır [23,24]. Ağır iyon füzyon reaksiyonlarında çekirdekler oldukça uyarılmış formdadır. Oluşumdaki uyarma enerjisi esas olarak kinetik enerji ve reaksiyon Q değeri ile belirlenir; açıl momentum dağılımı füzyona katkıda bulunan etki parametreleri (b) aralığı ile üretilir. Açıl momentum dağılımı ve uyarma enerjisinden ayrı olarak, bozunma modu istatistiksel modele göre

yönetilir ve oluşum sürecinden bağımsızdır. Böylece, bileşik çekirdek nükleer buharlaşma ya da fisyonu maruz kalması ile bozunabilir. Buharlaşma artıkları fisyonun ihmal edilebildiği durumlarda füzyonun meydana geldiğine dair bir kanıt niteliğindedir [25]. Coulomb engelinin altındaki olay enerjisinde füzyon klasik olarak yasaktır (füzyonun gerçekleşmesi beklenmeyen durumlarda). Bununla birlikte, füzyon tesir kesitleri, kuantum mekaniksel engel penetrasyonuna bağlı olan engel altı enerjilerinde gözlenmiştir (bu tek boyutlu engel penetrasyon modeli (1-DBPM) olarak bilinir). 1-DBPM, hafif çekirdeklerin neden olduğu düşük enerji füzyon tesir kesit reaksiyonunu başarıyla açıklayabilir [26]. $Z_T Z_P \geq 1500$ [27] ile durgun çekirdeklerin füzyon mekanizması (Z_T, Z_P sırasıyla atomik hedef ve gelen parçacık sayısıdır) hala iyi anlaşılabilir durumdadır, bu nedenle sistemlerde füzyon engel olarak adlandırılır. Bu sistemler, beklenen engelin üstündeki bombardıman enerjilerinde bile füzyona uğramaz. Bunun için engel yüksekliğine ek olarak ekstra bir enerji verilmesi gerekmektedir.

2.5. Coulomb Engeli Boyunca Füzyon

Atom çekirdeğinin füzyonu, doğadaki en çarpıcı süreçlerden biridir. Toplam etkileşim potansiyeli merkezkaç terimi, uzun menzilli Coulomb itme kuvveti ve kısa menzilli nükleer çekici kuvveti toplamıdır. Gelen parçacık ve hedef arasındaki toplam etkileşim potansiyeli şöyle yazılabilir;

$$V = V_c(r) + V_N(r) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} \quad (2.6)$$

Burada, r gelen parçacık ile hedefin merkezleri arasındaki mesafe, l açısal momentum kuantum sayısı ve μ sistemin indirgenmiş kütesidir. $V_c(r)$ ve $V_N(r)$ sırasıyla Coulomb ve nükleer potansiyellerdir. Engel $l = 0$ ' a karşılık gelen Coulomb engeli olarak adlandırılır.

Gelen parçacık büyüklüğünün hedef yarıçapından daha küçük olduğunu varsayarak, r_c , Coulomb potansiyeli $V_c(r)$ ilişkisiyle yaklaştırılabilir,

$$V_c = \left\{ \begin{array}{l} \frac{Z_p Z_T e^2}{2r_c} \left(3 - \frac{r^2}{r_c^2} \right) \rightarrow r \leq r_c \\ \frac{Z_p Z_T e^2}{r} \rightarrow r > r_c \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Z_T, Z_p sırasıyla gelen parçacığın ve hedefin atom numaralarıdır.

Klasik resimde, gelen parçacık hedefle etkileşime girerek ya hedeften esnek olarak dağılmış olabilir ya da füzyona maruz kalabilir. Belirli bir kütle enerjisi E merkezinde kısmi tesir kesiti [28],

$$\sigma_l = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} (2l+1) T_l(E) \quad (2.8)$$

şeklinde verilir. Burada; μ sistemin indirgenmiş kütlesi ve $T_l(E)$ iletim katsayısıdır. Toplam reaksiyon kesitinin bir parçası olan kısmi füzyon kesiti aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_l^{fus} = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} (2l+1) T_l(E) P_l(E) \quad (2.9)$$

burada $P_l(E)$ sistemin Coulomb engelini geçtikten sonra füzyon kanalına geçme olasılığıdır. Tüm füzyon tesir kesiti, tüm kısmi dalgalar üzerinde toplanarak elde edilir,

$$\sigma_l^{fus} = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l(E) P_l(E) \quad (2.10)$$

Keskin kesme modeline göre füzyona katkı yapan geçiş olasılığı;

$$T_l = 1 - |S_l|^2 \quad (2.11)$$

$$T_l = \begin{cases} 0; l \gg l_{gr} \\ 1; l \ll l_{gr} \end{cases} \quad (2.12)$$

l_{gr} ; grazing açısal momentumudur.

Esnek saçılma durumunda S fonksiyonu, yansıma ile ilgili olan S_l 'dir. Böylece füzyon tesir kesiti;

$$\sigma_F(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l \quad (2.13)$$

olur. Burada k dalga sayısıdır. Eğer $l \gg 1$ (klasik limit) ise, Denk. (1.16) aşağıdaki şekilde olur;

$$\sigma_F(E) = \frac{\pi}{k^2} l_{gr}^2 = \pi b_{gr}^2 \quad (2.14)$$

b_{gr} : grazing etki parametresi.

Klasik olarak, engel enerjilerinin altında füzyon yasaktır. Coulomb engelinin üstünde, $T_l = 1$ (tam füzyon) ve Coulomb engelinin altındaki enerjilerin, $T_l = 0$ (füzyon yok) olduğu bilinmektedir. Nükleer fizikte, tünel açma fenomeninin tipik örneklerinden biri, Coulomb engelinin yakınındaki ve altındaki enerjilerdeki ağır iyon füzyon reaksiyonudur [29]. Bu nedenle, engelin altında kuantum mekaniksel etkiler etkileşime girer ve füzyon kesitini büyük ölçüde etkiler. Kuantum mekanik tünelleme için (engelin altındaki füzyon), tesir kesiti hesaplamak için başlangıç noktası radyal Schrodinger denklemi,

$$\frac{d^2 \psi_l}{dr^2} + k_l^2(r) \psi_l(r) = 0 \quad (2.15)$$

$k_l(r)$ yerel dalga sayısını temsil eder ve;

$$k_l^2(r) = \frac{2\mu}{\hbar^2} [E - V_l(r)] \quad (2.16)$$

şeklinde verilir. μ indirgenmiş kütedir ve $V_l(r)$ toplam etkileşim potansiyelidir.

Coulomb engelinin altındaki füzyon tesir kesiti, iletim katsayısı (T_l) cinsinden hesaplanabilir. T_l 'yi hesaplamak için, Wentzel-Kramers-Brillouin [30,31] (WKB) yaklaşımı sıkça kullanılır ve;

$$K_l(E) = \mp \int_{r_a}^{r_b} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} |V_l(r) - E| \right)^{\frac{1}{2}} dr \quad (2.17)$$

ile aşağıdaki şekilde verilir;

$$T_l(E) = [1 + \exp(2K_l(E))]^{-1} \quad (2.18)$$

r_a, r_b sırasıyla füzyon engelini dış ve iç dönüş noktalarıdır. Denklemin negatif (pozitif) işaretleri engelden yukarıdaki (alttaki) enerjiler ile ilgilidir.

Füzyon tesir kesiti tüm kısmi dalgaların üzerinden toplam alınarak verilmiştir.

$$\sigma_F(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l \quad (2.19)$$

Aktarım katsayıları Hill-Wheeler [32] formunda yazılabilir,

$$T_l = \frac{1}{1 + \exp \left[\frac{2\pi}{\hbar\omega_l} (V_b - E) \right]} \quad (2.19)$$

Parabolik yaklaşım içinde, Coulomb ve etkileşim engelinin nükleer potansiyeli, V_b, R_b 'nin sırasıyla engel yüksekliği ve engel yarıçapı olduğu tersine çevrilmiş bir harmonik osilatör potansiyeli ile değiştirilebilir [25]. ω_l , l. kısmi dalga için engel eğriliğini temsil eder;

$$V_l(r) = V_b - \frac{1}{2} \mu \omega_0^2 (r - R_b)^2 + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} \quad (2.20)$$

Ayrıca, engel yarıçapının ve engel eğriliğinin açısal momentumdan [20] bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Dolayısıyla,

$$V_l(r) = V_0 + \hbar^2 l(l+1) / 2\mu R_b^2 \quad (2.21)$$

Toplam füzyon tesir kesiti, toplam denkleminin içindeki integrasyon ile değiştirilmesiyle elde edilebilir.

$$\sigma_F = \frac{R_b^2 \hbar \omega_0}{2E} \ln \left[1 + \exp \left[\frac{2\pi}{\hbar \omega_0} (E - V_b) \right] \right] \quad (2.22)$$

Engel alt enerjilerde ($E \ll V_b$), yukarıdaki denklem şu şekilde indirgenir;

$$\sigma_F = \frac{R_b^2 \hbar \omega_0}{2E} \exp \left[\frac{2\pi}{\hbar \omega_0} (E - V_b) \right] \quad (2.23)$$

bu da füzyon tesir kesitinin enerjideki azalma ile üssel olarak azaldığını göstermektedir.

Engelin yukarıdaki enerjilerde ($E \ll V_b$), denkleminin logaritmik ifadesi klasik formüle indirgenmiştir.

$$\sigma_F = \pi R_b^2 \left(1 - \frac{V_b}{E} \right) \quad (2.24)$$

2.6. Füzyon Engel Dağılımı

İçsel serbestlik derecelerine sahip çiftlenim, engelin yüksekliğini değiştirme etkisine ve engelin füzyona dağılmasına neden olur. Engel dağılımları (BD'ler) yüksek dereceli nükleer deformasyonlara karşı oldukça duyarlıdır. Başka bir deyişle, BD'ler, etkileşen çekirdeğin yapısı ile ilgili bilgi almak için güçlü bir araç olarak kullanılabilir. BD, füzyon uyarma fonksiyonunun hassas ölçümleri ile belirlenebilir. Füzyon engellerinin dağılımının varlığı birçok kanal için sonuç doğurmaktadır. Burada, deneysel engel çiftlenmiş kanal (CC) füzyon modeli ile yakından ilişkilidir [4,32]. 1991'de, belirli bir kütle merkezi enerjisinde $E_{c.m.}$ 'de bir füzyon engeli bulma olasılıklarının gerçek dağılımının olduğu gösterilmiştir. Aynı yıl, belirli bir kütle merkezi enerjisinde [deneysel füzyon engeli dağılımı $D(e)$ olarak adlandırılır] bir füzyon engelini bulma olasılıklarının gerçek dağılımının, kesin deneysel füzyon kesitlerinden σ ile doğrudan çıkarılabildiği gösterilmiştir. Rowley ve ark.(1991) [9,33] Siwek-Wilczyńska ve Wilczyński (2004) göre füzyon engel dağılımları deneysel verilerden Denkle(2.26) daki gibi elde edilebilir.

$$D_f(E) = \frac{d^2(E\sigma)}{dE^2} \quad (2.25)$$

burada;

E ; kütle merkezi enerjisi

σ ; füzyon tesir kesiti' dir.

2.7. Çiftlenmiş Kanal Metodu

Ağır iyon çarpışmaları tipik olarak birçok açık reaksiyon kanalının varlığı ile karakterize edilir. Coulomb engelinin etrafındaki enerjilerde ana işlemler esnek saçılma, esnek olmayan saçılma ve bir ya da birkaç nükleonun transferi ve tam füzyon reaksiyonudur. Genellikle bu işlemler az çok bağımsız bir şekilde işleme tabi tutulur. Esnek saçılma verileri, hayali kısmın diğer reaksiyon kanallarına kaybedilen akıyı hesaba kattığı karmaşık bir optik potansiyel kullanılarak açıklanmaktadır. Transfer reaksiyonları ve doğrudan doldurulan esnek olmayan uyarımlar daha sonra, bozulmuş dalga Born (DWBA) yaklaşımında esnek saçılma üzerine pertürbasyon olarak kabul edilir. Füzyon

işlemi genellikle tek boyutlu, gerçek potansiyel bir engelin nüfuzu olarak tanımlanır. Geçtiğimiz yıllarda çiftlenmiş kanallar çerçevesi [34] şeklindeki çok daha kapsamlı bir bakış açısı, ana reaksiyon süreçlerini bir bitin halde ve eşzamanlı olarak tanımlamayı amaçlanmıştır. Buradaki başlangıç noktası, esnek saçılma için yalın etkileşimi sağlayan gerçek bir potansiyeldir. Daha sonra esnek olmayan uyarımları ve transfer reaksiyonlarını tanımlamak için birleştirme etkileşimleri eklenmiştir. Füzyon işlemi, içeri giren dalga sınırını tüm kanallara dayatarak tanımlar. Bu şekilde bir esnek kanalı terk eden akı açıkça ifade edilir. Çiftlenmiş kanal çerçevesi sadece teorik açıdan tatmin edici değildir; ayrıca elde edilen verilerin çeşitliliğini artırmaktadır. Füzyonun geleneksel yaklaşımının tek boyutlu bir engel nüfuz etme modeli tarafından açıklanamadığı aşıkardır. Esnek olmayan uyarımların etkisini ve füzyon hızları üzerindeki transferini incelemek için açık çiftlenmiş kanal hesaplamaları yapmak gerekir. Yakın zamanda üzerinde durulan bir diğer dinamik etki, Coulomb engeli yakınındaki esnek saçılma optik potansiyelinin, bağlı kanal yaklaşımı çerçevesinde de açıklanan eşik anomalisi olarak adlandırılan enerji bağımlılığıdır. Çiftlenmiş kanalların formalizmi hakkında genel bir açıklama aşağıdaki bölümlerde verilmektedir.

3. YÖNTEM

3.1. Çiftlenmiş Kanal Formalizmi

Çiftlenim etkilerinin en güçlü ve çiftlenim kanallarının işlenebilir sayıda olduğu engelin çok az üstü ve altındaki enerjilerde füzyon reaksiyonları çiftlenmiş kanal metodu ile incelenmektedir. Engelden çok yukarıdaki enerjilerde çok fazla kanalın hesaba katılması gerekmektedir ki bu da kanalların tekil olarak incelenmesi imkânını ortadan kaldırmaktadır. Basit olarak transfer süreçlerini ihmal ederek esnek olmayan kanalların çiftlenimleri dikkate alınacak olunursa, etkileşen iki çekirdekten oluşan sistemi tanımlayan toplam Hamiltonyen;

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2 + h(\xi) + V_0(r) + V_{coup}(r, \xi) \quad (3.1)$$

şeklinde yazılır.

Burada;

$h(\xi) \longrightarrow$ hedef çekirdek için iç Hamiltonyen,

$V_{coup}(r, \xi) \longrightarrow$ bağıl hareket ile iç serbestlik dereceleri arasındaki çiftlenim terimi

$V_0(r) \longrightarrow$ r bağıl uzaklığındaki potansiyeldir.

Bu terimlere bağıl olarak toplam dalga fonksiyonu $\Psi(r, \xi)$ için Schrödinger denklemi;

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2 + h(\xi) + V_0(r) + V_{coup}(r, \xi)\right)\Psi(r, \xi) = E\Psi(r, \xi) \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada iç öz durumlar $\Phi_b(\xi)\varepsilon_b$ öz değerleri ile aşağıdaki gibi ,

$$h(\xi)\Phi_b(\xi) = \varepsilon_b\Phi_b(\xi) \quad (3.3)$$

ve matris elemanları da

$$V_{bc}(r) = \int d\xi \Phi_b^*(\xi) V_{coup}(r, \xi) \Phi_c(\xi) \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır.

Kollektif model içerisindeki çiftlenim Hamiltonyeninin çiftlenim matris elemanı V_{bc} Coulomb ve nükleer bileşenlerden oluşmaktadır. Toplam dalga fonksiyonu $\Psi(r, \xi)$ iç öz durumlarının terimleri ile genişletilebilir.

$$\Psi(r, \xi) = \sum \varphi_b(r) \Phi_b(\xi) \quad (3.5)$$

(3.2) nolu denklem ile tanımlanan Schrödinger denkleminden, kanal dalga fonksiyonları $\varphi_b(r)$ için çiftlenmiş kanal denklemleri elde edilebilir.

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V_0(r) + V_{bb}(r) + \varepsilon_b - E \right) \varphi_b(r) = \sum_{c(c \neq b)} V_{bc}(r) \varphi_c(r) \quad (3.6)$$

Çiftlenmiş Schrödinger denklemlerine ait bu sistem sınır koşullarına göre çözülmelidir. Tüm diğer kanallar sadece giden dalgaları içerirken giriş kanalındaki bu çözüm gelen ve giden dalgalarından oluşur. Giden dalgaların katsayıları çeşitli reaksiyon tesir kesitlerini belirlemektedir. Pratik uygulamalarda, sanal potansiyeller çiftlenmiş kanalların içerisinde akı büyümesini belirleyebilmek için hesaba katılmalıdır.

Böyle bir model direkt reaksiyonları hesaplayabilmek için kullanışlıdır. Füzyon tesir kesiti aynı zamanda giriş kanalından kaybolan toplam akı ile direkt reaksiyon kanallarında ortaya çıkan akı arasındaki farklılıktan hesaplanabilir [35,36].

Çiftlenim denklemlerindeki kuvvetli soğurucu sanal potansiyellerin kullanılmasından elde edilen yapay sınırlar uygulamaya konulan gelen dalga fonksiyonu (IWBC) tarafından füzyona sebep olan akıyı hesaba katmak için değiştirilebilir.

Rawitscher [37] tarafından önerilen IWBC formu,

$$\varphi_b(r) \propto \frac{1}{\sqrt{k_b(r)}} \exp \left[-i \int_{R_b}^r k_b(r') dr' \right] \quad (3.7)$$

$k_b \rightarrow$ b kanalındaki asimtotik dalga sayısı

$R_b \rightarrow$ integrasyonun başlama noktasıdır.

Gelen dalga sınır koşullarında çözülen çiftlenmiş denklemler füzyon reaksiyonlarını tanımlamak için daha gerçekçi bir yapı sağlarlar.

Sınır koşulları ile çiftlenim sistem denklemi (2.31) direk sayısal integrasyonla ya da iterasyon metotları ile çözülebilir. Çiftlenmiş kanal formalizminde uyarılmış kanallarda toplam reaksiyon tesir kesiti ve toplam tesir kesiti belirlenir. Bu farklılık R_b ' de gelen akıya eşittir ve füzyon tesir kesiti ile eşitlenir.

IWBC S matrislerini elde etmek için engel içindeki bazı noktalara uygulanır. Böylece tesir kesiti şu şekilde belirlenir;

$$\sigma = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) (1 - \sum_l |S_l(l)|^2) \quad (3.8)$$

3.1.1. Tam Eşleşmiş Kanal Hesaplamaları

Kesin hesaplamalar için, çiftlenmiş Schrodinger denklemleri, sayısal integrasyon yoluyla titizlikle çözülür. Doğrudan reaksiyon için birleştirilmiş kanalların hesaplanmasında, esnek olmayan uyarılmaya bağlı soğurma açıkça işleme alınır. Kompleks potansiyelin sanal kısmı, çiftlenmiş esnek-esnek olmayan kanal boşluğunda yer almayan diğer tüm kanallara emilimin tanımlanması için kullanılır. Bu model esnek, esnek olmayan ve reaksiyon tesir kesitleri için tesir kesitini öngörmektedir. Bu modeli füzyona genişletmek için füzyon bileşenini transfer bölümünden izole etmek gerekir. Bu genellikle bir içeri giren dalga sınır koşulu (IWBC) getirilerek gerçekleştirilir [38]. Bu Schrödinger denklemini çözme yaklaşımında, biri radyal dalga fonksiyonunun logaritmik türevinin, R_{be} sınırındaki bir etkileşim yarıçapında, etkileşim potansiyelinin maksimum dış sınırında kalması için seçilen değerini belirtir. Sınırın yakınında, yalnızca gelen dalgaların olduğu varsayılmaktadır. R_{be} 'deki sınır koşulu, dalga işlevinin başlangıçta düzenli olduğu olağan sınır koşulu yerine geçer. Gelen dalga sınır şartlarını kullanırken, esnek olmayanlar dışındaki kanallara emilimin tanımlanması için hayali bir potansiyel gerekli değildir. Bunun yerine sınır R_{bc} 'yi geçen akının füzyona yol açtığı düşünülmektedir. Basitleştirilmiş hesaplamalar, uyarma enerji seviyelerinin sıfır olduğu yerlerde donmuş yaklaşımı alma sınırlamalarına sahiptir. Buna ek olarak, bağlanmamış engel pozisyonunda matrisi köşegenleştirerek öz değerlerin ve öz vektörlerin bulunma yöntemi çok basitleştirilmiştir.

Bundan başka, çiftlenim etkileşimi genellikle βR 'nin birinci derecesine(sırasına) alınır. Ayrıca, titreşim seviyeleri bir fonon seviyesinde kesilmektedir.

Doğrusal olmayan çiftlenimlerin [39] füzyon engel dağılımlarının şeklini önemli ölçüde etkilediği ve bu nedenle doğrusal çiftlenim yaklaşımının füzyon kesitlerinin en son yüksek kaliteli verileriyle nicel olarak karşılaştırılmasında yetersiz kaldığı gösterilmiştir [40]. Ağır simetrik sistemler için ki çok asimetrik sistemler olsa bile etkinin ihmal edilemez ve tutarsızlıkların çok belirgin olduğu gösterilmiştir. Bunu göz önünde bulundurarak yüksek hassasiyetli füzyon verilerinin analizinde tam çiftlenmiş kanallar hesaplamaları yaptık. Çiftlenmiş kanallar kodu CCFULL bu hesaplamalar için kullanılmıştır. Bu program nükleer çiftlenimleri tam sırasıyla içermektedir ve bu nedenle çiftlenim potansiyelinin genişlemesini karşımıza çıkarmamaktadır. Coulomb çiftlenimleri ancak sadece birinci dereceye dahil edilmiştir. Coriolis-olmayan yaklaşımı ya da izosentrifüj yaklaşımı, her bir kanaldaki bağıl hareketin açısal momentumunun, toplam açısal momentum J [41] ile değiştirilebildiği yaklaşım, programda kullanılır. Program, içsel hareketlerin sonlu uyarma enerjilerini tam olarak dikkate almaktadır. Coulomb uyarmalarını içerir ve Coulomb engeli içindeki gelen dalga sınırı koşulunu kullanır.

3.2. Çiftlenmiş Kanal Kodları

3.2.1. CCFULL

Geçmişten günümüze kadar yapılan çalışmalardaki bulgular göstermiştir ki; Coulomb engeli yakınında ve altındaki enerjilerdeki füzyon reaksiyonları çarpışan çekirdeklerin bağıl hareketinden ve birçok nükleer gerçek hareketlerinin çiftlenimlerinden güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Son zamanlarda hassas olarak ölçülen füzyon tesir kesitleri birçok sistem için mümkün hale gelmiş ve kanal çiftlenimlerinden açığa çıkan Coulomb engel dağılımı elde edilmiştir. Çiftlenmiş kanal hesaplamalarında sıklıkla kullanılan lineer çiftlenim yaklaşımının yüksek hassasiyetteki deneysel verileri analiz etmek için yetersiz olduğu gösterilmiştir. CCFULL programı tüm çiftlenimleri göz önüne alarak füzyon tesir kesitlerini ve bileşik çekirdeklerin toplam açısal momentumunu hesaplamak için çiftlenmiş kanal denklemlerini çözümlenmektedir [10].

Çözüm Metodu:

CCFULL direkt olarak değiştirilmiş Numerov metodunu kullanarak ikinci dereceden diferansiyel denklemlerin çiftlenimlerini integre eder. Gelen dalga sınır koşuluna göre işleme girer ve her bir dalga için bir engel olasılığı hesaplanır. Nükleer çiftlenim matris elemanları fiziksel uzay tanımlandığında matris köşegenleştirme metodu kullanılarak belirlenir [10].

Sınırlamalar:

Program en iyi uyumu kanal sayılarının güçlü bir şekilde taban durumuna çiftlendiği oldukça küçük ve transfer reaksiyonların esnek olmayan kanallara göre daha az önemli rol oynadığı sistemlerde sağlamaktadır. Ayrıca, temelinde füzyon sürecinin baskın bir şekilde Coulomb engeli etrafındaki kuantum tünellemesi ile yönetildiği olgusuna dayanmaktadır. Bu olgu hedef ve gelen atomun $ZP + ZT$ sayısının toplam yükünün 12' den büyük olması ve yük üretimi $ZPZT$ nin 1800' den düşük olması durumunu koşullandırmaktadır. Füzyon engel dağılımlarının ortaya çıkarılmasını amaçlamak için ölçülen pek çok deneysel veri için bu koşul çok iyi uyum göstermektedir. Program aynı zamanda harmonik limit için titreşim çiftlenimi ve dönme çiftlenim gibi davranmaktadır. Program uyarılma enerjileri ve çiftlenim güçlerinin direkt sağlanması ile genel çiftlenimler için değiştirilebilmektedir [10].

Tablo 3.1. CCFULL Bilgisayar Kodu Girdisi

Satır 1	AP, ZP, AT, ZT
Satır 2	RP, IVIBROTP, RT, IVIBROTT
Satır 3	OMEGAT, BETAT, LAMBDAT, NPHONONT (IVIBROTT=0 ise) E2T, BETA2T, BETA4T, NROTT (IVIBROTT=1 ise)
Satır 4	OMEGAT2, BETAT2, LAMBDAT2, NPHONONT2
Satır 5	OMEGAP, BETAP, LAMBDAP, NPHONONP (IVIBROTP=0 ise) E2P, BETA2P, BETA4P, NROTP (IVIBROTP=1 ise)
Satır 6	NTRANS, QTRANS, FTR
Satır 7	V0, R0, A0
Satır 8	EMIN, EMAX, DE
Satır 9	RMAX, DR

Hesaplama Zamanı:

Giriş dosyası için birkaç dakika yeterlidir. Hesaplama zamanı tamamen girilen kanalların sayısına bağlıdır. Bu süre hesaplama yapan kişinin isteğine bağlı olarak kanal sayısının azaltılması ile düşürülebilir ya da kanal sayısı artırılarak artırılabilir.

