

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK
145 – 1120 MeV ENERJİ ARALIĞINDA $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ SAÇILMASININ
OPTİK MODEL ANALİZLERİ**

Oğuz ÖZTÜRK

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU**

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2021**



© 2021 [Oğuz ÖZTÜRK]

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Nükleer Etkileşmeler.....	2
1.1.1. Elastik (esnek) saçılma.....	5
1.1.2. İnelastik (esnek olmayan) saçılma	5
1.2. Reaksiyon Tesir Kesiti ve Diferansiyel Tesir Kesiti.....	6
2. KAYNAK ÖZETLERİ	14
3. YÖNTEM.....	25
3.1. Optik Model	25
3.2. Optik Model Potansiyeli	28
3.3. Optik Model Analizleri	31
3.4. Optimizasyon İşlemleri ve Optimizasyon Algoritmaları	32
3.4.1. Genetik algoritma.....	33
3.4.2. Gri kurt optimizasyon algoritması	35
3.4.3. Tavlama benzetimi	37
3.4.4. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması.....	39
3.5. Makine Öğrenmesi Yaklaşımı.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	43
4.1. Ön Analizler	43
4.1.1. Serbest parametrelili analizler	44
4.1.2. Sabit parametrelili analizler.....	49
4.1.3. Ek-potansiyeller ile yapılan analizler.....	55
4.2. Optimizasyon Algoritmalarının Kullanımı ile Yapılan Analizler.....	65
4.3. Makine Öğrenmesi Yaklaşımı ile Saçılma Açısı Tesir-Kesiti Tahminleri	72
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR	86
EKLER.....	93
EK A.	93
ÖZGEÇMİŞ	111

ÖZET

Doktora Tezi

OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK 145 – 1120 MeV ENERJİ ARALIĞINDA $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ SAÇILMASININ OPTİK MODEL ANALİZLERİ

Oğuz ÖZTÜRK

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ertan KÜRKCÜOĞLU

Hafif-ağır çekirdeklerin elastik ve inelastik saçılmaları gösterdikleri zengin nükleer özellikler sebebiyle ilgi ile çalışılmaktadır. Optik model yaklaşımı, bu saçılmaların teorik olarak incelendiği çalışmalarda deneysel verilerin açıklanmasında başarıyla uygulanmaktadır. Optik modelde, ele alınan saçılmanın teorik olarak açıklanabilmesi için başarılı sonuçlar üreten bir potansiyel yapısının belirlenmesi önem arz eder. Bu amaçla, tez çalışması kapsamında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması için nükleer potansiyel yapısı ayrıntılı bir biçimde araştırılmıştır. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının optik model analizleri, $E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında, fenomenolojik potansiyeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, en uygun potansiyel şeklinin belirlenmesi amacıyla ön analizler yapılmış, nükleer potansiyel $WS2+iWS2$ ve $WS2+iWS$ formunda ele alınarak sabit ve serbest parametre durumları değerlendirilmiştir. Daha iyi sonuçlar üreten potansiyel formunun sanal bileşenine derin ve sığ yapıdaki ek-potansiyeller eklenerek tesir-kesiti analizleri ek-potansiyellerin etkisi bakımından sistematik olarak incelenmiş ve ön analizler tamamlanmıştır. Sonraki adımda belirlenen potansiyelin parametrelerine genetik algoritma, gri kurt optimizasyon algoritması, parçacık sürü optimizasyonu algoritması ve tavlama benzetimi algoritması ile optimizasyon işlemleri uygulanmıştır. Böylece, deneysel olarak ölçülen tesir-kesiti verilerine en iyi uyumu gösteren sonuçları üreten potansiyel parametreleri belirlenmiştir. Son olarak makine öğrenmesi yaklaşımıyla, tesir-kesiti tahminleri yapılmış ve saçılma açısı ile tesir-kesiti verileri arasındaki ilişki tesis edilmeye çalışılmıştır. Analizlerde, tesir-kesiti hesaplamaları Fresco kodu kullanılarak gerçekleştirilmiş, hesaplamalar ile deneysel ölçümler arasındaki uyum χ^2 hata hesabı ile değerlendirilmiştir. Tüm analizler sonucunda, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması için en başarılı optik model analizlerine $WS2+iWS2$ formuna sahip derin, çekici bir gerçel kısım ile nispeten zayıf, enerji bağımlı soğurucu yapıdaki bir sanal kısımdan oluşan bir nükleer potansiyel ile ulaşılmıştır. Potansiyel parametrelerine uygulanan optimizasyon işlemleri sonucunda daha önceki elde yapılan hesaplamalara göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiş, deneysel verilerle uyum düzeyi artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ saçılması, elastik saçılma, optik model, fenomenolojik potansiyel, tesir-kesiti, optimizasyon.