Giriş parametrelerinin format tanımı Tablo 3.1.' de verilmiştir. Tüm parametreler serbest formatta girilmektedir. İlk satır sistemi belirleyen parametreleri içermektedir. AP ve AT hedef ve gelen çekirdeğin kütle numaraları, ZP ve ZT ise hedef ve gelen çekirdeğin yükleridir. İkinci satırda bulunan RP ve RT çiftlenim Hamiltonyeni için açılış parametreleridir. IVIBROTP ve IVIBROTT hedef ve gelen çekirdeğin mutlak hareketinin özelliğini tanımlar. Eğer değeri -1 olarak alınırsa hedef ve gelen çekirdek durağan olarak kabul edilmekte dolayısıyla üçüncü, dördüncü ve beşinci satır göz ardı edilmelidir. Kanal çiftlenim yokluğunda füzyon tesir kesitleri ve toplam açısal momentum IVIBROTP ve IVIBROTT değerlerinin -1 olarak ayarlanması ile elde edilebilir. IVIBROTP ve IVIBROTT değerleri 0 olarak alındığında, CCFULL hedef ve gelen atomda çiftlenimin titreşimsel, 1 olarak alındığında ise dönme çiftlenim olacağını farzeder.

Üçüncü satır hedef uyarılması hakkında ayrıntılı bilgi verir. Eğer IVIBROT 0 olarak alınırsa, CCFULL OMEGAT, BETAT, LAMBDAT ve NPHONONT değerlerini okur. OMEGAT tekli fonon durumunun uyarılma enerjisi, BETAT deformasyon parametresi, LAMBDAT titreşim uyarılmanın çok kutupluluğu ve NPHONONT içerilebilecek fonon sayısının maksimum değeridir. CCFULL harmonik osilatörün titreşim çiftlenim için olduğunu farzeder. n-fonon durumunun uyarılma enerjisi böylece n kez OMEGAT ile verilir. Bazen kullanıcı nükleer çiftlenim için farklı bir deformasyon değeri kullanmak ister. Bu gibi durum için CCFULL interaktif olarak çalışmadan önce kullanıcıya nükleer çiftlenim için farklı bir çiftlenim gücü tanımlamak isteyip istemediğini sorar. Eğer IVIBROTT 1 olarak alınırsa, CCFULL E2T, BETA2T, BETA4T ve NROTT değerlerini okur. E2T hedef çekirdeğin taban dönme bandındaki ilk 2^+ durumunun uyarılma enerjisi, BETA2T ve BETA4T kuadrapol ve hegzadekupol deformasyon parametreleridir. NROTT dönme bandında içerilmesi gereken durumların sayısıdır.

Çoğu uygulamada hedef çekirdekte uyarılmaların iki titreşim modu vardır. Buna tipik bir örnek oktipol ve kuadrapol titreşim uyarılmalarını içeren $5m^{144}$ çekirdeğidir. 4. Satır hedef çekirdekteki uyarılmaların ikinci modunu tanımlar. OMEGAT2, BETAT2, LAMBDAT2 ve NPHONONT2 nin anlamı OMEGAT, BETAT, LAMBDAT ve NPHONONT ile aynıdır. Eğer NPHONONT2' nin değeri 0 ise ikinci mod hesaplamada

yer almaz, ve OMEGAT2, BETAT2, LAMBDAT2 ihmal edilir. Eğer NPHONONT2' nin değeri 0 değil ise kullanıcıya hesap başlamadan önce hesaplamaya hangi uyarılma kanallarının dahil edilmek istendiği sorulur.

Beşinci satır, üçüncü satır ile aynıdır fakat sadece gelen çekirdek uyarılmaları için.

Altıncı satır, çift transfer çiftlenimlerini tanımlamak içindir. QTRANS çift transfer kanalının Q değeridir. FTR çiftlenim gücü, NTRANS çift transfer kanal sayısıdır. Günümüzde CCFULL NTRANS değerini 0 yada 1 olarak sınırlandırmaktadır. Eğer bu değer 0 olursa, çift transfer kanalı hesaba katılmaz ve QTRANS ile FTR değerleri ihmal edilir.

Yedinci satır, giriş kanalındaki nükleer potansiyeli tanımlamak içindir. V_0 Wood-Saxon potansiyelinin derinlik parametresi, R_0 açılı parametresi ve A_0 da yüzey yoğunluk parametresidir.

Bir sonraki satırdaki EMIN, EMAX ve DE parametreleri kütle merkezi siteminde çarpışan enerjilerin minimum ve maksimum değerleridir.

Hesaplamanın doğruluğu 9. satırda verilen RMAX açısı ve DR integrasyon adımı ile sağlanmaktadır. Çoğu uygulamada RMAX= 30 fm ve DR=0,05 fm değerleri ile keskin doğrulukta sonuçlar elde edilmektedir.

CCFULL programına ait giriş ve çıkış dosyaları Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.' de verilmiştir; [10]

ccfull.inp	
16., 8.,144., 62.	← $A_p = 16, Z_p = 8, A_t=144, Z_t=62$
1.2, -1, 1.06, 0	← durgun gelen parçacık ve hedef için tırşim modu
1.81, 0.205, 3, 1	← hedef parçacığın uyarılma özellikleri
1.66, 0.11, 2, 1	← hedef parçacıkta ikinci mod
6.13, 0.733, 3, 1	← gelen parçacığın uyarılma özellikleri
0, 0., 0.3	← transfer çiftlenimi
105.1, 1.1, 0.75	← potansiyel parametreleri
55., 70., 1	← $E_{min}, E_{max}, \Delta E$ (c.m. enerji)
30., 0.05	← $R_{max}, \Delta r$

Şekil 3.1. CCFULL programı giriş dosyası

16O + 144Sm Fusion reaction		

Phonon Excitation in the targ.: beta_N= 0.205, beta_C= 0.205, r0= 1.06(fm), omega= 1.81(MeV), Lambda= 3, Nph= 1		

Potential parameters: V0= 105.10(MeV), r0= 1.10(fm), a= 0.75(fm),power= 1.00		
Uncoupled barrier: Rb=10.82(fm), Vb= 61.25(MeV), Curv=4.25(MeV)		

Ecm (MeV)	sigma (mb)	<I>

55.00000	0.97449E-02	5.87031
56.00000	0.05489	5.94333
57.00000	0.28583	6.05134
58.00000	1.36500	6.19272
59.00000	5.84375	6.40451

69.00000	427.60179	17.16365
70.00000	472.46037	18.08247

Şekil 3.2. CCFULL programı çıkış dosyası

3.2.2. CCFUS – Ağır İyon Füzyon Reaksiyonlarında Füzyon Tesir Kesitinin Hesaplanması İçin Basitleştirilmiş Çiftlenmiş Kanal Kodu

CCFUS kodu, seksenlerin başında, engele yakın bölgelerdeki füzyon olayları için daha basit ve çiftlenmiş kanal kodu olarak bilim dünyasına katılmıştır. O zamandan beri, nükleer füzyonun basit engel nüfuz etme olayına etki eden iç özgürlük derecelerinin araştırılmasında pratik bir araç olarak kullanılır. Kod reaksiyon verileri analizinde düzenli olarak kullanılmaya devam edilmektedir.

Bunun temel nedenleri CCFUS'un çalıştırılmasının çok kolay olması, zaman aşımli olmaması ve makul sonuçlar üretmesi olarak sayılabilir [11].

Girdi Dosyası Tanımı

Verilerin okunduğu program satırları üretilir ve onu istenen değişkenlerin kısa bir açıklaması izler.

Satır1:

wma: gelen parç. kütle

wza: gelen parç. yük

wmb: hedef parç. kütle

wzb: hedef parç. yük

dv: engeli belirleyen parametre

Satır2:

emin: minimum enerji değeri

emax: maksimum enerji değeri

de: enerji ölçeğindeki aralık

Satır3:

ns: hesaplamaların içereceği yüzey esnek olmayan kanal sayısı

na: hesaplamaların içereceği ek kanal sayısı

Satır4:

beta: deformasyon parametresi

flam: çok kutupluluk

q: kanal için q-değeri

Satır5:

f: engeldeki çiftlenmenin gücü

q: kanal için q-değeri

Tablo 3.2. CCFUS girdi dosya örneği

58	28	64	28	-10	1
95	110	1			
4	2				
0.13	-2	-1.45			
0.18	-3	-4.47			
0.16	2	-1.34			
0.19	3	-3.60			
1.	-5				

Tablo 3.3. CCFULL çıktı dosya örneği

Projectile	mass:58	charge:28
Target	mass:64	charge:28
Parameters for		
DV=10.00		
Vb=101.1	Rb=10.27	h-Omega=3.16
beta		
	lamda	Q(MeV)
0.13	-2	-1.45
0.18	-3	-4.47
0.16	2	-1.34
0.19	3	-3.60
F(MeV)		
	Q(MeV)	
1.00	-5.00	
1.00	-15.00	
Fusion cross sections vs. energy (in mb)		
E (MeV)	Coupled	Uncoupled
95.0	1.55E-02	8.530E-05
96.0	1.113E-01	6.171E-04

3.2.3. CCDEF-Statik Nükleer Deformasyonları İçeren Füzyon Tesir Kesitleri İçin Basitleştirilmiş Çiftlenmiş-Kanal Kodu

CCDEF kodu tıpkı CCFUS kodunda olduğu gibi çiftlenmiş kanal metodu ile füzyon tesir kesitleri hesaplamalarında kullanılmaktadır. Diğer çiftlenmiş kanal metodunu kullanan kodlardan farkı gelen ve hedef çekirdeğin deforme olmasıdır. Deforme nükleer şeklin etkisi hesaplama içinde dikkate alınmaktadır [12].

Girdi Dosyası:

Kodu çalıştırabilmek için CCFUS kodunun girdi tanımındaki birinci satıra deformasyon parametre ilavesi yapılmaktadır. Bu parametreler;

be2a, be4a: Gelen çekirdeğe ait parametreler

be2b, be4b: Hedef çekirdeğe ait parametreler

Girdi tanımları için aşağıda set halinde bir örnek verilmiştir.

Tablo 3.4. CCDEF girdi dosya örneği

-24.	12.	-232.	+20	1	0.3	0.0	0.22	0.12
110.	130.	2.						
2	0							
0.3	-2	-1						
0.3	2	-2						

Çıktı Dosyası:

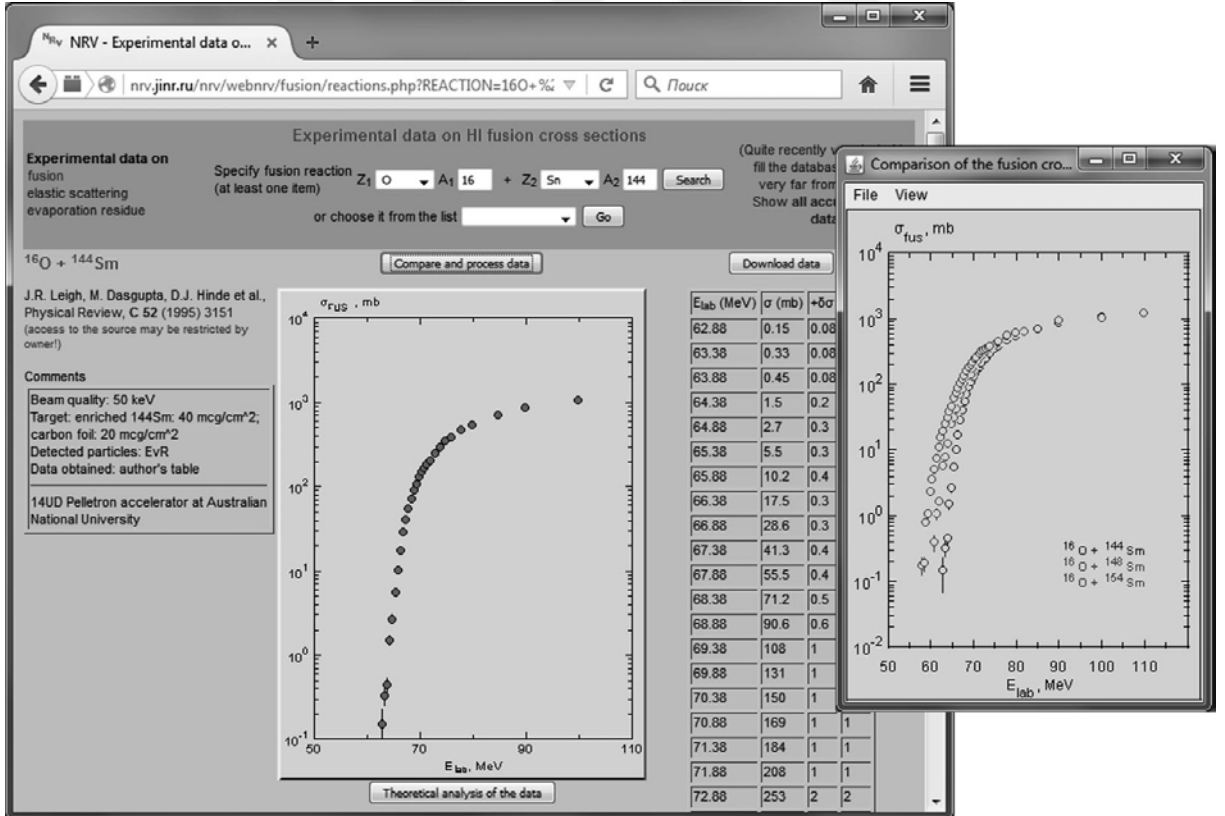
Program çalıştırıldıktan sonra elde edilen dosya:

Tablo 3.5. CCDEF Çıktı dosya örneği

Projectile	mass:58	charge:28
	beta2= .30	beta4= .00
Target	mass:232.	charge:90.
	beta2= .22	beta4= .12
beta	lamda	Q(MeV)
0.30	-2	-1
0.30	-2	-2
Fusion cross sections vs. energy (in mb)		
E (MeV)	Coupled	
110.0	1.046E+01	
112.0	1.807E+01	

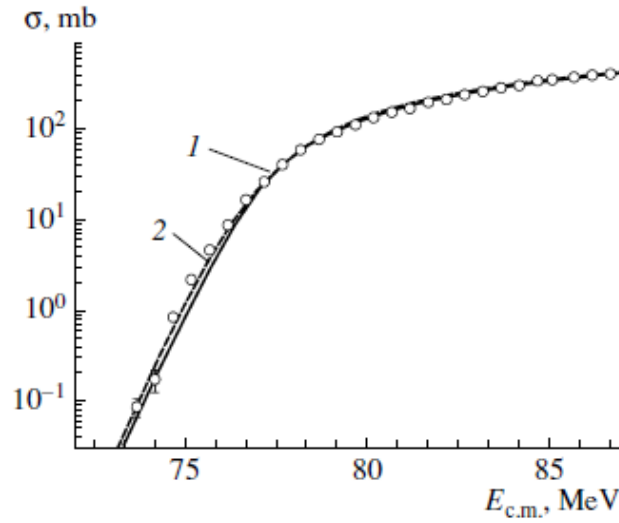
3.2.4. Düşük Nükleer Enerjili Nükleer Reaksiyon Bilgi Tabanı Gösterimi (NRV)

NRV, açık ve kalıcı olarak genişletilmiş bir küresel yönetim sistemidir ve nükleer verilerin ve düşük enerjili nükleer dinamiklerin video-grafik bilgisayar simülasyonunun grafiksel gösterimidir. Tamamen ve yenilenmiş bir nükleer veri tabanından ve "düşük enerjili nükleer bilgi tabanını" oluşturan, düşük enerjili nükleer reaksiyonların iyi bilinen teorik modellerinden oluşur. Bilgi tabanının Füzyon bölümünden nükleer füzyon işlemlerinin analizine erişilebilir. Bu bölüm, deneysel bir füzyon kesiti veri tabanını içerir ve birleşme kanal yöntemi içindeki füzyon işleminin simüle edilmesini mümkün kılar. Füzyon tesir kesitleri veri tabanı, NRV bilgi tabanında nükleer reaksiyonlar için diğer tesir kesitleri veri tabanına kıyasla en kapsamlı olanıdır. Şu anda 1500'den fazla uyarma işlevi içermektedir. Spesifik bir reaksiyon için bir veri gösterimi örneği, Şekil 3.3. 'de sunulmuştur [13].



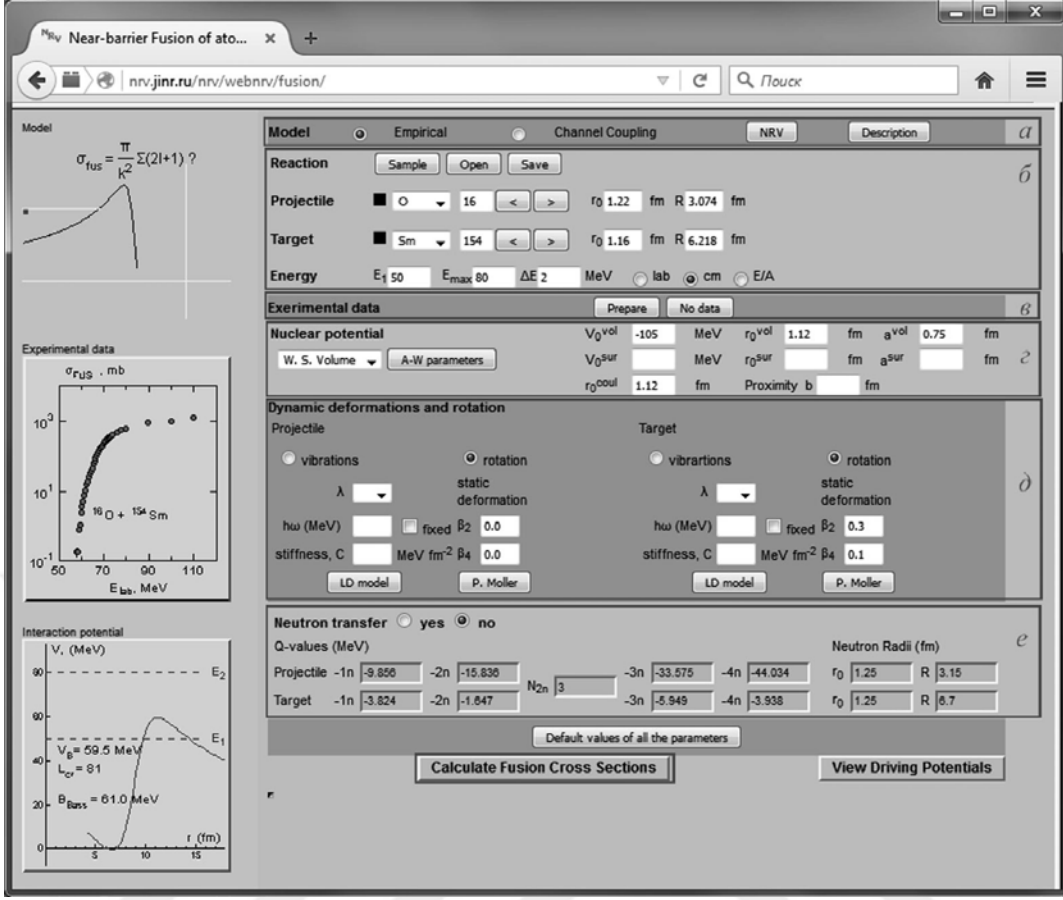
Şekil 3.3. $^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$ için deneysel füzyon tesir kesiti hakkındaki bilgi örneği

NRV bilgi tabanında, kanal birleştirme modelinin iki versiyonuna göre füzyon kesitlerini hesaplamak mümkündür; bunlardan ilki kuantum [42] ve bir diğeri de ampirikdir [43]. Her iki yaklaşım da, çarpışan çekirdeğin bağıl hareketinin ortak serbestlik dereceleri ile eşleşmesini hesaba katmayı sağlar (küresel çekirdeklerin yüzey titreşimleri ve / veya deforme çekirdeklerin dönmesi). Bu iki model tarafından üretilen sonuçların birbirine yakın ve deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğuna dikkat etmek önemlidir. Bu, Şekil 3.4.' de gösterilmektedir, burada $^{36}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için füzyon tesir kesiti, kanal birleştirme modelinin ampirik (eğri 1) ve kuantum (eğri 2) versiyonlarında analiz edilmektedir ve [44] den elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Kanal birleştirme modelinin ampirik versiyonunda, pozitif Q-değerleri ile nitelendirilen nötronların yeniden dağılım kanallarını da hesaba katmak mümkündür. [45]



Şekil 3.4. Ampirik (eğri 1) ve kuantum kanal birleştirme modelleri (eğri 2) içindeki NRV bilgi tabanı kullanılarak $^{36}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$ füzyon reaksiyonu için kesiti analiz etmeye örnek. Görüntülenen deneysel veriler [44] nolu referanstan alınmıştır.

Giriş verilerinin hazırlanması için bir görüntü örneği Şekil 3.5.' de gösterilmektedir. Bilgi tabanının diğer bölümlerine benzer şekilde, kullanıcıya modelin varsayılan giriş parametrelerini seçme imkanı sağlanmaktadır.



Şekil 3.5. Giriş verilerinin hazırlanması için bir görüntü örneği.

Girdi verilerinin hazırlanmasına ilişkin Şekil 3.5’ de verilen diyalog birkaç temel alt bölümden oluşmaktadır.

Modeli: Bu alt bölüm, kanal çiftlenim modelinin ampirik ve kuantum mekaniksel versiyonları arasında seçim yapma imkanı sağlar.

Reaksiyon: Bu alt bölüm gelen-hedef kombinasyonu ve çarpışma aralığı enerjileri seçimi için hizmet vermektedir.

Deneysel veriler: Kullanıcı, deneysel verilerin analize dahil edilmesini önleme veya analiz için veri seçme olasılığına sahiptir. Bunu yaparken, veriler ilgili veri tabanından alınabilir veya kullanıcı tarafından manuel olarak girilebilir. Analizde yer alan deneysel veriler, pencerenin sol tarafındaki grafik şeklinde gösterilir (bakınız, örneğin Şekil 3.5.).

Nükleer potansiyel: Kullanıcı en sık kullanılan çekirdek-çekirdek etkileşimi potansiyellerini seçebilir (Woods-Saxon potansiyeli veya yakınlık potansiyeli). Woods – Saxon potansiyeli parametreleri Akyüz Winther sistematığıne göre otomatik olarak

seçilebilir [46]. Çekirdek-çekirdek potansiyelinin çarpışan çekirdekler arasındaki mesafeye olan bağımlılığı, pencerenin sol alt tarafındaki ayrı bir Java uygulamasında da gösterilmiştir. Yatay kesik çizgiler, seçilen çarpışma enerjileri aralığını gösterir.

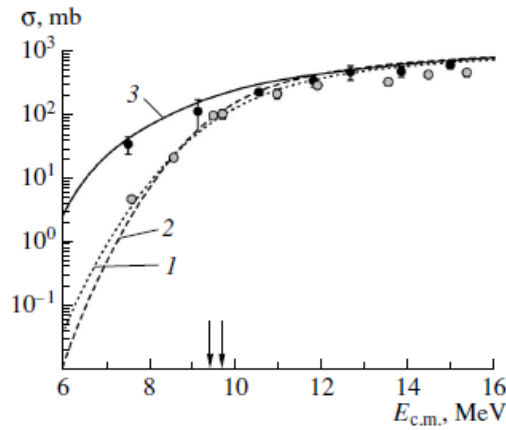
Dinamik deformasyonlar ve rotasyon: Kullanıcı, hesaplamada göz önünde bulundurulması gereken toplu serbestlik derecelerini ve ilgili uyarma parametrelerini seçebilir. Çekirdeklerin özelliklerinin veri tabanından ilgili parametrelerin değerlerini otomatik olarak belirleme imkanı sağlanır.

Nükleon transferi: Bu alt bölüm, sadece kanal birleştirme modelinin ampirik versiyonunda uygulanır ve birinin nötron transferinin füzyon tesir kesiti üzerindeki etkisini hesaba katmasına izin verir. Bunun için gerekli tüm veriler otomatik olarak belirlenir.

Hesaplama kodunu çalıştırmak için, Füzyon kesitlerini hesapla düğmesine basmanız gerekir. NRV bilgi tabanı, birbiriyle ilişkili aşağıdaki nicelikleri hesaplama ve analiz etme imkanı sunar:

- i. füzyon kesitleri,
- ii. füzyon engel dağılımları ve,
- iii. kısmi füzyon kesitleri.

Şekil 3.6., NRV bilgi tabanı kullanılarak [47] 'de gerçekleştirilen ${}^4\text{He}+{}^{64}\text{Zn}$ füzyon tesir kesitlerinin analizinin bir örneğini göstermektedir.



Şekil 3.6. NRV bilgi tabanında ${}^4\text{He}+{}^{64}\text{Zn}$ reaksiyonu için füzyon tesir kesitini analiz etme örneği.

Eğri 1, nötron transferleri hesaba katılmadan ampirik kanal-çiftlenim modelinde ${}^4\text{He}+{}^{64}\text{Zn}$ reaksiyonu için hesaplanan füzyon tesir kesiti anlamına gelirken, 2 ve 3 eğrileri

sırasıyla, ${}^4\text{He}+{}^{64}\text{Zn}$ reaksiyonları için nötron transferi ile ve nötron transferi olmadan hesaplanan füzyon tesir kesitlerini temsil eder.

3.3. Wong Formülü Yöntemi

Wong [46] bir boyutlu potansiyel engelinin kuantum mekaniksel penetrasyon tarafından iki çekirdeğin füzyonu için toplam tesir kesiti ifadesini,

$$\sigma = \frac{\pi}{k^2} \sum_l \frac{2l+1}{1+\exp[2\pi(E_l-E)/\hbar\omega_l]} \quad (3.9)$$

şeklinde tanımlamıştır.

Burada $k = \sqrt{\frac{2\mu E}{\hbar^2}}$ dir.

$l = 0$ bölgesinde çeşitli parametrizasyonlarla Wong Formülünün formu aşağıdaki şekle dönüştürülmüştür.

$$\sigma = \frac{R_0^2 \hbar \omega_0}{2E} \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{2\pi(E-E_0)}{\hbar \omega_0} \right] \right\} \quad (3.10)$$

E ' nin oldukça büyük değerleri için yukarıdaki formüller,

$$\sigma = \pi R_0^2 \left[1 - \frac{E_0}{E} \right] \quad (3.11)$$

Nispeten küçük E değerleri için de ($E \ll E_0$);

$$\sigma = \frac{R_0^2 \hbar \omega_0}{2E} \exp[2\pi(E - E_0)/\hbar \omega_0] \quad (3.12)$$

formüllerine indirgenmiştir.

3.4. Engel Dağılımı

3.4.1. Wong Formülü ile Teorik Yöntem

Çiftlenmiş Engel Tanımı:

Bileşik parçacıklar arasındaki karmaşık etkileşimler genellikle etkili bir merkezi potansiyel ile yaklaşık olarak tahmin edilmektedir. İçsel serbestlik derecelerinin bu potansiyel üzerindeki etkisi, füzyon sistemleriyle ilişkili genel bir sorundur ve uygun şekilde dahil edilmiştir. Ağır çekirdeklerin füzyonu durumunda, görelî hareket ve iç serbestlik dereceleri arasındaki çiftlenim, çiftlenmemiş füzyon engelinin enerjisinde bir bölünmeye neden olur. Ortaya çıkan füzyon engellerinin dağılımı, ilgili çiftlenimleri gösteren bir şekle sahiptir ve doğrudan, çiftlenmemiş engelin altındaki enerjilerde füzyon tesir kesitinin bir artışı olarak kendini gösterir [48,49]. Artışın meydana geldiği yerde, Şekil 2'deki gibi deforme olmuş hedef çekirdeğin farklı yönelimlerinden kaynaklandığı düşünülebilen engel yüksekliklerinin bir dağılımı vardır [49].

Burada, zemin durumuna güçlü bir şekilde bağlı birkaç ilgili uyarma kanalı bulunan çift kanallı denklemler, çok kanallı girilebilirlik elde etmek için sayısal olarak çözülür [32]. Öz kanal gösterimi çiftlenmiş kanallar yaklaşımı, her ayırma mesafesindeki çiftlenim matrisini köşegenleştirerek N farklı etkili potansiyel engel elde eder, burada x, çiftlenim kanal denklemlerine dahil edilecek kanal sayısıdır. Elde edilen çok kanallı penetrasyonlar daha sonra her bir etkili engelin nüfuz edilebilirliğinin ağırlıklı bir toplamı olarak verilir [50]

$$P_l(E) = \sum_{\varepsilon} |T_l^{fus}|^2 \quad (3.12)$$

Bu ifadenenin ardından tesir kesiti ise;

$$\sigma_{fus}^{\varepsilon}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) P_l(E) \quad (3.13)$$

ile verilir.

Wong Yöntemi:

Klasik füzyon kesitinden başlayarak bu yöntemi kısaca açıklarsak;

$$\begin{aligned}\sigma_{fus}(E) &= \pi R_b^2 \left(1 - \frac{V_b}{E}\right) \rightarrow E \gg V_b \\ \sigma_{fus}(E) &= 0 \rightarrow E \ll V_b\end{aligned}\quad (3.14)$$

$E\sigma_{fus}$ birinci türevinin, V_b yüksekliğinin tek boyutlu bir engeli için klasik penetrasyon $T(E)$ ile orantılı olduğu, yani $V_b \gg E$ ve $T(E) = 1$ $V_b \ll E$ için, ikinci türev bir delta fonksiyonu ile orantılıdır [32,51],

$$\frac{d^2}{dE^2} [E\sigma_{fus}(E)] = \pi R_b^2 \delta(E - V_b) \quad (3.15)$$

$E\sigma_{fus}$ 'un enerjiye ilişkin ikinci türevi öz engelleri hakkında bilgi verebilir. Bununla birlikte, iletim faktörü öz engeller için sınırlı bir genişliğe yol açar [52]. Kuantum tünelleme, engel denklemdeki füzyon kesiti için aşağıdaki ifadeyi çıkarmak için engel ters bir parabolle yaklaştığında geçerli olan Hill-Wheeler iletim katsayılarını kullanan Wong (1973) tarafından dikkate alınmıştır. Bu nedenle, denklem $E\sigma_{fus}$ türevi, özellikle zayıf bir bağlantı durumu için veya Coulomb engellerinin bazıları yakından aralıklı olduğunda, ayrı öz engellerin net bir şekilde tanımlanmasına yol açmayabilir. Füzyon için Coulomb engellerinin dağılımının tanımı [32];

$$\frac{d^2}{dE^2} [E\sigma_{fus}(E)] = \pi R_b^2 \frac{2\pi}{\hbar w} \frac{e^x}{1 + e^x} \quad (3.16)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Burada x;

$$x = 2\pi(E - V_b) \quad (3.17)$$

dir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada amaç deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında en iyi neticeleri veren kod veya kodları bulmak, CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi arasında bir eşitsizlik olup olmadığını tespit etmek, ayrıca deneysel verileri bulunmayan reaksiyonlar için ise yol gösterici nitelikte veriler elde etmek maksadı ile kararlı çekirdekler üzerinden füzyon reaksiyonu gerçekleştirmektir. İlgili kodları bulmak ve adları anılan hesaplama kodlarındaki eşitsizlikleri tespit etmek, deneysel verileri bulunmayan reaksiyonlar için de yol gösterici nitelikte veriler elde etmek maksadıyla 48 adet farklı ağırlıktaki çekirdeklerle oluşturulan reaksiyonlarını tespit ettik. Bu reaksiyonları tespit ederken; literatürde sadece deneysel olarak çalışılmış yahut CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV hesaplama kodları ve Wong formalizminden sadece bir yahut ikisi ile çalışılmış reaksiyonları tercih ettik. Yapılan ağır iyon füzyon tesir kesiti hesaplamaları neticesinde elde edilen bulgular ve bunlara ait grafikler aşağıda tek tek verilecek ve yorumlanacaktır. Bu yorumlarda kısaca CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizminden hangilerinin ilgili grafiklerde en iyi sonuçları verdikleri tespit edilecektir. Bu sayede 48 reaksiyon grubu için deneysel değerlere en yakın / reel verileri bulmamız ve ağır iyon füzyon tesir kesiti değerlerini elde etmemizi sağlayan kod yahut kodların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Böylelikle daha önce, seçtiğimiz reaksiyonlarla yapılan füzyon deneylerinin, CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile sadece birisiyle karşılaştırması yapılmışken, bu çalışmayla birlikte var olan deneysel veriler bütün çiftlenmiş kanal hesap yöntemleriyle birlikte, tüm parametrelerin etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar ağır iyon füzyon literatürüne kazandırılmıştır. Çiftlenmiş kanal kodlarının tümü hesaplamaları gelen parçacık ve hedefte titreşimli çiftlenimler olarak yapmaktadır. Engel parametreleri; derinlik parametresi V_0 ve yüzey yayılma parametresi a_0 (Wood-Saxon potansiyellerine ait değerler) hesaplanmış ve değerler Tablo 4.1.'de gösterilmiştir. Wood-Saxon potansiyelinin parametreleri, Akyuz Winther sistematığına göre seçilmiştir.

Esnek olmayan kanallara gelince, belirli bir E2 veya E3 uyarılma enerjisi ile temel duruma geçiş kuvvetine sahip bilinen tüm durumlar dikkate alınmıştır. Deformasyon bilgileri [54,55] Tablo 4.2. ve Tablo 4.3. te listelenmiştir.

Tablo 4.1. Derinlik parametresi V_0 ve yüzey yayılma parametresi a_0

<i>Reaksiyon</i>	V_0 (MeV)	a_0 (fm)
$O^{16} + O^{16}$	45,142	0,602
$O^{16} + Ge^{70}$	55,747	0,638
$O^{16} + Ge^{72}$	55,997	0,639
$O^{16} + Ge^{74}$	56,241	0,639
$O^{16} + Ge^{76}$	56,477	0,640
$O^{16} + Sm^{148}$	62,200	0,652
$O^{16} + Sm^{150}$	62,320	0,652
$O^{16} + Sm^{152}$	62,420	0,652
$O^{16} + Sm^{154}$	62,530	0,652
$Ne^{20} + Zr^{90}$	61,548	0,651
$Ne^{20} + Zr^{92}$	61,760	0,651
$Ne^{20} + Zr^{94}$	61,967	0,651
$Ne^{20} + Zr^{96}$	62,170	0,652

Tablo 4.1.' in devamı

$Ne^{20} + Sn^{112}$	63,643	0,655
$Ne^{20} + Sn^{114}$	63,810	0,655
$Ne^{20} + Sn^{116}$	63,975	0,655
$Ne^{20} + Sn^{118}$	64,137	0,655
$Ne^{20} + Sn^{120}$	64,295	0,655
$Al^{27} + Ge^{70}$	63,339	0,655
$Si^{28} + Mg^{24}$	62,128	0,652
$Si^{28} + Mg^{26}$	52,906	0,632
$Si^{28} + Ni^{58}$	62,128	0,652
$Si^{28} + Ni^{64}$	63,250	0,654
$Si^{28} + Zr^{90}$	67,009	0,661
$Si^{28} + Mo^{94}$	75,000	0,750
$Si^{28} + Mo^{100}$	105,000	0,750
$Si^{28} + Zr^{94}$	67,585	0,662
$Si^{28} + Zr^{96}$	67,820	0,662
$Si^{30} + Mg^{24}$	52.738	0.631

Tablo 4.1.' in devamı

$Si^{30} + Mg^{26}$	53.184	0.633
$S^{32} + Ni^{58}$	64.095	0.658
$S^{32} + Ni^{64}$	65,729	0,658
$S^{32} + Zr^{90}$	69.345	0,665
$S^{32} + Zr^{96}$	70.107	0,666
$S^{36} + Zr^{96}$	69,739	0,670
$S^{36} + Pb^{204}$	78,074	0,683
$S^{36} + Pb^{206}$	78,057	0,684
$S^{36} + Pb^{208}$	78,041	0,684
$S^{36} + Pb^{210}$	78,026	0,684
$Ar^{40} + Hf^{176}$	79,015	0,684
$Ar^{40} + Hf^{178}$	79,015	0,684
$Ar^{40} + Hf^{180}$	79,017	0,684
$Ni^{58} + Ni^{58}$	72,816	0,671
$Ni^{58} + Ni^{64}$	73,873	0,673
$Ni^{64} + Ni^{64}$	73,845	0,676

Tablo 4.1.' in devamı

$Zn^{64} + Zn^{64}$	75,447	0,676
$Zn^{64} + Zn^{70}$	75,447	0,676
$Zn^{70} + Zn^{70}$	75,920	0,680
$Zn^{64} + Ni^{64}$	74,913	0,676
$Ti^{46} + Sn^{124}$	78,702	0,681
$Ti^{48} + Sn^{124}$	78,380	0,683
$Ti^{50} + Sn^{124}$	78,095	0,684

Tablo 4.2. 2^+ durumlarına ait deformasyon parametreleri ve uyarılma enerjileri [54].

Çekirdek	Deformasyon Parametresi β_λ	Uyarılma enerjisi (MeV)
O^{16}	0,349	6,91
O^{18}	0,1844	1,9821
Ne^{20}	0,72	1,6337
Mg^{24}	0,6092	1,3687
Mg^{26}	0,4891	1,8087
Si^{28}	0,4073	1,779
Si^{30}	0,3107	2,2353
S^{32}	0,3102	2,2306
S^{36}	0,1569	3,2909
Ar^{40}	0,2519	1,4609
Ti^{46}	0,317	0,8893
Ti^{48}	0,2507	0,9835
Ti^{50}	0,16	15538
Ni^{58}	0,1768	1,4542
Ni^{64}	0,1686	1,3458
Zn^{64}	0,2342	0,9916
Zn^{70}	0,2254	0,8845
Ge^{70}	0,23	1,04
Ge^{72}	0,25	0,83
Ge^{74}	0,29	0,60
Ge^{76}	0,27	0,56
Zr^{90}	0,091	2,1863
Zr^{92}	0,1009	0,9345
Zr^{94}	0,0882	0,9188
Zr^{96}	0,0615	1,7505
Mo^{94}	0,1525	0,871
Mo^{100}	0,234	0,5356
Sn^{112}	0,1207	1,2569

Tablo 4.2.' nin devamı

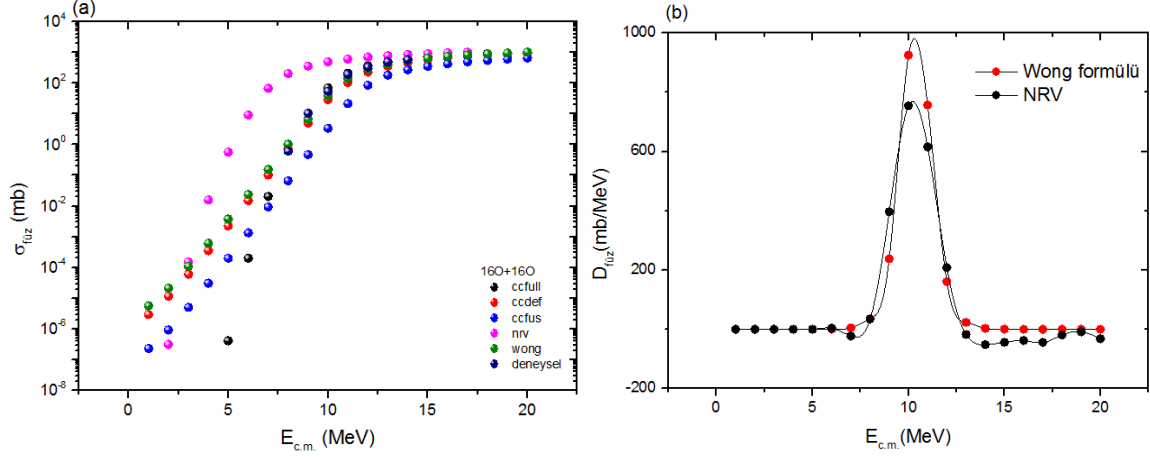
Sn^{114}	0,1147	1,2999
Sn^{116}	0,111	1,2936
Sn^{118}	0,11	1,2297
Sn^{120}	0,1061	1,1713
Sn^{124}	0,095	1,13
Sm^{148}	0,1416	0,5503
Sm^{150}	0,1929	0,3339
Sm^{152}	0,3065	0,1218
Sm^{154}	0,3404	0,082
Hf^{176}	0,299	0,0883
Hf^{178}	0,2779	0,0932
Hf^{180}	0,27319	0,0933
Pb^{204}	0,04078	0,8992
Pb^{206}	0,03198	0,8031
Pb^{208}	0,055	4,0855
Pb^{210}	0,0227	0,7997

Tablo 4.3. 3^- durumlarına ait deformasyon parametreleri ve uyarılma enerjileri [55].

Çekirdek	Deformasyon Parametresi β_λ	Uyarılma enerjisi (MeV)
O^{16}	0,73	6,13
O^{18}	0,595	5,098
Ne^{20}	0,568	5,621
Mg^{24}	0,326	7,616
Mg^{26}	0,213	6,876
Si^{28}	6,879	0,401
Si^{30}	5,488	0,277
S^{32}	0,534	5,006
S^{36}	0,376	4,193
Ar^{40}	0,314	3,681
Ti^{46}	0,142	3,059
Ti^{48}	0,197	3,359
Ti^{50}	0,138	4,41
Ni^{58}	0,198	4,475
Ni^{64}	0,201	3,56
Zn^{64}	0,233	2,998
Zn^{70}	0,21	2,859
Ge^{70}	0,274	2,561
Ge^{72}	0,264	2,515
Ge^{74}	0,145	2,536
Ge^{76}	0,144	2,692
Zr^{90}	0,211	2,748
Zr^{92}	0,174	2,34
Zr^{94}	0,193	2,058
Zr^{96}	0,284	1,897
Mo^{94}	0,153	2,534
Mo^{100}	0,218	1,908
Sn^{112}	0,128	2,355

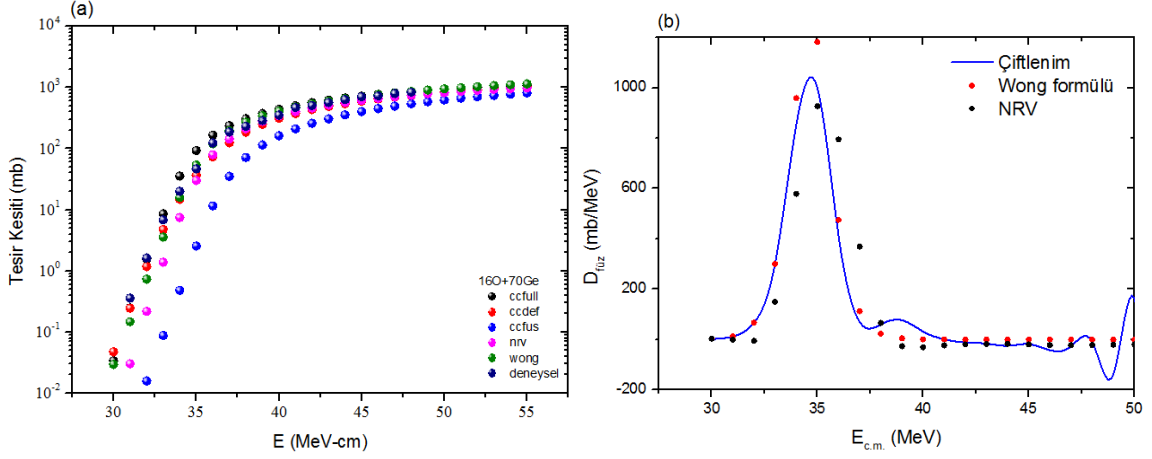
Tablo 4.3.' ün devamı

Sn^{114}	0,134	2,275
Sn^{116}	0,156	2,266
Sn^{118}	0,139	2,325
Sn^{120}	0,137	2,401
Sn^{124}	0,106	2,603
Sm^{148}	0,158	1,162
Sm^{150}	0,145	1,071
Sm^{152}	0,095	1,041
Sm^{154}	0,08	1,012
Hf^{176}	0,057	1,313
Hf^{178}	0,044	1,322
Hf^{180}	0,026	1,374
Pb^{204}	0,118	2,621
Pb^{206}	0,116	2,648
Pb^{208}	0,111	2,615
Pb^{210}	0,089	1,87

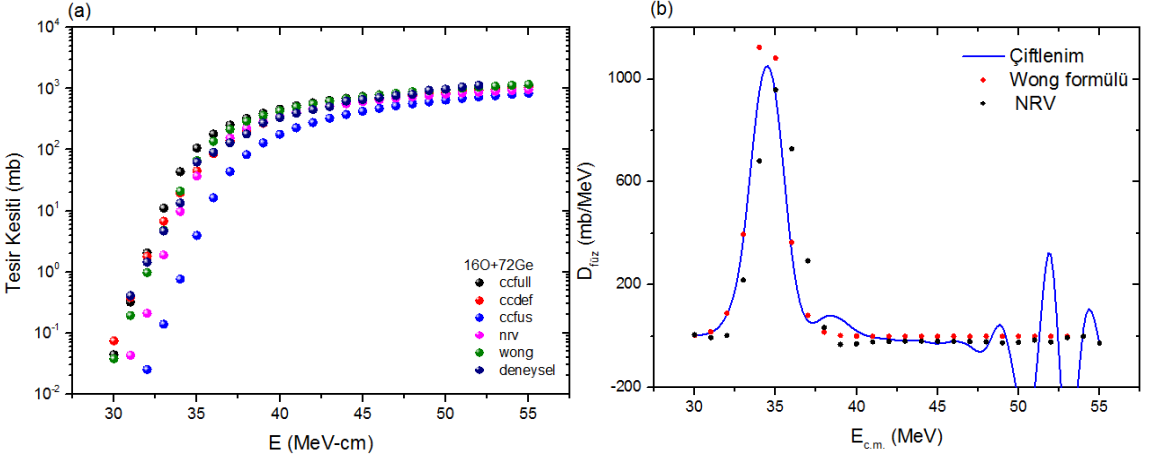


Şekil 4.1. (a) $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonu için NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

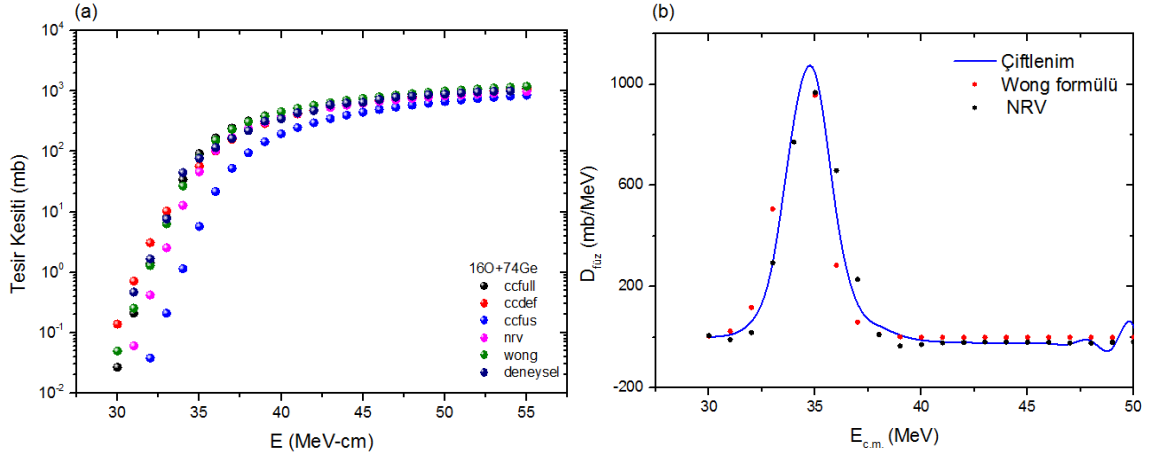
$^{16}O+^{16}O$ reaksiyon sisteminin füzyon reaksiyonları CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi ile 1-20MeV-cm enerji aralığında incelenmiştir. Bugüne kadar Coulomb engeli yakınındaki $^{16}O+^{16}O$ füzyon reaksiyonu, mikroskobik yapının, ışık çekirdeği füzyonundaki etkisini ve $^{16}O+^{16}O$ ile yakılan oksijenin yüksek gelişmiş masif yıldızlarda rolünü anlamak çalışılmıştır. Füzyon tesir kesiti için deneysel çalışmalar [56] (A. Kronen ve ark.,1986) mevcuttur. Bu noktada bizim amacımız literatürdeki deneysel verileri teorik bir çalışma ile karşılaştırmamızı sağlayacak veriler elde etmek, bunun için deneysel verilere en uyumlu sonuç veren kodu saptamak aynı zamanda çiftlenmiş kanal hesaplama kodlarının arasındaki benzerlik ya da farklılıkları gözlemlemek oldu. Grafiği incelediğimizde engel parametre değerine ulaşıldığında (10.39 MeV) tüm kodlar birbirleri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Engel bölgesine yaklaşılan kadar olan bölgede ise deneysel veriler ile en iyi uyum gösteren veriler CCFULL ve CCDEF kodlarından; ve Wong formülünden elde edilen veriler olmuştur. Engel dağılım fonksiyonu grafiğinde ise NRV ve Wong formülünden elde edilen veriler karşılaştırılmış tam engel potansiyel bölgesinde keskin pikler gözlenmiştir, bu bize her iki hesaplamasında güvenilir sonuçlar sağladığını göstermektedir.



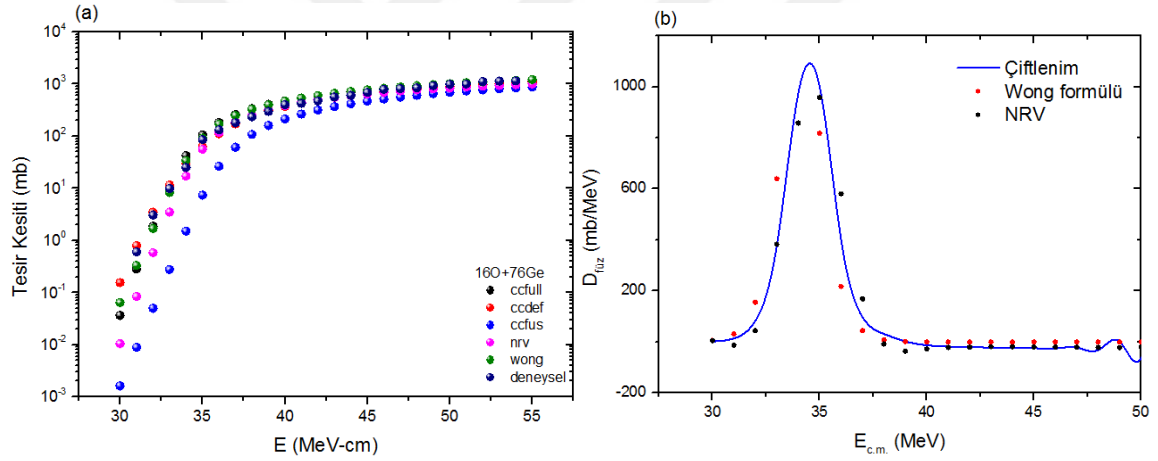
Şekil 4.2. (a) $^{16}O+^{70}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{70}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.3. (a) $^{16}O+^{72}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{72}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.4. (a) $^{16}O+^{74}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{74}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

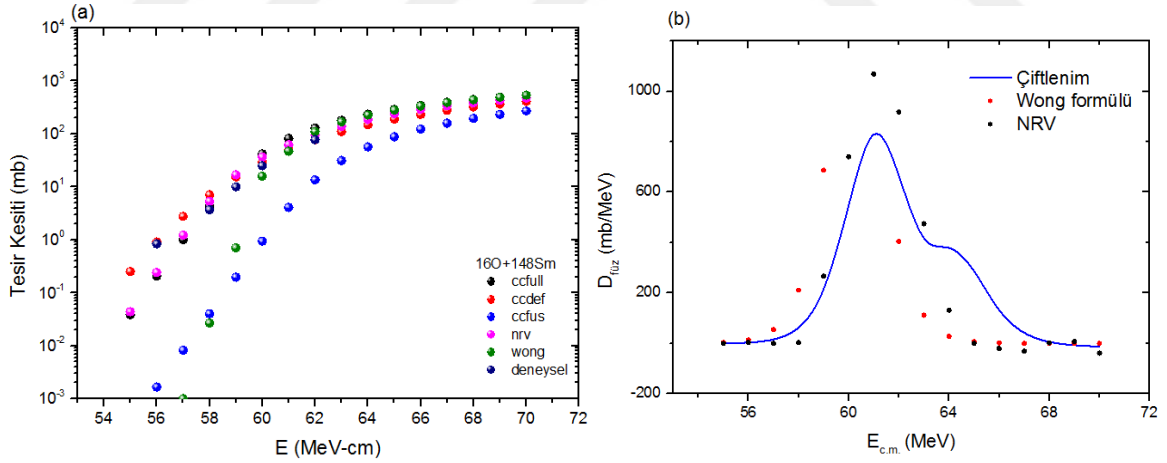


Şekil 4.5. (a) $^{16}O+^{76}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{76}Ge$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

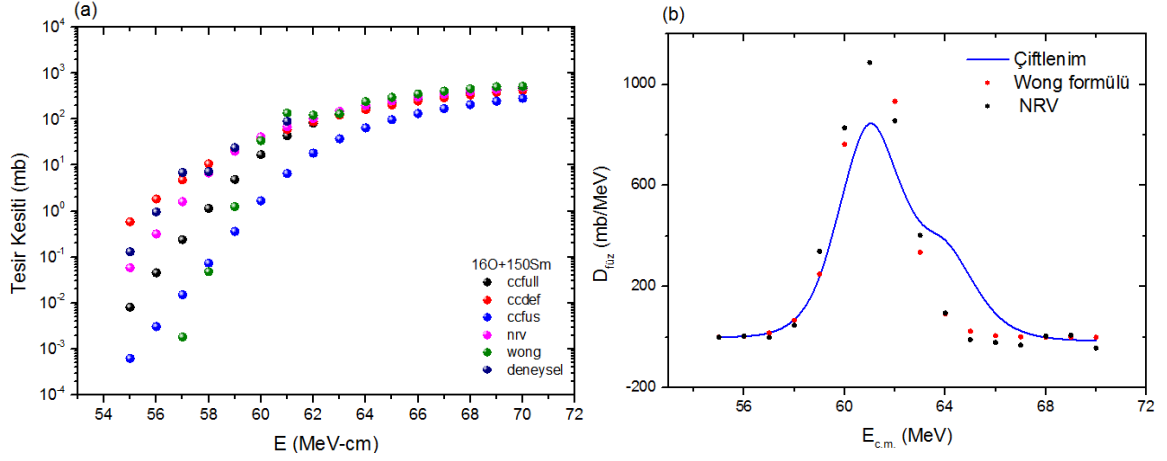
Şekil 4.2.(a), Şekil 4.3.(a), Şekil 4.4.(a) ve Şekil 4.5.(a) $^{16}O+^{70,72,74,76}Ge$ reaksiyon sisteminin füzyon tesir kesitlerini CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi ile 30-55 MeV-cm enerji aralığında sistematik olarak inceledik. Bu dört sistem literatürde hem deneysel hem de sadece CCDEF çiftlenmiş kanal hesaplama kodu ile 1995 yılında E. F. Aguilera ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [57]. Elde ettiğimiz veriler ile düşük enerji bölgesinde deneysel verilere en yakın sonuçlara CCFULL, CCDEF, NRV ve Wong formülünden elde ettiğimiz sonuçlar ile ulaştığımızı,

yüksek enerji aralığı bölgesinde ise CCFUS kodunun da deneysel veriler ile uyumlu hale geldiğini gözlemledik. CCFULL ve NRV hedef çekirdek için 2+ ve 3- durumların deformasyon parametrelerini hem de uyarılma enerjilerini kullanırken, gelen parçacık çekirdeği için CCFULL sadece 3- durum uyarılma enerjisi ve deformasyon parametresini kullanır. CCDEF kodunda ise hem hedef hem de gelen parçacık çekirdek deforme haldedir ve sadece gelen parçacık çekirdek için uyarılma enerjileri hesaba katılmaktadır. CCFUS verilerini uyum yakaladığımız skaladan ayıran fark ise sadece deformasyon parametrelerini kullanıp potansiyel parametresini kodun içine dahil etmemesidir.

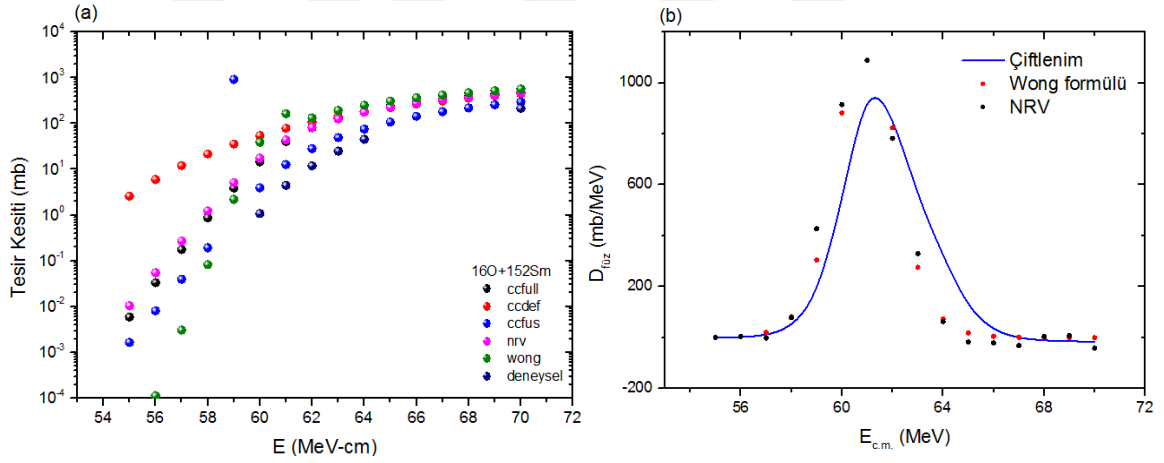
Şekil 4.2.(b), Şekil 4.3.(b), Şekil 4.4.(b) ve Şekil 4.5.(b) CCFULL ile (düz çizgi), Wong formalizmi ile (kırmızı daire) ve NRV(siyah daire) çiftlenim için hesaplanan füzyon engel dağılımını göstermektedir. Sonuçları incelediğimizde CCFULL ve NRV elde ettiğimiz çiftlenime ait engel dağılım eğrilerinin dört sistem içinde birbirleri ile uyumlu olduğunu gözlemledik, farklı hesaplamalar olmalarına karşın aynı parametreleri kullandıkları için öngördüğümüz sonucu elde ettik. Wong formülünden elde edilen eğride tek pik oluşturmuş, engel bölgesi dışında herhangi bir dalgalanma oluşturmamıştır. Her üç hesaplamada deneysel verileri elde etmek amacı ile kullanılabilir.



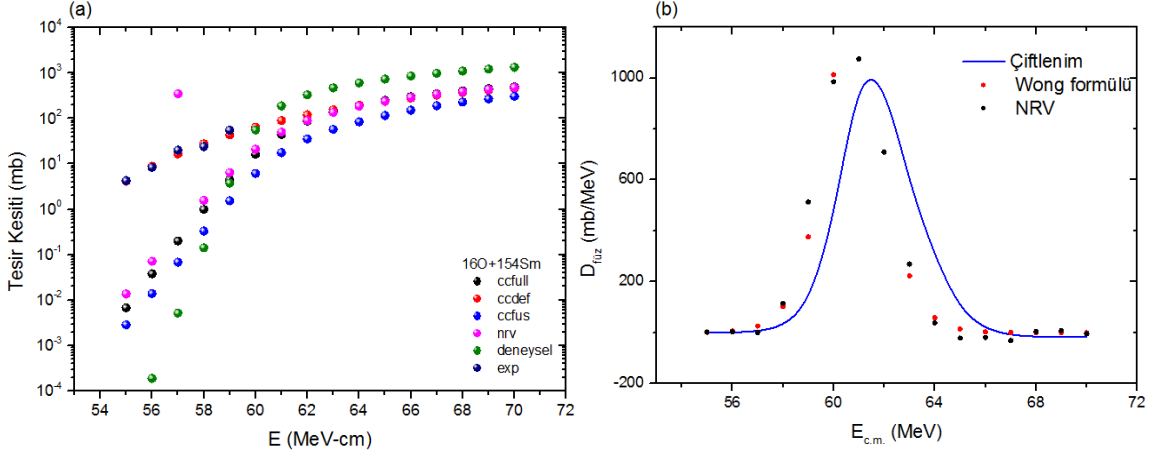
Şekil 4.6. (a) $^{16}O+^{148}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{148}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.7. (a) $^{16}O+^{150}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{150}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



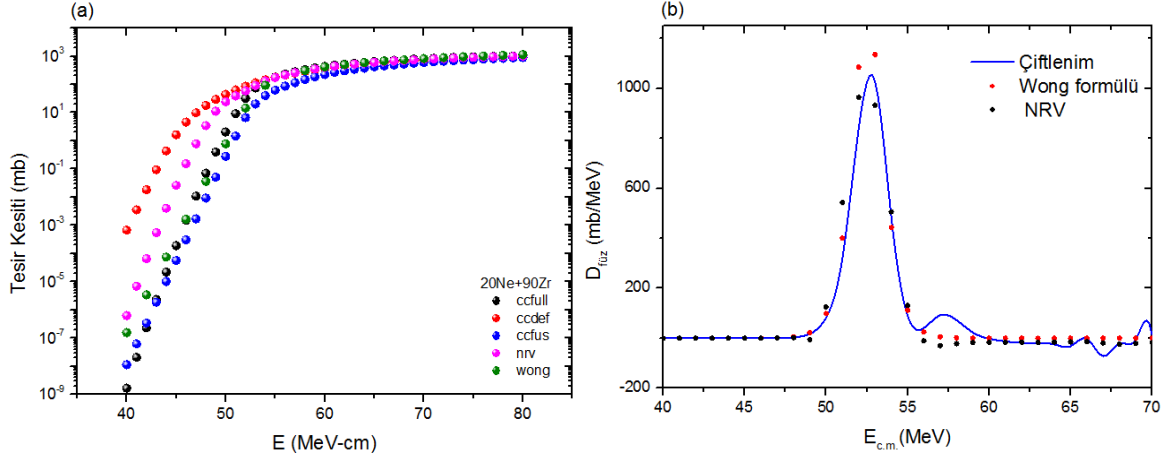
Şekil 4.8. (a) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



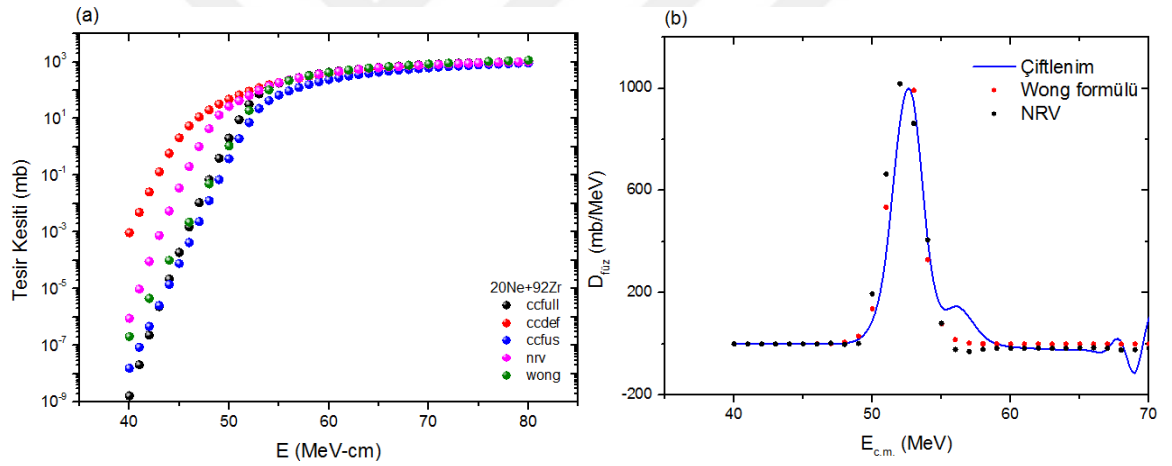
Şekil 4.9. (a) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{16}O+^{152}Sm$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

Şekil 4.6.(a), Şekil 4.7.(a), Şekil 4.8.(a) ve Şekil 4.9.(a) $^{16}O + ^{148,150,152,154}Sm$ füzyon uyarılması, saçılma potansiyelinin Coulomb ve yakınlık potansiyelinin toplamı olarak alınması ile tek boyutlu engel penetrasyon modeli kullanılarak CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile 55-70 MeV-cm enerji aralığında hesaplandı ve deneysel veriler [58] ile karşılaştırıldı. $^{16}O + ^{148-154}Sm$ reaksiyonları durumunda, hedef Sm çekirdeklerinin en kararlı küresel yarı sihirli 144Sm'den iyi deforme edilmiş 154Sm'ye kadar çok çeşitli deformasyon gösterdiği bilinmelidir. Engelin üstünde ve engel bölgesinde, CCFULL, CCDEF ve NRV; Wong tarafından geliştirilen basit tek boyutlu engel penetrasyon modeli, saçılma potansiyelini Coulomb ve yakınlık potansiyellerinin toplamı olarak kullanırken, ağır iyonların füzyon reaksiyonlarını çok iyi açıklamaktadır. Engelin altında daha büyük deformasyonlar, füzyon kesitlerinin büyük alt engel kuvvetlendirmesine karşılık gelmektedir.

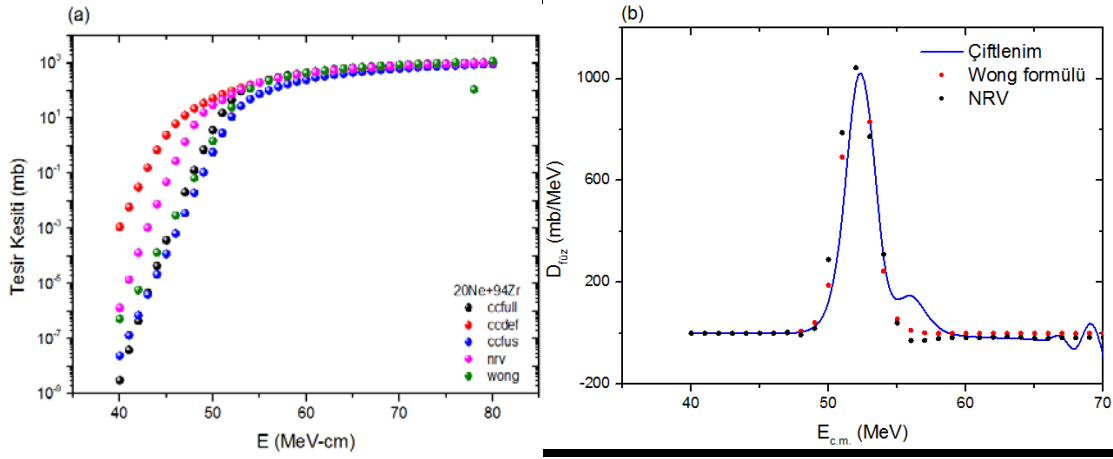
Şekil 4.6.(b), Şekil 4.7.(b), Şekil 4.8.(b) ve Şekil 4.9.(b) $^{148,150,152,154}Sm$ da engel dağılımının toplam genişliği, bir kolektif bandın ardışık üyeleri arasındaki çiftlenimin bu reaksiyonlarda önemli olduğunu düşündürmektedir. Beklenen zayıf çiftlenimlerin de dahil edilmesi koşuluyla, hesaplamamızda kabul edilen deformasyon parametreleri kullanılarak verilerin iyi bir şekilde temsil edilebileceği görülmektedir. Ayrıca, bir titreşim bandının birkaç üyesi arasındaki daha gerçekçi çiftlenim seçeneğinin benzer özellikler üretebilmesi de mümkündür. Ayrıca, dağılım eğrilerinin genişliklerini azaltmak istersek kanal sayılarını arttırmamız gerekmektedir.



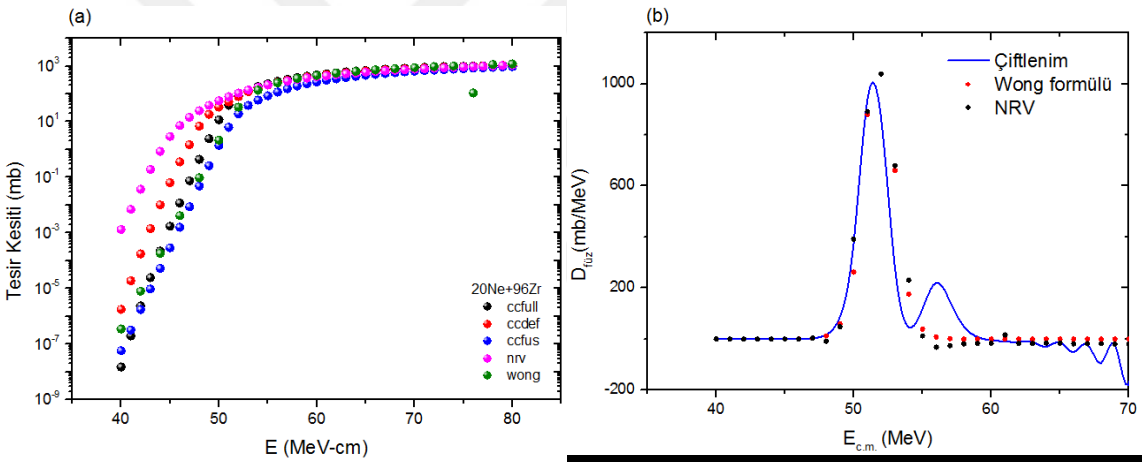
Şekil 4.10. (a) $^{20}\text{Ne}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.11. (a) $^{20}\text{Ne}+^{92}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{92}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.12. (a) $^{20}\text{Ne}+^{94}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{94}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

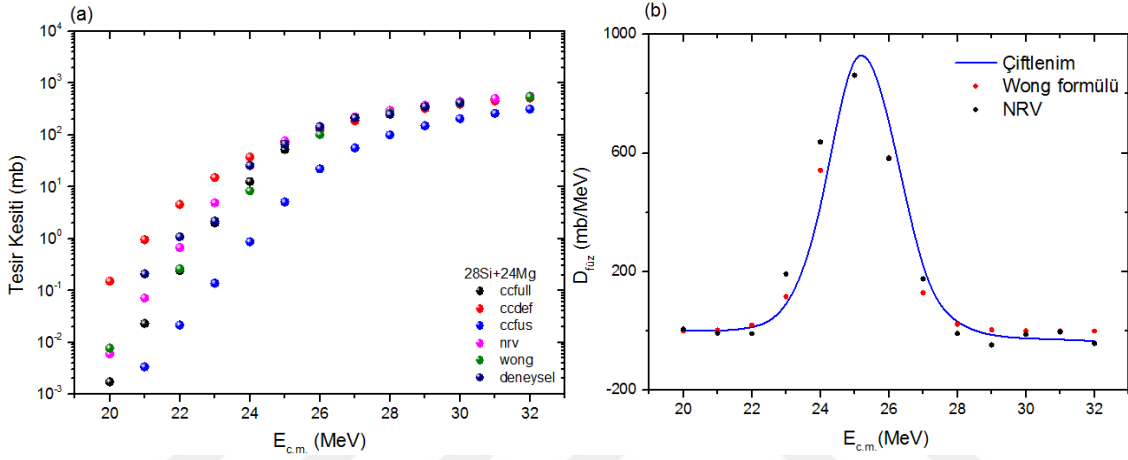


Şekil 4.13. (a) $^{20}\text{Ne}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

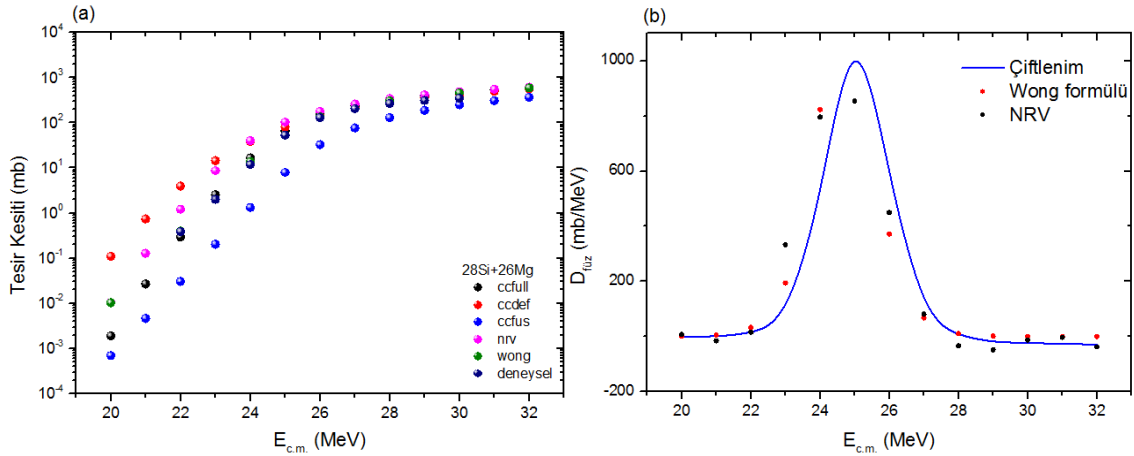
Şekil 4.10.(a), Şekil 4.11.(a), Şekil 4.12(a) ve Şekil 4.13.(a) $^{20}\text{Ne}+^{90,92,94,96}\text{Zr}$ reaksiyon sisteminin füzyon tesir kesiti reaksiyonlarını CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi ile 40-80 MeV-cm enerji aralığında inceledik. Bu dört sistem için literatürde herhangi bir deneysel ya da teorik çalışma mevcut değildir. Bu reaksiyonları çalışma amacımız deneysel verileri bulunmayan reaksiyonlar için teorik veriler üretmek literatüre katkıda bulunmaktır. Amacımız doğrultusunda elde ettiğimiz veriler ile engel potansiyel parametrelerinin altındaki potansiyel değerlerinde CCDEF ve NRV' den elde ettiğimiz veriler skalada uyum paralellliğinden uzak kalsa da

engel parametrelerine ulaştığımızda ve bu parametreleri aştığımızda tüm kodlardan ve Wong formalizminden elde ettiğimiz sonuçların aynı skalada ilerlediğini gözlemledik.

$^{20}\text{Ne} + ^{90,92,94,96}\text{Zr}$ reaksiyonları için engel dağılım eğrileri Şekil4.10.(b), Şekil4.11.(b), Şekil 4.12.(b) ve Şekil 4.13.(b)' de verilmiştir. Zr' nin tüm izotopları için yaklaşık olarak aynı dağılım gözlenmiş, çiftlenim iki pik, NRV tek pik, Wong formülasyonu da tek pik açığa çıkarmıştır. Çiftlenimde görülen dağılım sapmasını ortadan kaldırmak için bir potansiyel değişikliği yapılması gereklidir.



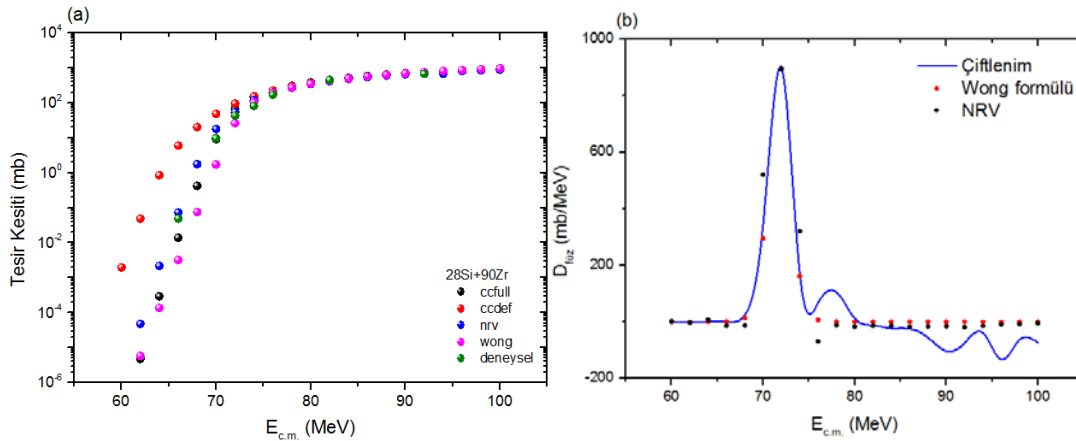
Şekil 4.14. (a) $^{28}\text{Si} + ^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si} + ^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



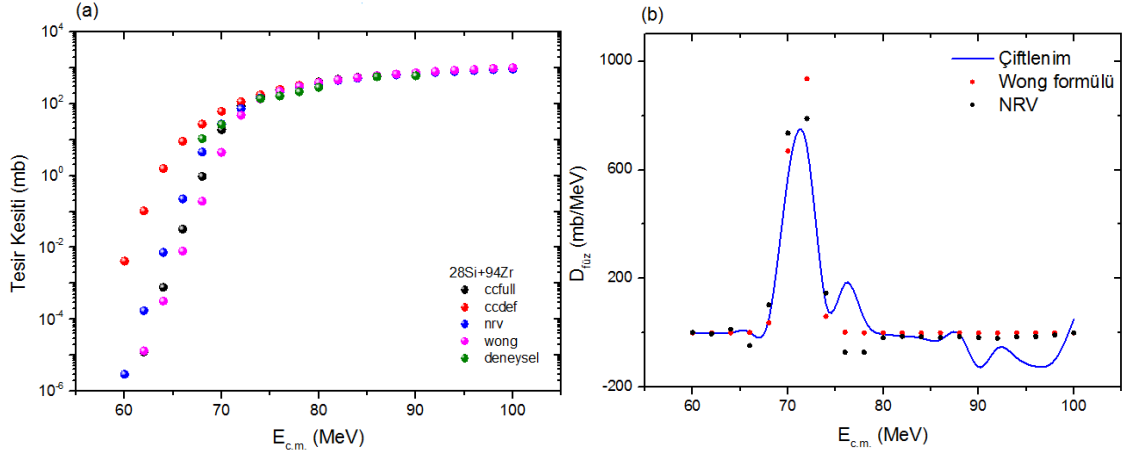
Şekil 4.15. (a) $^{28}\text{Si} + ^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si} + ^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

Şekil4.14.(a) ve Şekil4.15.(a)' da $^{28}\text{Si} + ^{24,26}\text{Mg}$ reaksiyonları füzyon tesir kesitleri 20-32 MeV-cm enerji aralığında CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile incelenmiştir, 1990 yılında A. Morsad ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [59] sonucunda elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmış, hangi kod yada kodların bu enerji aralığında deneysel verilere en yakın sonuçları ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. A. Morsad ve arkadaşları deneysel çalışmanın yanı sıra $^{28}\text{Si} + ^{24,26}\text{Mg}$ füzyon reaksiyonlarını CCFUS kodunun değiştirilmiş bir versiyonunu kullanarak birleştirilmiş kanallar hesaplamaları ile de gerçekleştirmişlerdir. Bu hesaplamaların amaçları doğrultusunda, Mg ve Si çekirdeklerinin statik bir deformasyona sahip olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçlara göre ise düşük enerji bölgesinde deneysel sonuçlara en yakın sonuçları CCFULL kodu ile elde ettiğimizi, engel bölgesine geldiğimizde ise CCDEF, NRV ve Wong formülasyonundan elde edilen sonuçlarında deneysel verilere karşı uyum içinde olduğunu gözlemledik.

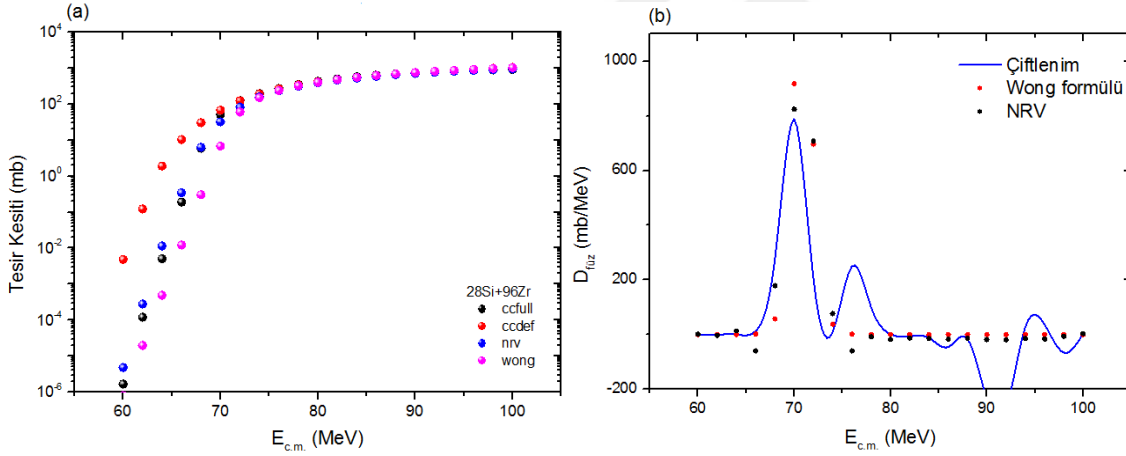
Şekil4.14.(b) ve Şekil4.15.(b)' de ise tanımlı reaksiyonlar için füzyon engel dağılımlarına ait verilerin grafikleri sunulmuştur. Grafikler, çiftlenim için hesaplanan füzyon bariyeri dağılımını (CCFULL ve NRV ile) ve Wong'un formülünü kullanarak yapılan hesaplama sonuçlarını gösterir. Çiftlenim dağılımlarının birbirine iyi yaklaştığını, Wong formülünden elde ettiğimiz dağılımında aynı paralellikte olduğunu görüyoruz. Hesaplamalarımızı üçü de deneysel verileri elde etmek için kullanılabilir nitelikte sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.16. (a) $^{28}\text{Si}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.17. (a) $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

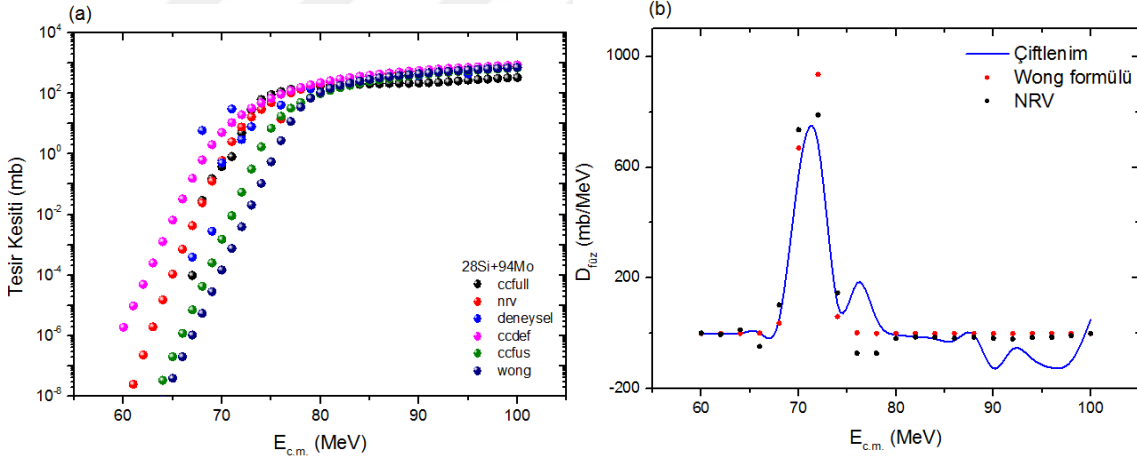


Şekil 4.18. (a) $^{28}\text{Si}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

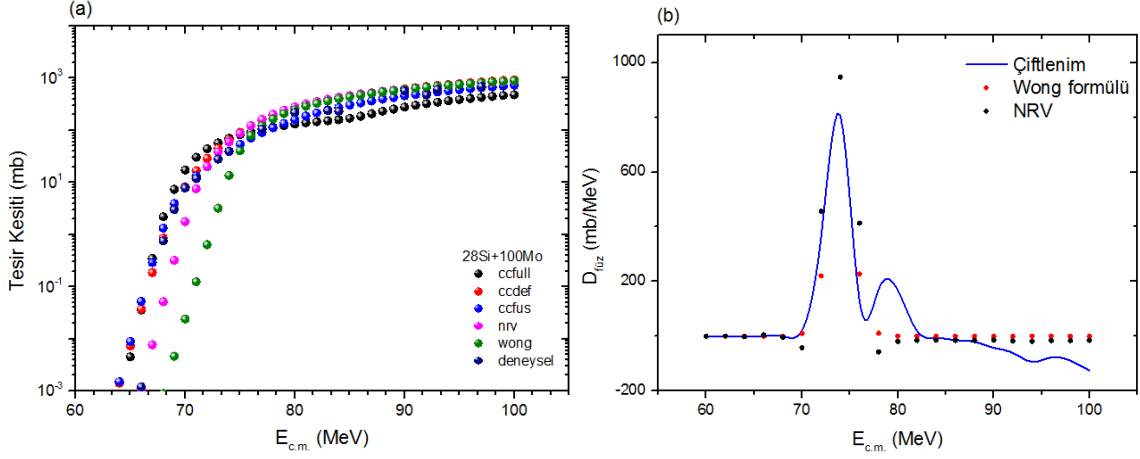
$^{28}\text{Si} + ^{90,94,96}\text{Zr}$ sistemleri için Coulomb engeli etrafındaki füzyon tesir kesitlerini CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile hesapladık ve sonuçları Şekil4.16.(a), Şekil4.17.(a), Şekil4.18.(a)' da sunulmuştur. Bu hesaplamalarda kullanılan iyon-iyon potansiyelleri, Akyüz-Winther (AW) potansiyelinin Woods-Saxon parametresidir. Üç reaksiyon sistemi için, teorik olarak hesaplanan tesir kesitleri, alt engel bölgesinde değerlendirildiğinde, CCFULL, NRV ve Wong hesaplamaları CCDEF ile karşılaştırıldığında büyüklük sırasına göre daha büyüktür. Engel bölgesine yaklaştığımız ve

aştığımız büyüklükteki parametrelerde ise tüm kodlar birbirleri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. $^{28}\text{Si} + ^{90,94}\text{Zr}$ deneysel olarak 2010 yılında Sunil Kalkal ve arkadaşları tarafından çalışılmış ve deneysel verileri literatüre sunulmuştur [60], aynı zamanda aynı çalışma içerisinde CCFULL kodu ile hesaplama yapmışlardır. Biz de Tablo 4.1., Tablo 4.4., Tablo4.3. te verdiğimiz parametreleri kullanarak çiftlenmiş kanal kodları ile hesaplamaları yaparak verileri elde ettik. Veriler ile kodların hem kendi içlerinde hem de deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar verdiğini gözlemledik. Hesaplamaların hepsi bu reaksiyon grubu için deneysel verilerin yokluğunda yada deney için uygun şartların bulunmadığı ortamlar için güvenilir niteliktedir.

Şekil 4.16.(b), Şekil 4.17.(b), Şekil 4.18.(b); tanımlı reaksiyonlar için engel dağılımlarını göstermektedir. Kullanılan CCFULL sürümü, çok çekirdekli veya çok yönlü durumları dahil etme seçeneği ile, hedef çekirdeğe iki ve gelen parçacığa bir uyarılmış durumların dahil edilmesine izin vermiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere tüm hesaplamalar aynı dağılımla birer pik vermiştir, engel dağılım verilerini güvenilir şekilde elde etmek için uygun hesaplamalardır.



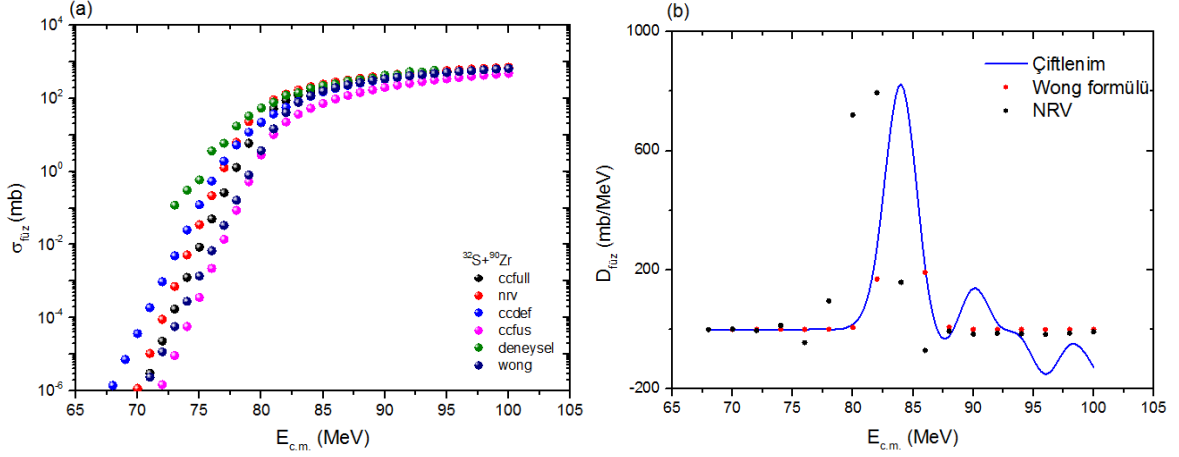
Şekil 4.19. (a) $^{28}\text{Si} + ^{94}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRv kodları ve Wong formalizmi ile füzyon kesiti hesaplamaları, (b) $^{28}\text{Si} + ^{94}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, NRv ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



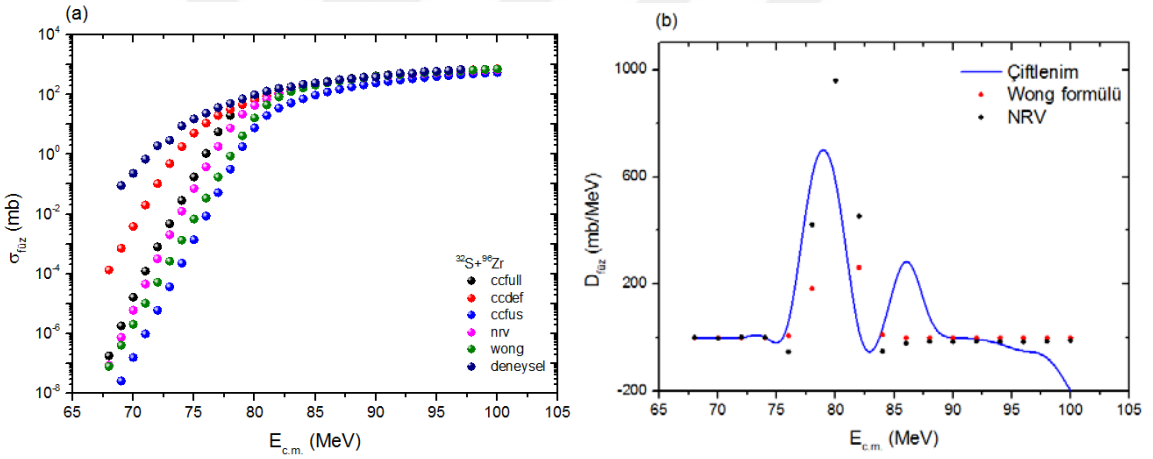
Şekil 4.20. (a) $^{28}\text{Si}+^{100}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{28}\text{Si}+^{100}\text{Mo}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

Seçilen sistemler için füzyon tesir kesitleri CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi kullanılarak hesaplandı ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak veriler Şekil 4.19.(a) ve Şekil 4.20.(a)' da karşılaştırıldı. Hedef çekirdeğin ve gelen parçacığın en düşük 2^+ ve 3^- durumlarının bir fonon uyarımı hesaplamaya dahil edildi. Bu iki reaksiyona ait deneysel çalışma ve deneysel çalışmanın yanında çiftlenmiş kanal yöntemi ile çalışma D. Ackermann ve ark. tarafından 1996 yılında yapılmıştır [61]. Bu çalışmadan aldığımız verileri kullanarak çiftlenmiş kanal kodları ile elde ettiğimiz verilerin deneysel veriler ile tüm enerji skalasında uyumlu olduğunu gözlemledik.

Şekil 4.19.(b) ve Şekil 4.20.(b)' de ise sitemlerin füzyon engel dağılım fonksiyonları grafiklendirildi. Engel dağılımlarında her iki reaksiyon içinde çiftlenim dağılımları engel enerjisini aştıktan sonra küçük piklenmeler gösterdi. Bu küçük dağılımların engellenmesi için, söz konusu potansiyel bölgesi için daha derin bir potansiyel değişikliği yapılması dağılımların sapmalarının engellenmesi için gereklidir. 90 MeV ve yukarısına baktığımızda tesir kesiti verilerinde de CCFULL uyum ekseninden daha aşağıya düşmektedir, dağılımda da aynı enerji bölgesinde bozulmalar görmekteyiz.



Şekil 4.21. (a) $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

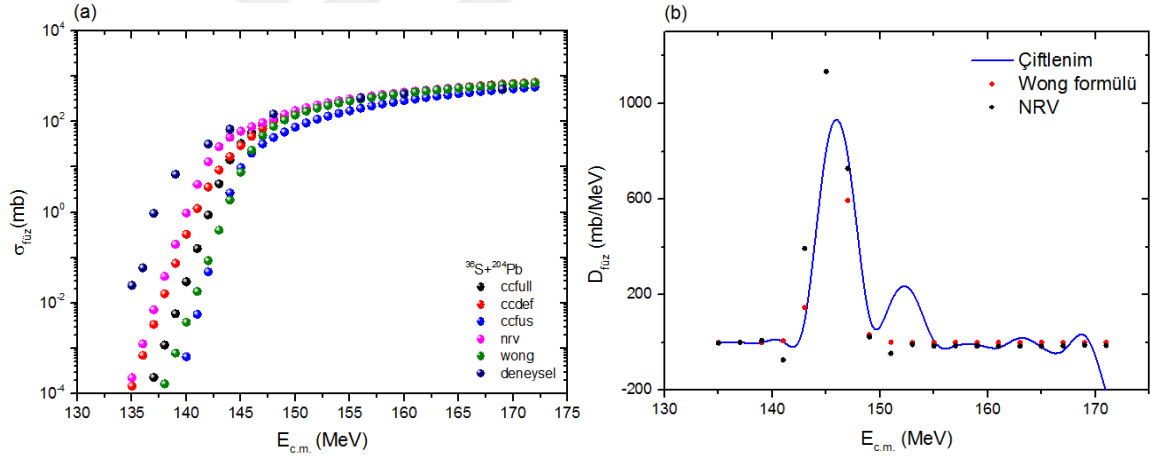


Şekil 4.22. (a) $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

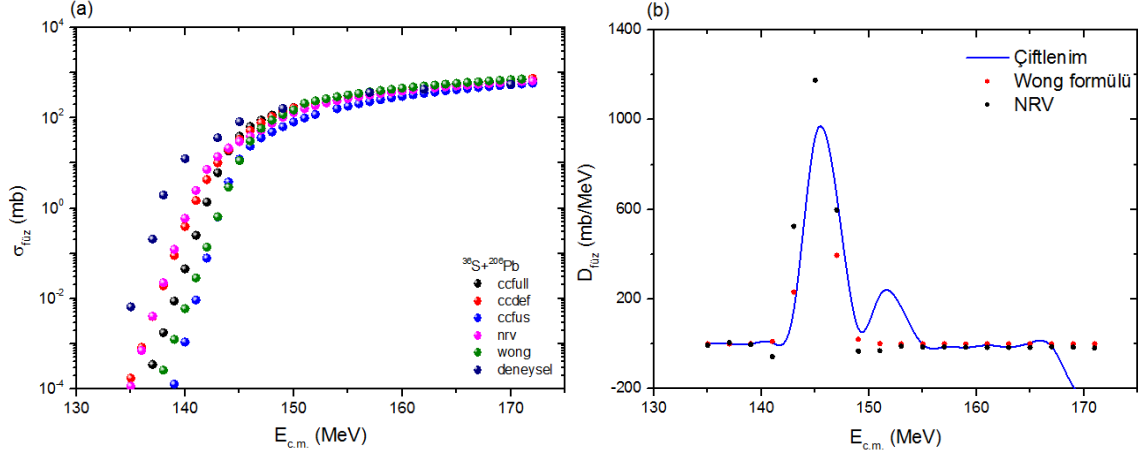
65-100 MeV-cm enerji aralığındaki reaksiyonları ile H. Q. Zhang ve arkadaşları tarafından 2010 yılında yapılan deneysel ve çiftlenmiş kanal kodlarından CCDEF ile yapılan çalışmayı [62] takiben teorik olarak tanımlamak için çiftlenmiş kanal (CC) hesaplamalarında CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi kullanılmıştır ve Şekil 4.21.(a), Şekil 4.22.(a) da tesir kesiti sonuçları grafiklendirilmiştir. Statik deformasyonların ve çekirdeğin yüzey titreşimlerinin neden olduğu füzyon geliştirme bu birleştirilmiş kanal hesaplamalarında iyi tanımlanmıştır. Burada, küçük enerji

adımlarıyla ve iyi istatistiksel doğrulukla gerçekleştirilen $^{32}\text{S} + ^{90,96}\text{Zr}$ 'nin engel parametreleri seviyesinde ve üstünde deneysel füzyon uyarma fonksiyonlarının ölçüm sonuçları için uyumlu veriler elde edilmiştir. Şekiller, deneysel füzyon uyarma fonksiyonlarının ve CC hesaplamalarının karşılaştırılmasını göstermektedir. $^{32}\text{S} + ^{90,96}\text{Zr}$ için füzyon uyarma fonksiyonları Coulomb engelini yakınında ve üstünde oldukça iyi doğrulukla hesaplanmıştır. CCDEF kodunda; deneysel verilerle hesaplama arasında iyi bir uyum kuadrapol ve oktopol titreşimlerine çiftlenimler eklenerek elde edilir.

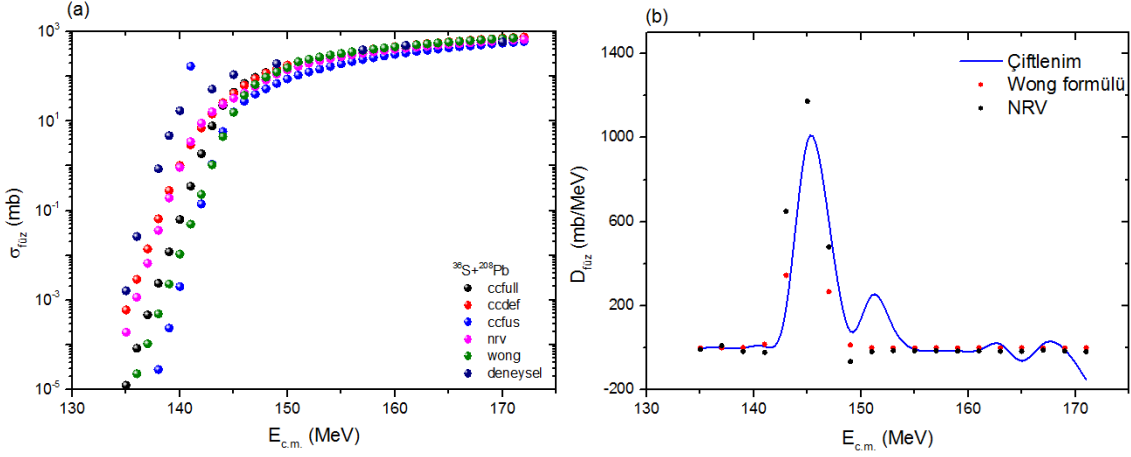
Şekil 4.21.(b) ve Şekil 4.22(b) de engel dağılımları sunulmuştur. Çiftlenim için engel dağılım potansiyelinde uygun bir pik gözlenirken NRV ve Wong sonuçları bu noktadan uzaklaşmış ve dağınık pikler vermiştir, bu noktada parametre değişikliğine gidilerek dağınıklıklar ortadan kaybolabilir. 85MeV ve 90 MeV üzerindeki çiftlenim eğrilerinin küçük salınımları, daha derin bir potansiyele ihtiyaç olduğunu gösterir.



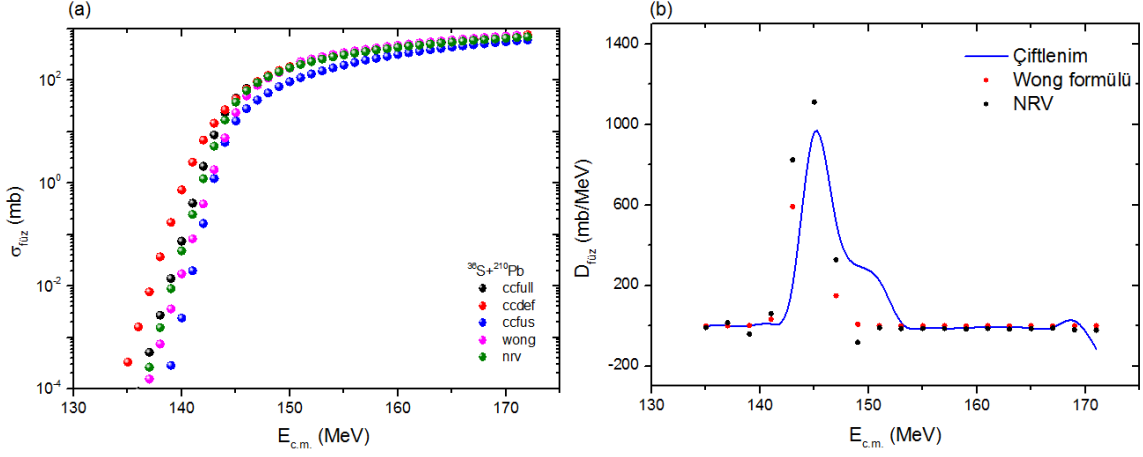
Şekil 4.23. (a) $^{36}\text{S} + ^{204}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{36}\text{S} + ^{204}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.24. (a) $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



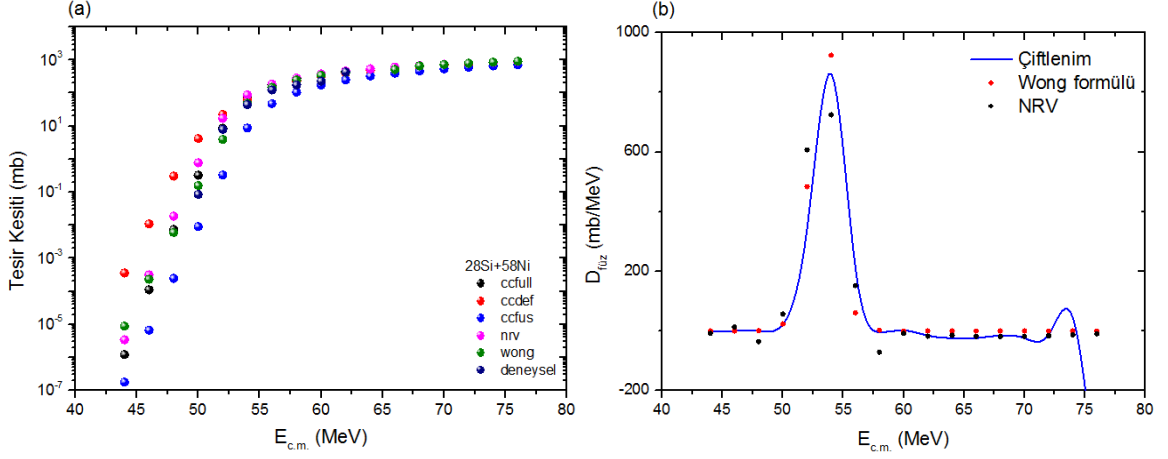
Şekil 4.25. (a) $^{36}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{36}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



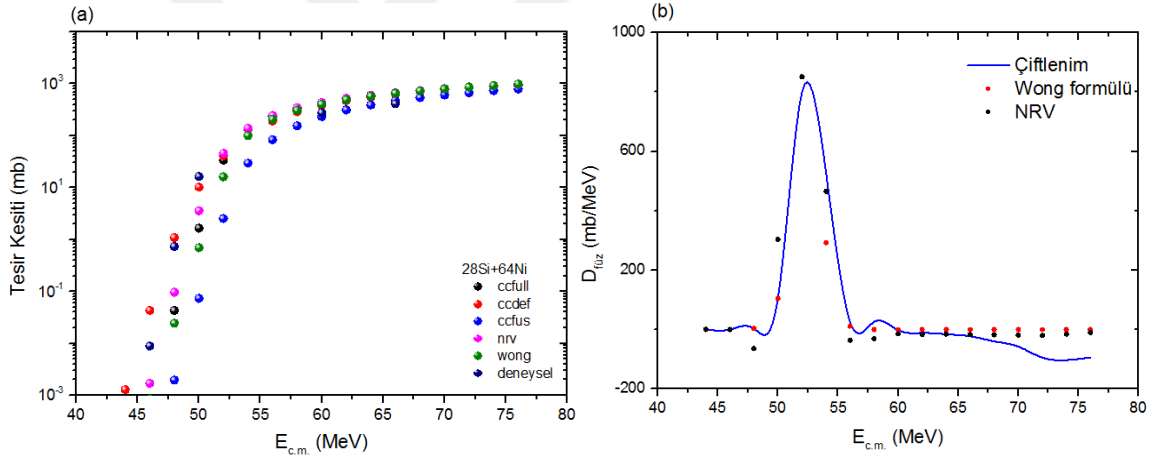
Şekil 4.26. (a) $^{36}\text{S}+^{210}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{36}\text{S}+^{210}\text{Pb}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

$^{36}\text{S} + ^{204,206,208,210}\text{Pb}$ reaksiyonları 135-175 MeV-cm enerji aralığında CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi kullanılarak çalışılmış, füzyon tesir kesitleri hesaplanmış, CCFULL ve deneysel verilerin bir arada verildiği J. Khuyagbaatur ve arkadaşları tarafından 2012 yılında yapılan çalışma [63] ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil4.23a, Şekil4.24a, Şekil4.25a, Şekil4.26a' da grafiklendirilmiştir. Her bir kod engel enerjisi ve üstünde birbirleri ile uyumlu sonuçlar vermiş fakat engele yakın bölgede deneysel sonuçlara en yakın sonuç üreten kod CCDEF ve NRV olmuştur. Bunun nedeni, daha titreşimli durumların bir araya gelmesi veya giriş kanalında artan bir yumuşaklık olabilir.

$^{36}\text{S} + ^{204,206,208,210}\text{Pb}$ reaksiyonları için engel dağılımları çiftlenim (CCFULL), NRV ve Wong formülasyonu ile hesaplanmış ve hesaplamalar Şekil 4.23.(b), Şekil 4.24.(b), Şekil 4.25.(b), Şekil 4.26.(b)' de birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çiftlenim engel dağılım hesaplamalarında (CCFULL ve NRV), tüm reaksiyonlar için en düşük durumlar, yani 2+ ve 3- durumları işlenmiştir. Tüm reaksiyonlarda üç hesaplama için tam engel potansiyeli değerinde bir pik gözlenirken, CCFULL ile yapılan hesaplamalarda engeli geçtikten sonra da küçük ve istenmeyen bir pik gözlenmiştir. Dağılım eğrisinin genişliğini azaltmak için kanal sayısı artırılmalı, engel potansiyelini geçtikten sonra görülen küçük pikleri ortadan kaldırmak için ise potansiyel parametresini arttırmalıyız.



Şekil 4.27. (a) $^{28}\text{Si}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

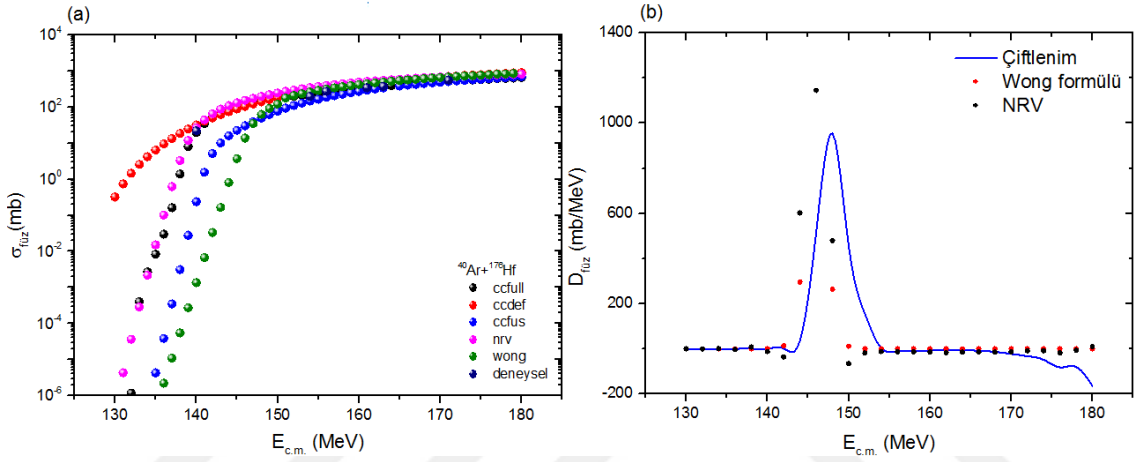


Şekil 4.28. (a) $^{28}\text{Si}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{28}\text{Si}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

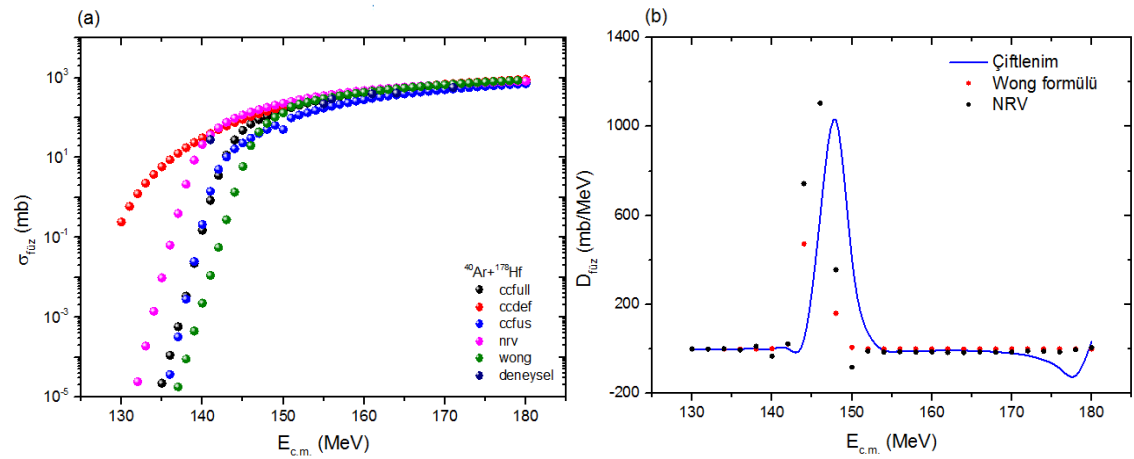
$^{28}\text{Si} + ^{58,64}\text{Ni}$ reaksiyon sisteminin füzyon tesir kesiti hesaplamalarını CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi ile 45-75 MeV-cm enerji aralığında inceledik. Elde ettiğimiz füzyon tesir kesitlerini Şekil 4.27.(a) ve Şekil 4.28.(a) da grafiklendirdik. Bu reaksiyonları çalışmak için motivasyonumuz literatürde tezin kapsamında olan çiftlenmiş kanal kodları ile ilgili teorik bir çalışma bulunmamasıdır. Tablo1,2,3 te verilen gerekli parametreler kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve kodlar arasındaki uyum gösterilmiştir. Her iki reaksiyon için de deneysel veriler [13] kaynağından

alınmış ve engele yaklaştıkça verilerin çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizminden elde edilen verilere özellikle CCFULL ile tam uyum, CCDEF ve NRV kodundan elde ettiğimiz veriler ile yakın paralellikte olduğu gözlemlenmiştir.

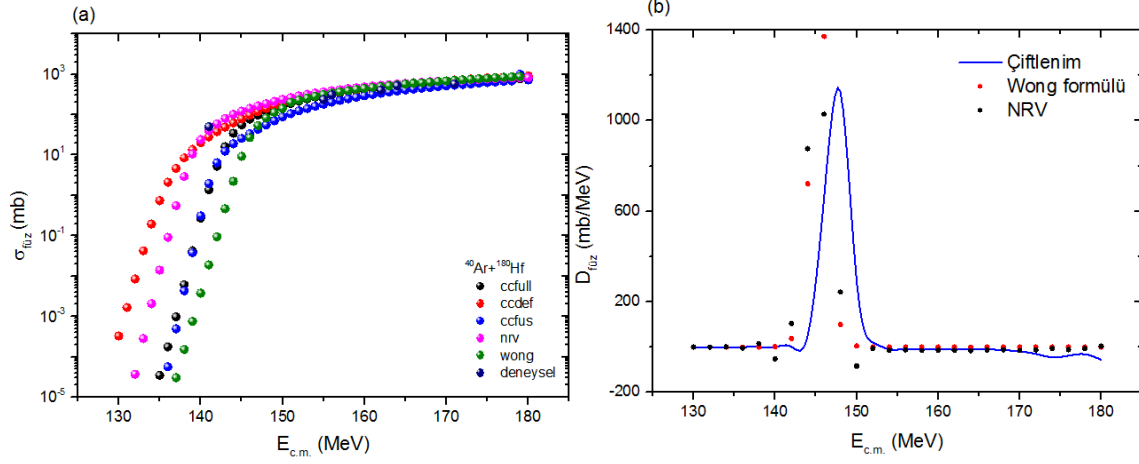
Şekil 4.27.(b) ve Şekil 4.28.(b) de ise $^{28}\text{Si}+^{58,64}\text{Ni}$ reaksiyonlarını engel dağılımları gösterilmiştir. $^{28}\text{Si}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu engel potansiyeli $V_b=53,30\text{MeV}$, $^{28}\text{Si}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için $V_b=52,33\text{MeV}$ dir. Dağılım eğrileri üç hesaplama içinde aynı davranışı sergilemektedir, deneysel engel dağılımları yokluğunda güvenilir sonuçlar vermektedir.



Şekil 4.29. (a) $^{40}\text{Ar}+^{176}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{40}\text{Ar}+^{176}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



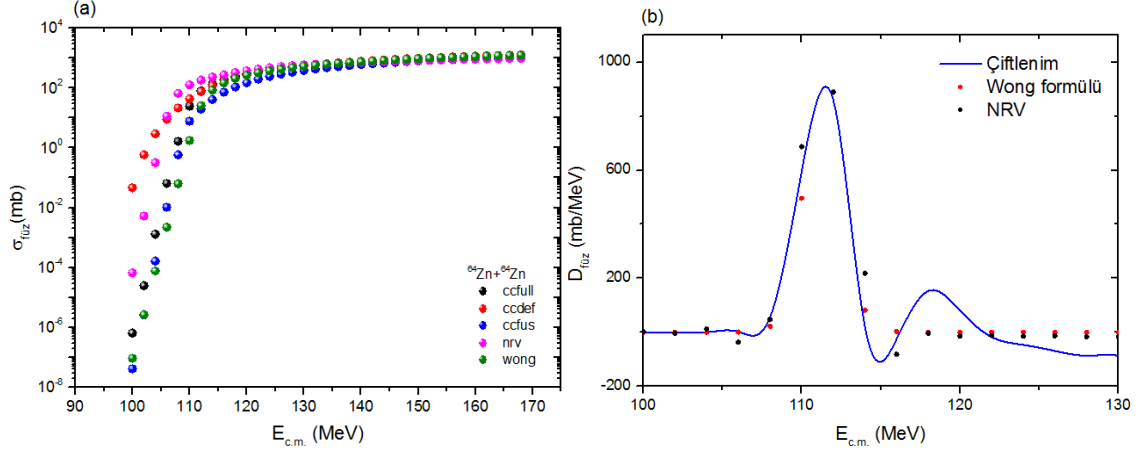
Şekil 4.30. (a) $^{40}\text{Ar}+^{178}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{40}\text{Ar}+^{178}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



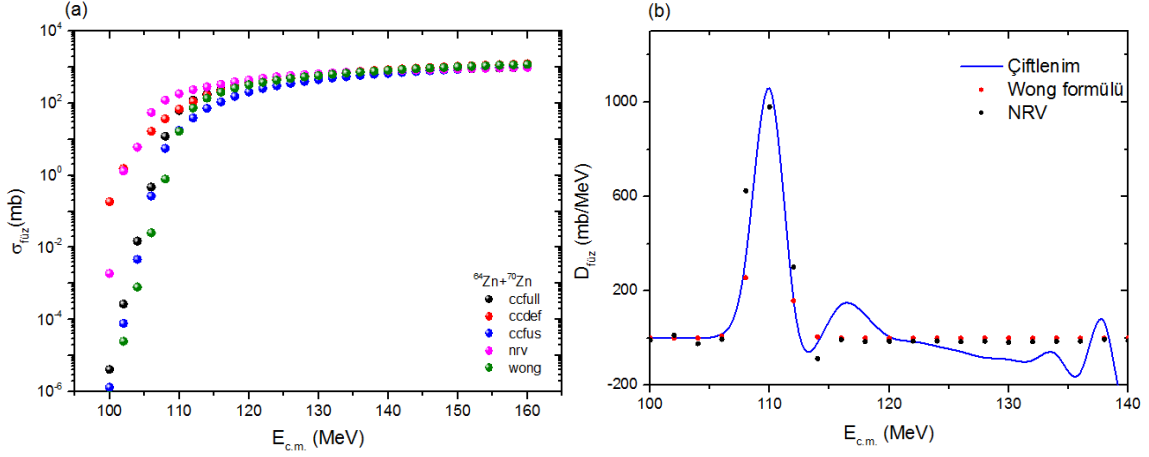
Şekil 4.31. (a) $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{Hf}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

$^{40}\text{Ar} + ^{176,178,180}\text{Hf}$ reaksiyonları için çiftlenmiş kanal hesaplamalarının sonuçları (CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları) ve Wong formalizminden elde edilen veriler deneysel verilerle Şekil 4.29.(a), Şekil 4.30.(a) ve Şekil 4.31.(a)' da karşılaştırıldı. Tüm çiftlenmiş kanal kod hesaplamalarında çizgiler, gelen parçacık ve hedef çekirdeklerdeki titreşimsel bağlantıların hesaplarını temsil eder. Derinlik parametresi V_0 ve yüzey yayılma parametresi a_0 (Wood-Saxon potansiyelleri arasında), hesaplanmış ve değerler Tablo 4.1.'de gösterilmiştir. Kodlar, tüm reaksiyonlar için en düşük durumları, yani 2^+ ve 3^- durumlarını içermektedir. Çiftlenmiş kanal hesaplamalarının sonuçları deneysel veriler ile [64] karşılaştırılmıştır. Hesaplanan tesir kesitleri deneysel veriler ile iyi bir uyum göstermektedir. Parametreler titizlikle hesaplanırsa, deneysel sonuca en uygun olan veriler bu kodlarla elde edilir. CCDEF kodu ile elde edilen verilerin ortak skalasının dışında kalıyor olmasının sebebi gelen parçacığın ve hedef parçacığın ikisinin de deforme olmalarıdır.

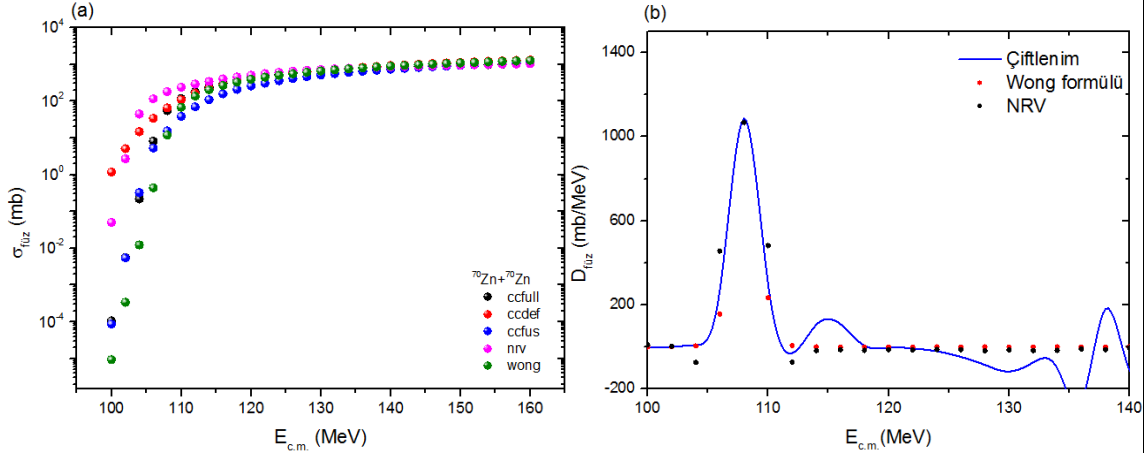
Şekil 4.29.(b), Şekil 4.30.(b) ve Şekil 4.31.(b)' de füzyon engel dağılımları hesaplamaları (çiftlenmiş) grafiklendirilmiştir. NRV hesaplaması için veriler beklenen bölgede engel potansiyelinde, (sırası ile engel yükseklikleri; 148.35MeV, 148.01MeV, 147.68MeV dir.) pik gösterirken CCFULL ve Wong ile elde edilen(çiftlenmiş) eğrisi bölgeden çok az da olsa uzakta kalmıştır. Hesaplamalarda potansiyel parametresi değiştirilerek eğri bölgesini geriye kaydırıp diğer hesaplamalar ile uyum yakalanabilir.



Şekil 4.32. (a) $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



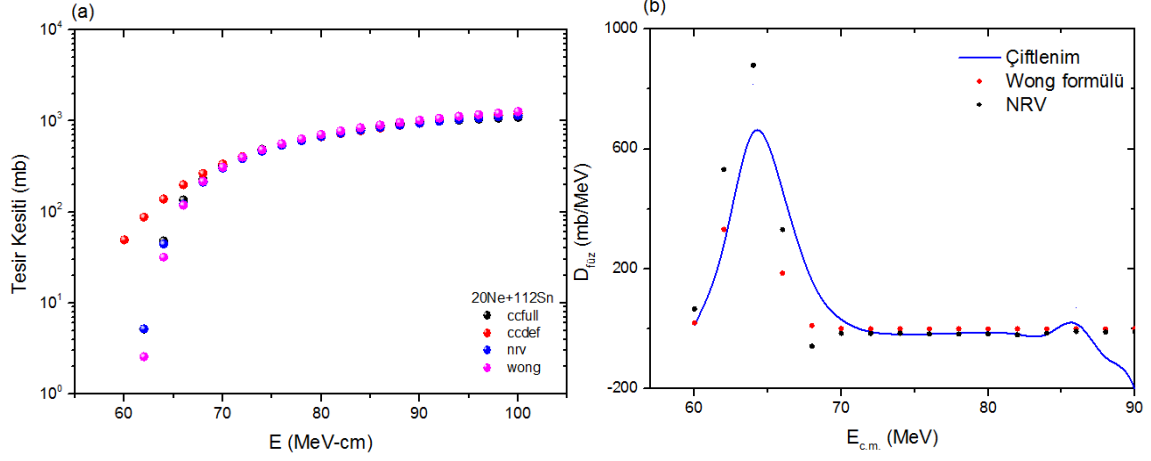
Şekil 4.33. (a) $^{64}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{64}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



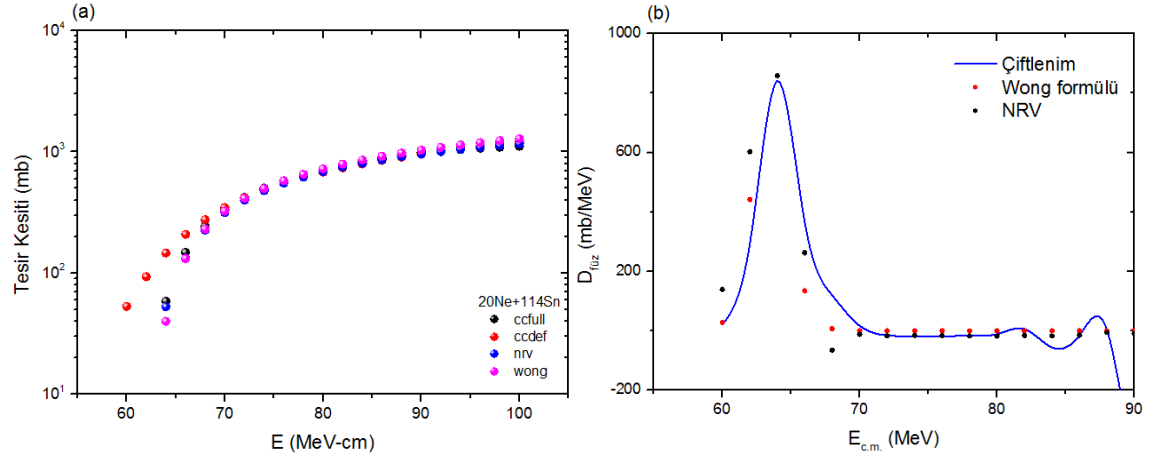
Şekil 4.34. (a) $^{70}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{70}\text{Zn}+^{70}\text{Zn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

$^{64}\text{Zn} + ^{64}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn} + ^{70}\text{Zn}$, $^{70}\text{Zn} + ^{70}\text{Zn}$ reaksiyon grubu, iki farklı çinko izotopu tarafından oluşturulan çapraz reaksiyonları karşılaştırır ve gelen parçacık ile hedef parçacık arasında hiçbir Coulomb farkı olmayan, gelen parçacık ve hedef parçacık arasında izospin asimetri farkı gösteren bir dizi reaksiyon üretir. Bu reaksiyon seti Z sabitini tutar, ancak değişen reaktif kütle A ile asimetriyi değiştirir. Bu reaksiyon setini çalışma motivasyonumuz literatürde füzyon reaksiyon tesir kesiti deneysel değerlerinin olmaması bu sebeple teorik bir çalışma ile reaksiyonların tesir kesitleri hakkında bilgi sahibi olmaktır. Engel potansiyel değerleri sırası ile 108.12MeV, 109.85MeV, 111.41 MeV dir. Şekil 4.32(a), Şekil 4.33.(a) ve Şekil 4.34.(a) bu parametrelere göre değerlendirildiğinde tüm hesaplamaların yaklaşık olarak engel bölgesinde ve engeli aştığı noktada birbirleri ile çok iyi uyum gösterdiklerini görmekteyiz.

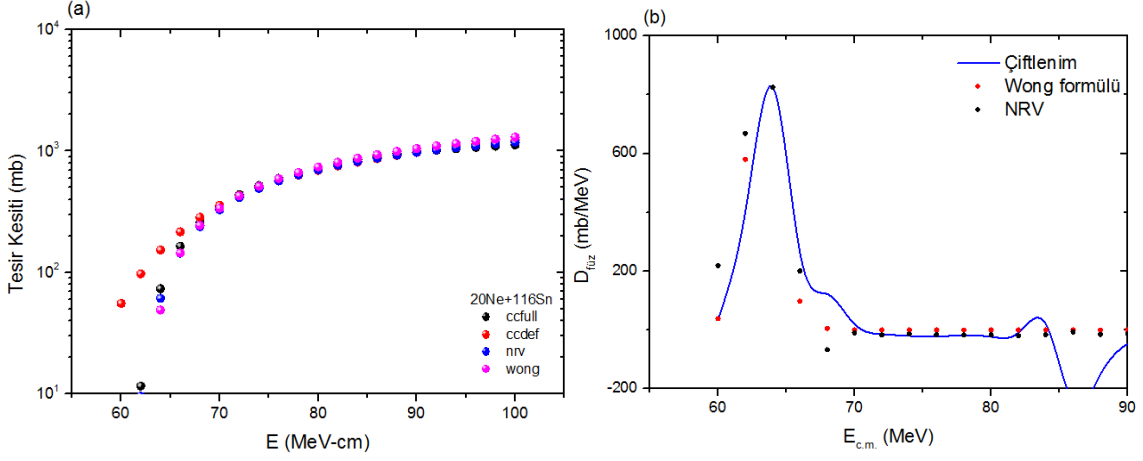
Şekil 4.32.(b), Şekil 4.33.(b) ve Şekil 4.34.(b)' de ise tanımlı reaksiyonlar için engel dağılım fonksiyonlarına ait grafikler verilmiştir. Grafikleri incelediğimizde CCFULL ve NRV sonuçlarının birbirleri ile uyum içinde olduğunu görüyoruz. Her iki hesaplamada çiftlenim etkilerini hesaba katmaktadır. Wong formalizminden elde edilen sonuçlarda aynı engel enerjisinde pik açığa çıkarmıştır. Uyarılmış durumların CCFULL içine sonlu uyarım enerjileriyle dahil edilmesinin etkisi, ortalama füzyon engel enerjisini, bir miktar azaltmaktadır. Bu da bir polarizasyon etkisi olarak yorumlanabilir.



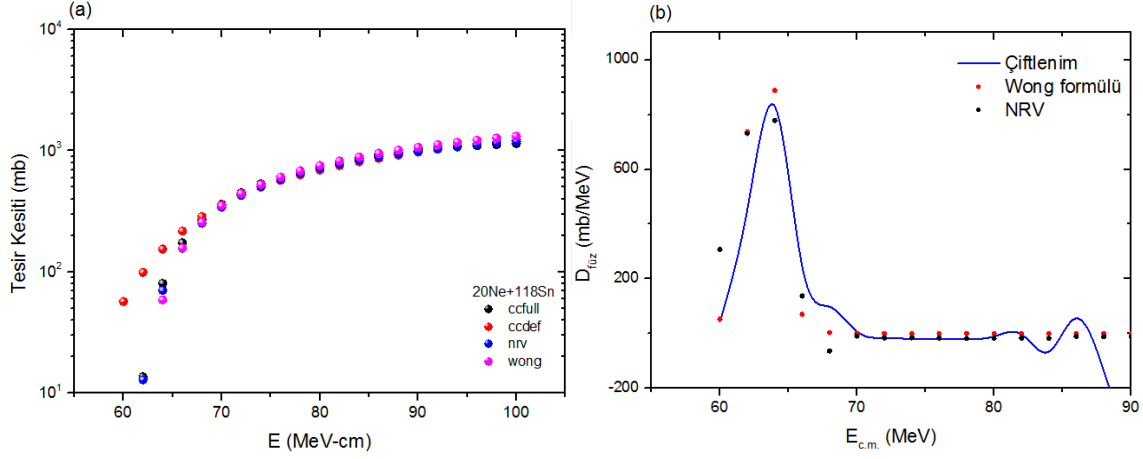
Şekil 4.35. (a) $^{20}\text{Ne}+^{112}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{112}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



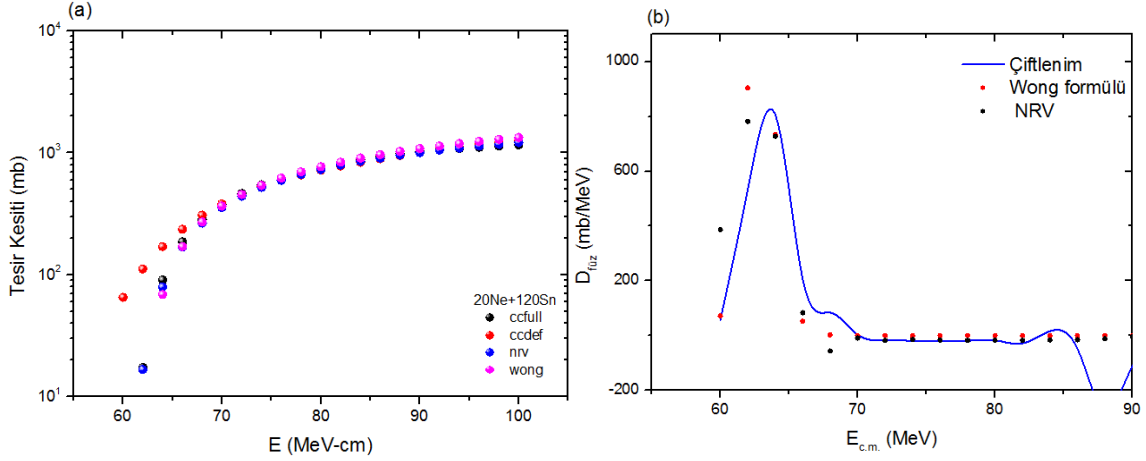
Şekil 4.36. (a) $^{20}\text{Ne}+^{114}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{114}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.37. (a) $^{20}\text{Ne}+^{116}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{116}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



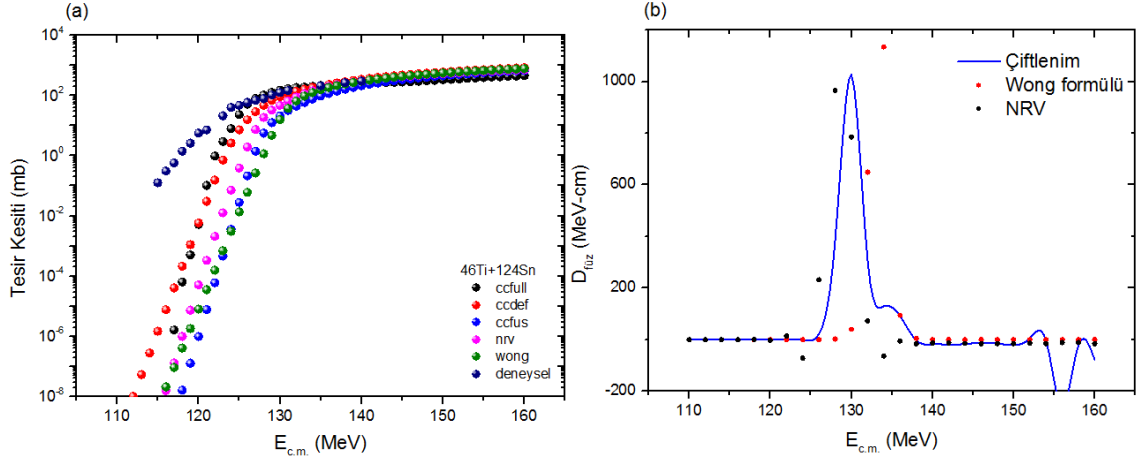
Şekil 4.38. (a) $^{20}\text{Ne}+^{118}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{118}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



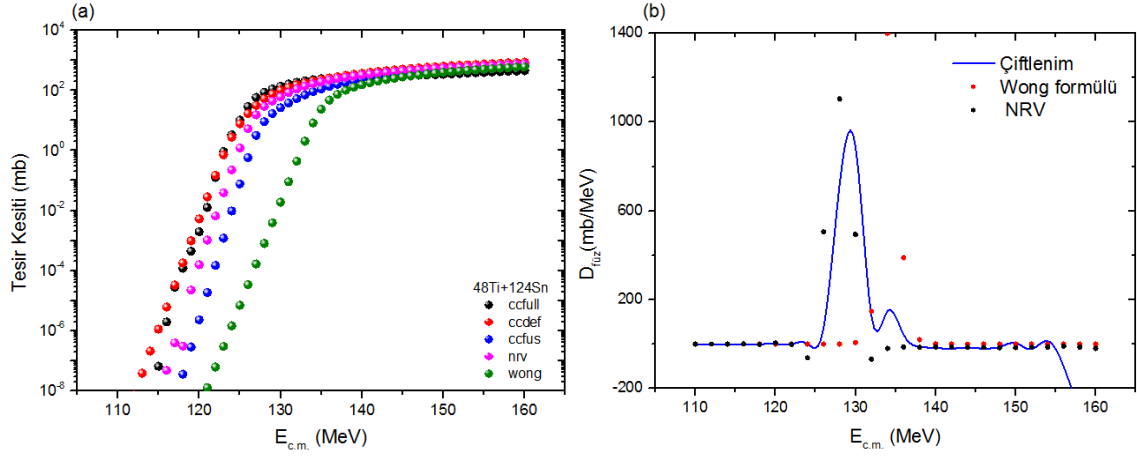
Şekil 4.39. (a) $^{20}\text{Ne}+^{120}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{20}\text{Ne}+^{120}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

$^{20}\text{Ne} + ^{112,114,116,118,120}\text{Sn}$ reaksiyon sisteminin füzyon reaksiyonlarını CCFULL, CCDEF, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi ile 60-100 MeV-cm enerji aralığında inceledik. Bu beş reaksiyon için literatürde ne deneysel ne de herhangi bir teorik bulgu mevcut değildir. Amacımız bu reaksiyonlara ait füzyon tesir kesitleri hakkında bilgi elde etmek oldu. Hedef çekirdekte $A=112, 114, 116, 118, 120$ için engel parametre değerleri sırası ile 63.78MeV, 63.55MeV, 63.32MeV, 63.10MeV, 62.89MeV olarak belirlendi. Bu bilgiler ışığında elde ettiğimiz verileri incelediğimizde engelin hemen altındaki bölge hariç çalışılan enerji aralığında tüm kodların birbirleri ile çok iyi uyum içinde olduğunu gözlemledik.

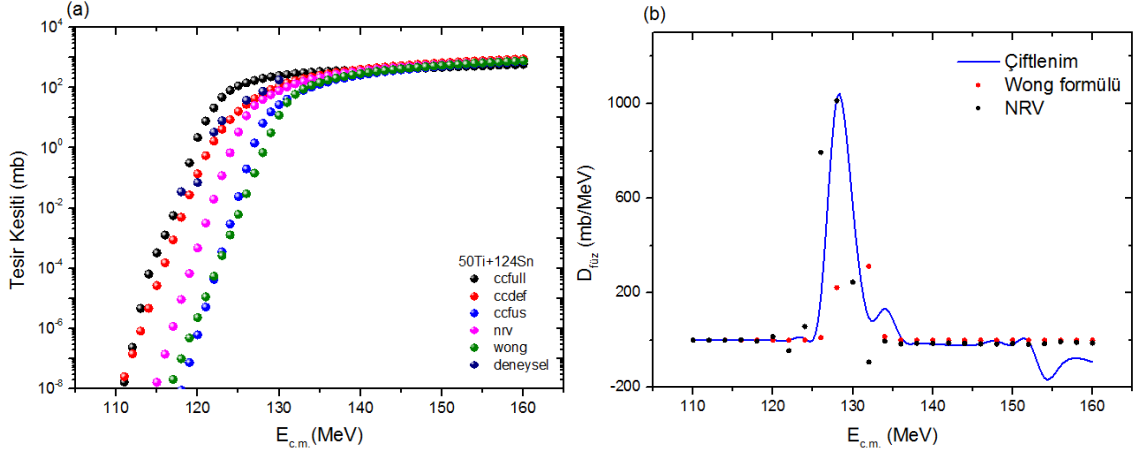
$^{20}\text{Ne} + ^{112,114,116,118,120}\text{Sn}$ için engel dağılımlarının, CCFULL birleşik kanal kodu, NRV kodu ve Wong formülasyonu kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalarla bir karşılaştırmasını Şekil4.35b, Şekil4.36b, Şekil4.37b, Şekil4.38b ve Şekil4.39b grafikleştirdik. Dağılımların şekilleri bazı izotopik etkiler gösterir. Daha da önemlisi, beşli reaksiyon grubu için çiftlenim (NRV, CCFULL) ve Wong formalizmi arasındaki bir karşılaştırma, hesaplamaların Wong formülasyonundan çok daha yapılandırılmış olması bakımından farklılıklar göstermektedir. Çiftlenmiş kanal kodları ile elde edilen çiftlenim-NRV eğrileri ise engel bölgesinde birbirleri ile uyumlu dağılımlar göstermiştir.



Şekil 4.40. (a) $^{46}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesisir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{46}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



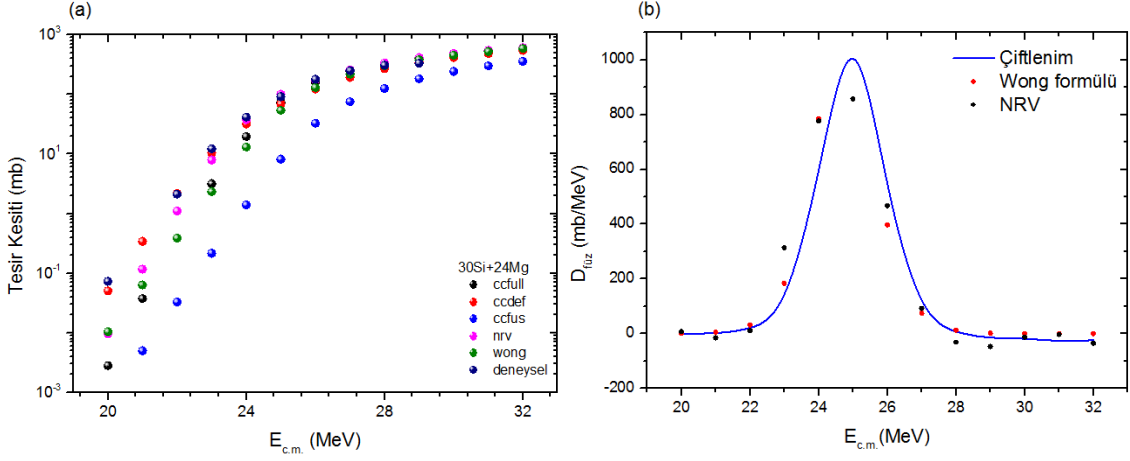
Şekil 4.41. (a) $^{48}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesisir kesiti hesaplamaları, (b) $^{48}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



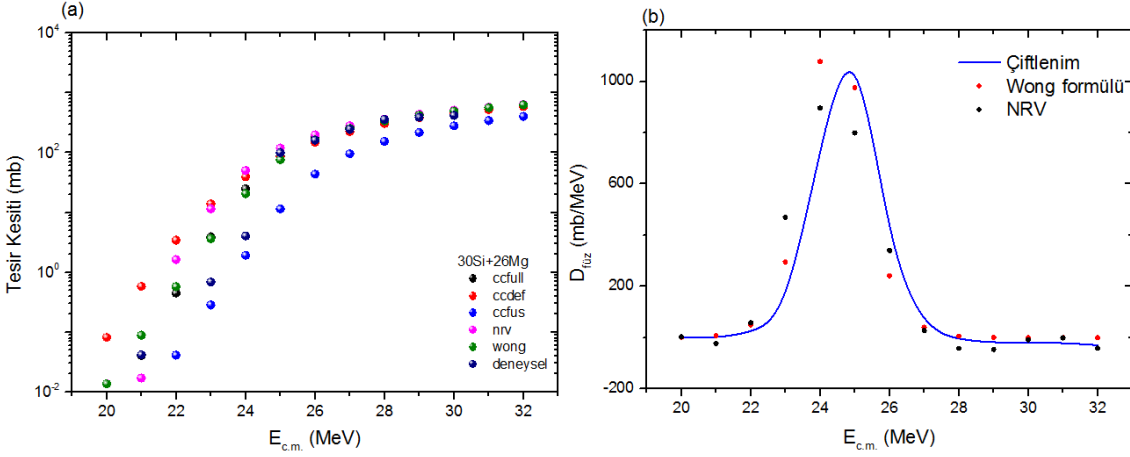
Şekil 4.42. (a) $^{50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

Grafikler, füzyon tesir kesitlerini $^{46,48,50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ için kütle merkezinin enerjisinin bir fonksiyonu olarak sunmaktadır. $^{46,48,50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ reaksiyonlarının çiftlenmiş kanal hesaplamalarını karşılaştırmak için CCFULL kodu ve deneysel verileri içeren, J.F. Liang ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yapılmış olan çalışma kullanılmıştır [65]. Engelin altındaki enerji değerlerinde CCDEF, CCFULL ve deneysel veriler iyi uyum gösterirken engel üstünde tüm kodlar birbirleri ile ve deneysel veriler iyi gayet iyi uyum sağlamıştır.

Reaksiyon mekanizmalarını daha iyi anlamak için, $^{46,48,50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ için engel dağılımları, Wong formülü kullanılarak kesit ürün ve enerjisinin ikinci türevi alınarak elde edilmiştir. Engel dağılımları Şekil 4.40.(b), Şekil 4.41.(b) ve Şekil 4.42.(b)' de gösterilmiştir. NRV ve CCFULL hesaplamalarından gelen engel dağılımlarına baktığımızda aynı eksen ve birbirleri ile uyumlu olduklarını görüyoruz. 3 reaksiyon grubu içinde Wong formalizmi CCFULL ve NRV engelinden biraz daha yüksek olan engel dağılımında bir zirveye yol açmıştır.



Şekil 4.43. (a) $^{30}\text{Si}+^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{30}\text{Si}+^{24}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

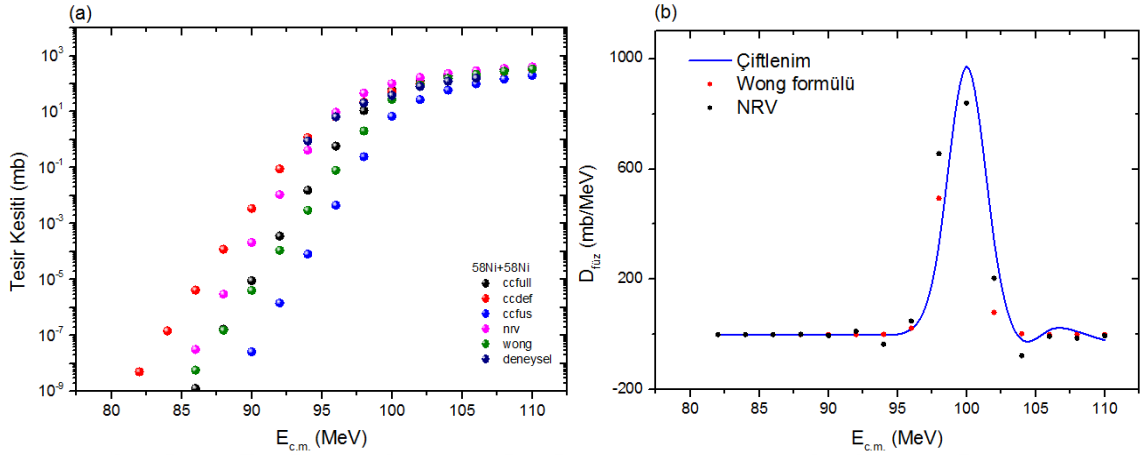


Şekil 4.44. (a) $^{30}\text{Si}+^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{30}\text{Si}+^{26}\text{Mg}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

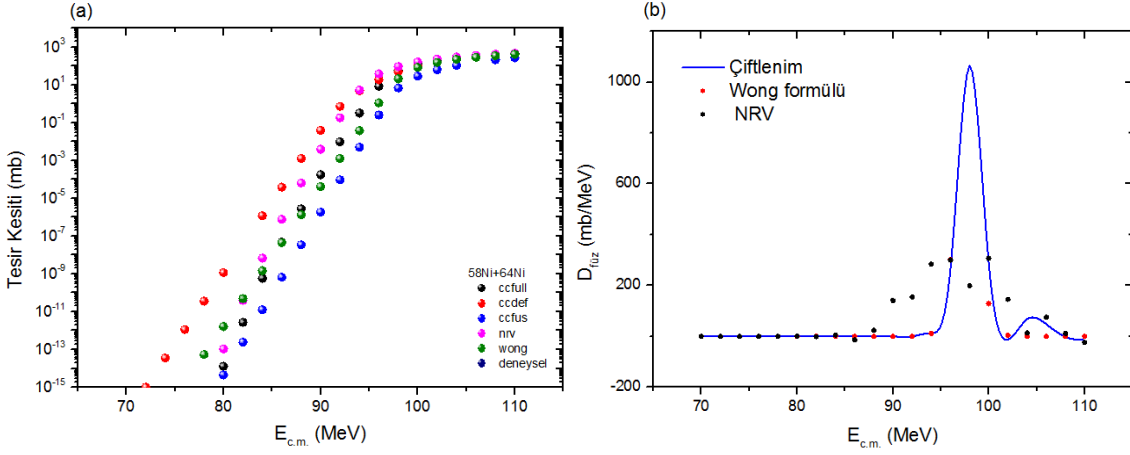
$^{30}\text{Si} + ^{24,26}\text{Mg}$ reaksiyonları 20-32MeV-cm enerji aralığında füzyon tesir kesitlerini teorik açıdan incelemek ve elde edilen verileri deneysel verilerle karşılaştırmak adına çalışılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.43.(a) ve Şekil 4.44.(a)' da sunulmuştur. Literatür incelendiğinde reaksiyonların 1990 yılında A. Morsad ve arkadaşları tarafından deneysel olarak ve teorik açıdan CCFUS kodu ile incelendiğini görmekteyiz [59]. Bu hesaplamalarda kullanılan potansiyel, iki nokta yük için Coulomb potansiyeli ve bir merkezi terim ve Woods-Saxon şeklinde bir gerçek nükleer potansiyelin toplamından

oluşmaktadır. CCFUS hariç diğer kodlar engel bölgesini geçtikten sonra birleşse ve deneysel verilerle uyum yakalasa da CCFUS bu birleşimin dışında kalmıştır. Bunun sebebi, bu basitleştirilmiş model hesaplamasının, dönme durumlarının uyarma enerjisini ihmal etmesi ya da içindeki ani yaklaşımın parçalanmasından kaynaklanabileceğinden, önemli bir miktardaki artışı öngörmesidir.

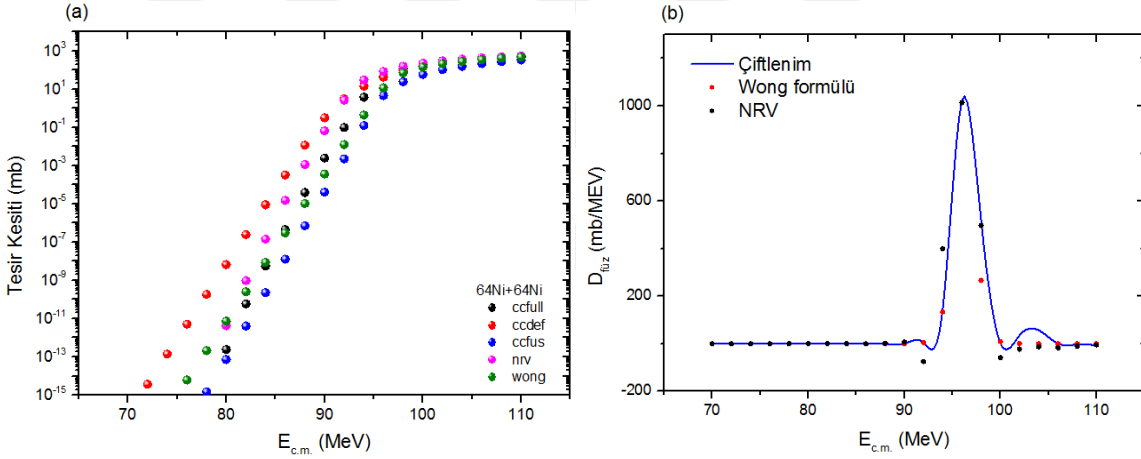
Şekil 4.43.(b) ve Şekil 4.44.(b) de ise füzyon engel dağılımları gösterilmiştir. CCFULL ve NRV çiftlenim sonuçlarını vermektedir. Wong formülasyonu ise deneysel dağılımları yeniden türetmenin bir yoludur. Her üç sonucunda engel dağılımlarını birbirleri ile uyum içinde sonuçlar verdiğini görüyoruz.



Şekil 4.45. (a) $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



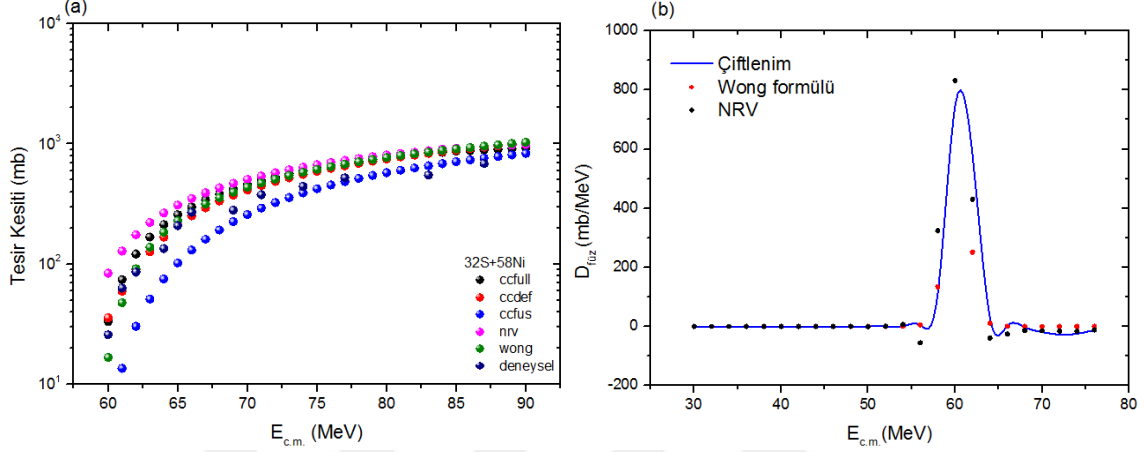
Şekil 4.45. (a) $^{58}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{58}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları



Şekil 4.46. (a) $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları, (b) $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

$^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$, $^{58}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$, $^{64}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$ sistemleri daha büyük kütleli gelen parçacıklar, neredeyse kapalı kabuklu simetrik, hedef-gelen parçacık kombinasyonları içermektedir. Ni-Ni uyarma fonksiyonlarının değerlik nötronlarının eklenmesine tepkisinin, daha hafif gelen parçacıklar içeren sistemlerde gözlenenenden çok daha karmaşıktır. Füzyon tesir kesitlerini belirlemek için CCFULL, CCDEF, CCFUS çiftlenmiş kanal kodlarını, NRV ve Wong formalizmini kullandık. Kodların birbiri arasında uyumunu ve M. Beckerman tarafından yapılan deney sonucunda elde edilen verilerle [66] uyumluluğunu inceledik.

Şekil 4.45(b), Şekil 4.46(b) ve Şekil 4.47(b)' de ise engel dağılımlarının sonuçları grafiklendirilmiştir. Çiftlenim sonuçları için incelenen dağılımlar için NRV sonuçlarının biraz geniş bir eğri seyrettiğini görüyoruz bunu normal bir eğri düzenine sokmak için kanal sayıları arttırılmalıdır. Bu koşul altında NRV' de CCFULL ve Wong formülü ile elde ettiğimiz veriler niteliğinde güvenilir sonuçlar elde etmemizi sağlar.



Şekil 4.47. (a) $^{32}\text{S}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV kodları ve Wong formalizmi ile füzyon tesir kesiti hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılması, (b) $^{32}\text{S}+^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu için CCFULL, NRV ve Wong formalizmi ile engel dağılımları

$^{32}\text{S} + ^{58}\text{Ni}$ reaksiyonu 60-90 MeV-cm enerji aralığında füzyon tesir kesitlerini hesaplayabilmek için çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formülü ile çalışılmış, elde edilen veriler A.M. Stefanini ve arkadaşları tarafından 1986 yılında yapılan deneysel çalışmanın verileri ile karşılaştırılmıştır. İncelenen reaksiyon için derinlik parametresi 64,09MeV, engel potansiyel parametresi ise 60,21MeV dir. Grafikten görüldüğü üzere tüm kodlar engel ve engel aşıldığında birbirleri ile gayet uyumlu sonuçlar vermişlerdir.

Grafiklerin (b) kısımlarında ise füzyon engel dağılımları hesaplanmış ve sonuçları grafiklendirilmiştir. Reaksiyonun engel potansiyel parametresi 60,21MeV olduğu için tesir kesiti enerji aralığı ile engel dağılımı enerji aralıkları farklı seçilmiştir.

Bu enerji aralığında CCFULL, NRV ve Wong formülünden elde edilen sonuçlar engel noktasında tek pik verip dağılımının beklenildiği gibi gausyen şekilde tamamlamıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Füzyon tesir kesiti verilerini oluşturmak için çiftlenmiş kanal hesaplamalarının kullanılması ihtiyacı konusunda çok fazla tartışma vardır. Aynı nükleer potansiyel parametre kümeleri verildiğinde aynı tesir kesitlerini hesaplamak için kendi benzersiz yöntemlerini kullanan birkaç program mevcuttur. Bu güne kadar ağır iyon füzyon reaksiyonları deneysel olarak ve teorik yaklaşımla bu kodlardan bir yada ikisi kullanılarak tesir kesiti hesaplamaları yapılmış, kullanılan çiftlenmiş kanal kodu/kodlarının doğruluğu varolan deneysel verilere bakılarak irdelenmiştir. Amaç füzyon tesir kesiti değerlerini, kodlarda kullanılan parametreleri değiştirerek deneysel verilere fitlemek olmuştur. Bu çalışmada ise; $^{16}O+^{70,72,74,76}Ge$, $^{16}O+^{148,150,152,154}Sm$, $^{20}Ne+^{90,92,94,96}Zr$, $^{28}Si+^{24,26}Mg$, $^{28}Si+^{90,94,96}Zr$, $^{28}Si+^{94,100}Mo$, $^{32}S+^{90,96}Zr$, $^{36}S+^{204,206,208,210}Pb$, $^{28}Si+^{58,64}Ni$, $^{40}Ar+^{176,178,180}Hf$, $^{64}Zn+^{64}Zn$, $^{64}Zn+^{70}Zn$, $^{70}Zn+^{70}Zn$, $^{20}Ne+^{112,114,116,118,120}Sn$, $^{46,48,50}Ti+^{124}Sn$, $^{30}Si+^{24,26}Mg$, $^{58}Ni+^{58}Ni$, $^{58}Ni+^{64}Ni$, $^{64}Ni+^{64}Ni$, $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonları için CCFULL, CCDEF, CCFUS, NRV çiftlenmiş kanal kodları ve Wong formalizmi kullanılarak füzyon tesir kesiti hesaplamaları yapılmış, deneysel füzyon tesir kesitleri ile karşılaştırmaları grafik olarak verilmiş, sonuçlarla karşılaştırıldığında en iyi sonuçları veren kod veya kodlar saptanmış, kodlar arasındaki farklılıklar tespit edilmiş, deneysel verileri bulunmayan reaksiyonlar için ise yol gösterici nitelikte veriler elde edilmiştir. Kodlar, saçılma potansiyelini Coulomb ve yakınlık potansiyellerinin toplamı olarak kullanmaktadır ve herbir çiftlenmiş kanal kodu, gelen parçacık ve hedefte titreşimsel çiftlenimler olarak hesaplamalar yapar.

1. CCFULL

CCFULL hassastır ve içsel hareketlerin sonlu uyarma enerjilerini tam olarak dikkate alır. Coulomb uyarımlarını içerir ve Coulomb engelini içine gelen dalga sınırı koşulunu kullanır. Bağlı hareket ile birkaç nükleer kolektif hareket arasındaki bağlantıların etkisi altında bileşik çekirdeğin füzyon tesir kesitlerini hesaplar. Program, alt engel enerjilerinde ağır iyon füzyon reaksiyonlarında önemli bir rol oynadığı gösterilen tüm sıralar doğrusal olmayan bağlantıların etkilerini dikkate

alır. Hedef çekirdek için 2^- ve 3^+ uyarılmaları, gelen çekirdek için ise 2^- uyarımları dikkate alarak hesaplamaları yapan CCFULL kodu çalışılan tüm reaksiyonlar için deneysel verilere en yakın verileri elde etmemizi sağlamıştır.

2. CCDEF

Deforme olmuş, etkileşen çekirdekler için füzyon kesitlerini ani sınırdan çiftlenmiş kanalın ortalamasının alınması, nükleer şekillerin tüm bağıl yönelimleri üzerinde sonuçlanmasını sağlayan kod gelen parçacık ve hedef çekirdek için β_2 ve β_4 deformasyon parametrelerini kullanırken potansiyel ve uyarılma enerji parametrelerini dikkate almamaktadır. Reaksiyon gruplarını incelediğimizde CCFULL dan sonra deneysel verilere yakın sonuçlar elde etmemizi sağlayan ikinci kod olmuştur.

3. CCFUS

Çiftlenmiş kanal kodlarından CCFUS ile yapılan tesir kesiti hesaplamaları çoğu reaksiyon için çalışılan enerji skalasında diğer kodlardan ayrı bir bölgeye yerleşmiştir. Bunun sebebi kod içinde derinlik ve yüzey yayılma gibi parametrelerin kullanılmamasıdır.

4. NRV

NRV bilgi tabanında füzyon tesir kesitleri kuantum kanal çiftlenim modeli içinde hesaplanmaktadır. Çiftlenmiş kanal yöntemi içindeki füzyon sürecini simüle eder. NRV bilgi tabanı ile yapılan hesaplamalar CCFULL' da olduğu gibi tüm sıralar için çiftlenimleri dikkate aldığından deneysel verilere, deneysel verilerin olmadığı reaksiyonlarda ise CCFULL ile benzer sonuçlar üretmiştir.

5. Wong Formalizmi

Wong formalizmi ile yapılan hesaplamalar sonucunda görülmüştür ki deneysel verilerin olmadığı reaksiyonlar için, kodlarla engel bölgesi ve engel bölgesinin yukarısında dikkate alınabilir ve ağır-iyon füzyon reaksiyonları tesir kesitleri için güvenilir sonuçlar üretmektedir.

Bu modeller tarafından üretilen sonuçların birbirine yakın olduğunu ve tüm enerji ölçeklerindeki deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu belirtmek gerekir. Sonuçta fark edildi ki; engelin altındaki daha büyük deformasyonlar, füzyon bölümünün büyük alt engel takviyesine karşılık gelir ve füzyon işleminin engel altındaki bir tünelleme işlemi olduğu da eklenebilir. Bu sonuçlar, tüm kodların gerçekçi olduğunu gösterir, böylece güvenilir bir fikir elde etmek için tesir kesiti değerlerini elde etmek için bir simülasyon

olarak kullanılabilirler. Bu, bu kodların ağır iyon füzyon reaksiyonlarında bağıl hareket ve iç serbestlik dereceleri arasındaki bağlantılarla tesir kesitlerini incelemek için kullanılabilmesini doğrulamaktadır. Parametreler dikkatlice hesaplanır ve deneysel sonuçlar için en uygun sonuçlar bu kodlarla elde edilir.

$^{28}\text{Si}+^{94,100}\text{Mo}$, $^{40}\text{Ar}+^{178}\text{Hf}$, $^{46,48,50}\text{Ti}+^{124}\text{Sn}$ ve $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ reaksiyonlarında shallow potansiyel uyarısı karşımıza çıkmıştır. Akyüz-Winther (AW) gibi potansiyellerin güvenilir engeller sağlamaktadır, ancak verileri engelin çok altında üretememekteler ve iyon iyon potansiyel engelinin iç kısımda başka bir formun olması gerekmektedir. Bir dizi basit ama açık argümandan sonra, tünelleme olasılığındaki üstel düşüşün, klasik olarak izin verilen bölgenin belirli bir enerjinin altında kaybolması ile ilgili olabileceği düşünülmektedir. Eğer bu doğruysa, o zaman engel içindeki potansiyelin sığ bir cebinin varlığı söz konusudur.

Engel dağılımı kavramı, reaksiyona katılan çekirdeklerin yapısının etkisini incelemek için yararlıdır. Coulomb uyarma deneyleri tarafından önerilen seçili izotopların yapısının karakteristik özelliklerini araştırmak için füzyon engel dağılımı için çiftlenmiş kanal analizi gerçekleştirdik. Füzyon engel dağılımlarını incelemek için çeşitli teorik yaklaşımlar mevcuttur. Bu çalışmada Çiftlenim engel dağılımları için CCFULL kodunun modifiye edilmiş versiyonu, NRV çiftlenim kodu ve Wong formülasyonu kullanılmıştır. CCFULL ve NRV kodu ile hem çiftlenmiş hem de çiftlenmemiş engel dağılımlarını elde edebilmekteyken tesir kesiti verilerimizi çiftlenmiş kanallar üzerinden hesapladığımız için engel dağılımlarında da sadece çiftlenmiş kısımları irdeledik. Wong formülü ile elde edilen füzyon engeli dağılımı, etkileşimli çekirdeklerin uyarılması için kanal birleştirme etkilerinden kaynaklanan etkili engellerin sayısını belirlemenin orantılı bir yoludur. Karşılaştırmadan, füzyon engeli dağılımının verilerini üretmek için CCFULL' un en iyi hesaplama kodu, en iyi sayısal yöntemin de Wong formülü olduğu sonucuna vardık. Titreşimsel deformasyonları göz önünde bulundurarak tam kuantum mekanik hesaplamalar için birleştirme etkilerinin dahil edilmesi, Coulomb engelinin altındaki ve üzerindeki hesaplamaları artırır, ancak özellikle verilerin türetilmesinde en iyi uyum Coulomb engelinin altındaki bölgedir.

Bu tezde yapılan çalışmaları daha da ilerletmek için yapılabilecek yöntemde ve doğruluk konusunda bazı iyileştirmeler yapılabilir. Örneğin, tüm hesaplamalarda bir Gauss itici terimiyle basit bir Woods-Saxon potansiyeli kullanıldı. Woods-Saxon potansiyelinin, gelen iki çekirdek arasında yaşanan potansiyelin iyi bir temsili olmasına rağmen, füzyon

engelleme modellerini daha da geliştirebilecek daha karmaşık ve doğru potansiyeller üzerinde çalışılabilir.

Yeni potansiyeller denemekle birlikte deformasyon parametrelerini bir algoritma geliştirerek kendimiz türetebiliriz. Böylece, deneysel verilerle daha iyi uyum sağlayan parametreleri kullanmış olur kodları bir nevi deney yokluğunda simülasyon gibi kullanabilmek adına daha güvenilir veriler elde etmiş olabiliriz.

Füzyon sisteminin karmaşıklıklarını ve füzyon engellemesinin oynaması gereken kısmı rafine etmek için yapılması gereken çok şey vardır, ancak bu tez sırasında yapılan çalışma, ağır iyon füzyon reaksiyonlarını parametreleri değiştirmeden farklı kodlarla hesaplayıp farklılıkları ya da benzerlikleri belirlemek, kodlar içindeki farklı tek parametrenin bile bile füzyon sistemi konusundaki anlayışımızı geliştirmesini veya yeni bir fikir önermesini deneyimlemek olmuştur.

6. KAYNAKLAR

1. Wong , M., Samuel S., Introductory Nuclear Physics,2,Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, University of Toronto, (1999).
2. Satchler, G., Macmillan R., Oak ridge Tennessee 37831,(1990).
3. Vaz, C. J., Alexander, M. ve Satchler, G. R., Fusion Barriers, Empirical and Theoretical Evidence for Dynamic Deformation in Subbarrier Fusion, Physics Reports, 69 (1981) 375-397.
4. Baldevbhai, P. D., Study of heavy ion reactions with weakly bound nuclei, Doktora Tezi, Gujarat, India, Physics Department, Faculty of Science, (2014).
5. Pieper, S. C. ve MacFarlane, M. H., Energy dependence of elastic scattering and one-nucleon transfer reactions induced by ^{16}O on ^{208}Pb , Physical Review C,18 (1978) 180-204.
6. Broglia, R. A., Dasso, C. H., Landowne, S. ve Winther, A., Possible effect of transfer reactions on heavy ion fusion at sub-barrier energies, Physical Review C,27 (1983) 2433-2435.
7. Beckerman, M., Salomaa, M., Sperduto, A., Enge, H., Ball, J., Dirienzo, A., Gazes, S., Yan, C., Molitoris, J. D. ve Nai-feng, M., Dynamic Influence of Valence Neutrons upon the Complete Fusion of Massive Nuclei, Phys. Rev. Lett., 45 (1980) 1472-1475.
8. Back, B. B., Esbensen, H., Jiang, C. L. ve Rehm, K. E., Recent developments in heavy-ion fusion reactions, Reviews of Modern Physics ,86 (2014) 317-360.
9. Rowley, N., Satchler, G. R. ve Stelson, P. H., On the "distribution of barriers" interpretation of heavy-ion fusion, Physics Letter B, 254 (1991) 25-29.
10. Hagino, K., Rowley N. ve Kruppa A. T., A program for coupled-channel calculations with all order couplings for heavy-ion fusion reactions, Computer Physics Communications, 123 (1999) 144-152.
11. Dasso, C. H., CCFUS - A Simplified Coupled-Channel Code for Calculation of Fusion Cross Sections in Heavy-Ion Reactions, Computer Physics Communications, 46 (1987) 187-191.
12. Niello, J. F., Dasso, C. H. ve Landowne, S., CCDEF - A Simplified Coupled-Channel Code for Calculation of Fusion Cross Sections Including Static Nuclear Deformations, Computer Physics Communications, 54 (1989) 409-412.
13. <http://nrv.jinr.ru/nrv/> 20 Eylül 2016
14. Dasso, C. H. ve Vitturi, A., Macroscopic Description of Pair Transfer in Heavy-Ion Collisions with Deformed Nuclei, Physics Letter B, 179 (1986) 337-341.
15. Herman, R., Fusion, Cambridge University Press (1990).
16. Robert S., The Los Alamos Primer, University of California Press (1992).

17. Loveland, W., Morrissey, D. J., Seaborg, G. T., Modern Nuclear Chemistry, (2006).
18. Niehls, B. , Neutron Capture and Nuclear Constituons, Nature, (1936) 344-348.
19. Knudsen, H. H., Low-energy Nuclear Reactions Exploratory work on ^{11}Be , Doktora Tezi, Department of Physics and Astronomy University of Aarhus, (2008).
20. Weisskopf, V., Statistics and Nuclear Reactions, Physical Review, 52 (1937) 295-303.
21. Niehls, B., Wheeler, J. A., The Mechanism of Nuclear Fission,Physical Review, 56 (1939) 426-450.
22. Schieck, H. P., Nuclear Reactions an Introduction, Lecture Notes in Physics, 882, Springer, (2014).
23. Gamow, G., Z. Phys., 51 (1928) 204.
24. Gamow, G., Z. Phys., 52 (1929) 510.
25. Beckerman, M., Sub-barrier fusion of two nuclei , Reports on Progress in Physics, 51 (1988) 10147-1101.
26. Bass, R., Nuclear Reactions with Heavy Ions, Berlin Heidelberg New York, 289 (1980).
27. Barnes, C. A., Trentalange S., Wu S. C., Heavy-Ion Reactions in Nuclear Astrophysics. Treatise on Heavy-Ion Science. Springer, Boston, MA, (1985).
28. Bass, R., Nucleus-Nucleus Potential Deduced from Experimental Fusion Cross Sections, Phys. Rev. Lett., 39 (1977) 265-268.
30. Kouichi, H., Takigawa, N., Subbarrier Fusion Reactions and Many-Particle Quantum Tunneling. Progress of Theoretical Physics, 128 (2012) 1061-1106.
31. Kemble, E. C., A Contribution to the Theory of the B. W. K. Method, Physical Rewiev, 48 (1935) 549-561.
32. Hill, D. L., Wheeler J. A., Nuclear Constitution and the Interpretation of Fission Phenomena, Physical Review, 89 (1953) 1102-1145.
33. Montagnoli, G., Stefanini, A. M., Recent experimental results in sub- and near-barrier heavy-ion fusion reactions, Eur. Phys. J. A, 53 (2017).
34. Siwek-Wilczyńska, K. ve Wilczyński, J., Empirical nucleus-nucleus potential deduced from fusion excitation functions, Physical Review C, 69 (2004).
35. Dasso, C. H., S. Landowne, A. Winther. Barrier Penetration in the Presence of Coupling to Intrinsic Degrees of Freedom, Nucl. Phys. A,432 (1985) 495-513.
36. Stoksta, R. G., Gross, E. E., Analysis of the sub-barrier fusion of $^{16}\text{O}+^{148,150,152,154}\text{Sm}$, Physical Rewiev C, 23 (1981) 281-294.
37. Rawitscher, G. H., Ingoing Wave Boundary Condition Analysis of Alpha and Deuteron Elastic Scattering cross Sections, Nucl. Phys. A, 85 (1963) 337-364.
38. Landowne, S., Pieper, S. C., Ingoing Wave Boundary Condition Analysis of Alpha and Deuteron Elastic Scattering Cross Sections, Physical Review C, 29 (1984) 337-364.

39. Hagino, K., Takigawa, N., Dasgupta, M., Hinde, D. J. ve Leigh, J. R., Validity of the linear coupling approximation in heavy-ion fusion reactions at sub-barrier energies, Physical Review C, 55 (1997) 276-284.
40. Stefanini, A. M., Ackerman, D., Corradi, L., Napoli, D. R., Petrache, C., Spolaore, P., Bednarczyk, P., Zhang, H. Q., Beghini, S., Maontaglioni, G., Mueller, L., Scarlassara, F., Segato, G. F., Sorame, F., ve Rowley, N., Influence of Complex Surface Vibrations on the Fusion of $^{58}\text{Ni} + ^{60}\text{Ni}$, Phys. Rev. Lett., 74 (1995).
41. Hagino, K., Takigawa, N., Balantekin, A. B., Bennett, J. R., Path integral approach to no-Coriolis approximation in heavy-ion collisions, Physical Review C, 52 (1995) 286-290.
42. Zagrebaev, V. I., Samarin, V. V., Near-Barrier Fusion of Heavy Nuclei: Coupling of Channels, Physics of Atomic Nuclei, 67 (2004) 1462-1477.
43. Zagrebaev, V. I., Synthesis of superheavy nuclei: Nucleon collectivization as a mechanism for compound nucleus formation, Physical Review C, 64 (2001) 1-12.
44. Stefanini, A. M., Corradi, L., Vinodkumar, A. M., Feng, Y., Scarlassara, F., Montagnoli, G., Beghini, S., ve Bisogno, M., Near-barrier fusion of $^{36}\text{S} + ^{90,96}\text{Zr}$: The effect of the strong octupole vibration of ^{96}Zr , Physical Review C, 62 (2000) 1-7.
45. Zagrebaev, V. I., Sub-barrier fusion enhancement due to neutron transfer, Physical Review C, 67 (2003) 061601-1, 061601-5.
46. Winther, A., Dissipation, Polarization and Fluctuation in Grazing Heavy-Ion Collisions and the Boundary to the Chaotic Regime, Nuclear Physics A, 594 (1995) 61601-1, 61601-5.
47. Rachkov, V. A., Karpov, A. V., Denikin, A. S., ve Zagrebaev, V. I., Examining the enhancement of sub-barrier fusion cross sections by neutron transfer with positive Q values, Physical Review C, 90 (2014) 014614-1, 014614-11.
48. Wong, C. Y., Interaction Barrier in Charged-Particle Nuclear Reactions, Phys. Rev. Lett., 31 (1973) 766-769.
49. Leigh, J. R., Dasgupta, M., Hinde, D. J., Mein, J. C., Morton, C. R., Lemmon, R. C., Lestone, J. P., Barrier distributions from the fusion of oxygen ions with $^{144,148,154}\text{Sm}$ and ^{186}W , Physical Review C, 52 (1995) 3151-3165.
50. Rowley, N., Timers, H., Leigh, J. R., Dasgupta, M., Hinde, D. J., Mein, J. C., Morton, C. R. ve Newton, J. O., Barrier distributions from elastic scattering, Physical Review Letters, 373 (1996) 23-29.
51. Fereidonnejad, R., Sadeghi, H. ve Ghambari, M., Coupled-Channel Calculation For Cross Section Of Fusion and Barrier Distribution Of $^{16,17,18}\text{O} + ^{16}\text{O}$ Reactions, Astrophysics and Space Science, 363 (2018) 50-56.
52. Hagino, K. ve Takigawa, N., Sub barrier fusion reactions and many-particle quantum tunneling, Progress of Theoretical Physics, 128 (2012) 1061-1106.
53. Sastry, S. V. S. ve Santra, S., Structure information from fusion barriers, Pram. Journal of Physics, 54 (2000) 813-826.
54. Atomic Data and Nuclear Data Tables 42 (1989) 55-104.
55. Atomic Data and Nuclear Data Tables 42 (1989) 1-54.

56. Kuronen, A., Keinonen, J. ve Tikkanen, P., Cross section of $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ near the Coulomb barrier, Physical Review C, 35 (1987) 591-596.
57. Aguilera, E. F., Kolata, J. J., Tighe, R. J., Nuclear structure effects in the sub-barrier fusion of $^{16}\text{O} + ^{70,72,74,76}\text{Ge}$, Physical Review C, 52 (1995) 3103-3113.
58. Stokstad, R. G., Eisen, Y., Kaplanis, S., Pelte, D., Smilansky, U., ve Tserruya, I., Fusion of $^{16}\text{O} + ^{148,150,152,154}\text{Sm}$ at sub-barrier energies, Physical Review C, 21 (1980) 2427-2435.
59. Morsad, A., Kolata, J. J., Tighe R. J., Kong, X. J., Aguilera, E. F. ve Vega, J. J., Sub-barrier fusion of $^{28,30}\text{Si}$ with $^{24,26}\text{Mg}$, Physical Review C , 41 (1990) 988-994.
60. Kalkal, S., Mandal, S., Madhavan, N., Prasad, E. ve Verma, S., Channel coupling effects on the fusion excitation functions for $^{28}\text{Si} + ^{90,94}\text{Zr}$ in sub- and near-barrier regions, Physical Review C, 81 (2010).
61. Ackermann, D., Bednarczyk, P., ve Corradi, L., Cross sections and average angular momenta in the fusion of $^{28}\text{Si} + ^{94,100}\text{Mo}$ and $^{58,64}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$, Nuclear Physics A, 609 (1996) 91-107 .
62. Zhang, H. Q., Lin, C. J., Yang, F., Jia, H. M., Xu, X. X., Jia, F. ve Zhang, S. T., Near-barrier fusion of $^{32}\text{S} + ^{90,96}\text{Zr}$: The effect of multi-neutron transfers in sub-barrier fusion reactions, Physical Review C, 82 (2010) 054609-1, 054609-7.
63. Khuyagbaatar, J., Nishio, K., Hofmann, S., Ackermann, D., Block, M., Heinz, S., Heßberger, F. P, Hirose, K., Ikezoe, H., Kinlder, B., Lommel, B., Makii, H., Mitsuoka, S., Nishinaka, I., Ohtsuki, T., Wakabayashi, Y. ve Yan, S., Evidence for hindrance in fusion between sulfur and lead nuclei, Physical Review C, 86 (2012) 064602(1)-064602(6).
64. Clerc, H. G., Keller, J. G. ve Sahm, C. C., Fusion-Fission and Neutron Evaporation Residue Cross Sections in ^{40}Ar and ^{50}Ti Induced Fusion Reactions, Nuclear Physics A, 419 (1984) 571-578.
65. Liang, J. F., Allmond, J. F., Gross, J. M., Mueller, C. J., Shapira, P. E. D. ve Varner R. L., Examining the role of transfer coupling in sub-barrier fusion of $^{46,50}\text{Ti} + ^{124}\text{Sn}$, Physical Review C 94 (2016) 024611-6.
66. Beckerman, M., Salomaa, M., Sperduto, A. ve Molitori, J., D., Physical Review C, 25 (1982) 837-849.

ÖZGEÇMİŞ

25.01.1986 tarihinde Sakarya' da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adapazarı Mithatpaşa İlköğretim Okulu' nda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Adapazarı Atatürk Lisesi (YDA)' da tamamladı. 2004 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü' ne girerek 2008 yılında lisans öğrenimini tamamladı. Ekim 2009' da Rize Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Anabilim Dalı' nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2010 yılında Rize Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' nde yüksek lisans öğrenimine başladı, 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora Eğitimine başladı.

Halen Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Anabilim Dalı' nda Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.