2021, 112 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

OPTICAL MODEL ANALYSES of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ SCATTERING at 145 - 1120 MeV ENERGY RANGE by USING OPTIMIZATION ALGORITHMS

Oğuz ÖZTÜRK

Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU

Elastic and inelastic scattering of light-heavy nuclei has been studied with interest due to their rich nuclear properties. The optical model approach has been successfully applied to the theoretical explanation of experimental data on elastic and inelastic scattering of light-heavy nuclei. In the optical model, it is important to determine a potential shape that produces successful results to explain the scattering investigated theoretically. For this purpose, within the scope of the thesis, the form of the nuclear potential for $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastic scattering was investigated in detail. Optical model analyses of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastic scattering were carried out using phenomenological potentials in the energy range of $E_{LAB}=145-1120$ MeV. Firstly, preliminary analyses were performed to determine the most suitable potential form, the nuclear potential was considered as in the form of $WS2+iWS2$ and $WS2+iWS$, and the analyses with fixed and free parameters were evaluated. By adding deep and shallow additional potentials to the imaginary part of the potential form that produces better results, the cross-section analyses were systematically examined in terms of the effect of the additional potentials, and the preliminary analyses were completed. Then, genetic algorithm, gray wolf optimization algorithm, particle swarm optimization algorithm, and simulated annealing algorithm were applied for the optimization processes on parameters of the candidate potential which were determined after preliminary analyses. Thus, potential parameters were determined that produced results of the experimentally measured cross-section data which were fitted best. Finally, cross-section estimates were performed by the machine learning approach and the relationship between scattering angle and cross-section data was investigated. In the analyses, cross-section calculations were performed by using Fresco code, and the agreement between the calculations and experimental measurements was evaluated with the χ^2 error calculation. As a result of all analyses, the most successful optical model analyses for $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastic scattering was reached with a nuclear potential consisting of a deep, attractive real part and an imaginary part with a relatively weak energy-dependent absorptive form ($WS2+iWS2$). As a result of the optimization processes applied to the potential parameters, more successful results were obtained compared to the results of the previous calculations, and the agreement with the experimental data has been improved.

Keywords: $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ scattering, elastic scattering, optical model, phenomenological potential, cross-section, optimization.

2021, 112 pages

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sürecinde bilgi ve tecrübeleri ile bana rehberlik eden değerli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ertan KÜRKCÜOĞLU'na bana ayırdığı değerli vakti ve sağladığı destekler için şükranlarımı sunarım. Kendisine çalışma süresince gösterdiği ilgi ve anlayıştan dolayı yürekten teşekkür ederim.

Tez Sınav Jüri üyesi ve aynı zamanda Tez İzleme Komitesi üyelerinden olan Fizik Bölüm Başkanı Prof. Dr. Seyfettin ÇAKMAK ile Prof. Dr. Mustafa HOŞTUT'a tez süreci boyunca sağladıkları katkılar ve gösterdikleri anlayıştan dolayı teşekkür ederim. Kıymetli zamanlarını bu tezi incelemeye ayıran Tez Sınav Jüri üyeleri Prof. Dr. Abdullah KAPLAN ve Dr. Öğr. Üyesi Aygün IŞIK YILDIZ'a değerli fikirleri ve önerilerinden dolayı ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında kullanılan optimizasyon algoritmalarının kaynak kodlarını bize sağlayan ve kullanımı konusunda desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Fatih Ahmet ŞENEL'e teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında sağladığı destekle zamanı daha verimli kullanmama vesile olan Bilgisayar Öğretmeni Begüm DAĞLI'ya teşekkür ederim.

Bu çalışmayı yürütürken zaman zaman ihmal ettiğim aileme ve değerli eşim Dr. Öğr. Üyesi Kuyaş HEKİMLER ÖZTÜRK ile sevgili kızım Ela ÖZTÜRK'e koşulsuz destekleri ve karşılıksız sevgileri için en kalbî duygularla teşekkür ederim.

Oğuz ÖZTÜRK
ISPARTA, 2021

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Nükleer etkileşmelerin sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.2. Laboratuvar koordinatlarında elastik saçılma temsili	5
Şekil 1.3. Laboratuvar koordinatlarında inelastik saçılma temsili	6
Şekil 1.4. Gelen demet, hedef ve θ ile ϕ' 'ye bağlı $d\Omega$ katı açısı içinde saçılan demeti temsil eden reaksiyon geometrisi	7
Şekil 1.5. Katı iki kürenin çarpışması	9
Şekil 1.6. Temel saçılma geometrisi	13
Şekil 3.1. WS şekil çarpanı ve türev formu.....	27
Şekil 3.2. WS ile $WS2$ formlarının uzaklığa göre değişimlerinin karşılaştırılması ...	27
Şekil 3.3. Genetik algoritma akış şeması	34
Şekil 3.4. Gri kurt hiyerarşisi	35
Şekil 3.5. Gri kurt optimizasyon algoritması akış şeması.....	36
Şekil 3.6. Tavlama benzetimi algoritması akış şeması	38
Şekil 3.7. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması akış şeması.....	40
Şekil 3.8. Optimizasyon algoritmalarının çalıştırıldığı MonoDevelop yazılımının ekran görüntüsü.....	41
Şekil 3.9. Tesir-kesiti tahminleri için kullanılan tahmin modelinin RapidMiner blok şeması	42
Şekil 4.1. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}O+^{16}O$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	45
Şekil 4.2. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}O+^{16}O$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	46
Şekil 4.3. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}O+^{16}O$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	46
Şekil 4.4. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}O+^{16}O$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	47
Şekil 4.5. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}O+^{16}O$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	47
Şekil 4.6. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}O+^{16}O$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	48
Şekil 4.7. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}O+^{16}O$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	51

Şekil 4.8. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	51
Şekil 4.9. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması.....	52
Şekil 4.10. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	52
Şekil 4.11. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	53
Şekil 4.12. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	53
Şekil 4.13. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	61
Şekil 4.14. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	61
Şekil 4.15. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	62
Şekil 4.16. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	62
Şekil 4.17. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	63
Şekil 4.18. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	63
Şekil 4.19. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	69
Şekil 4.20. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	69

Şekil 4.21. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_I ve V_{Iop} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	70
Şekil 4.22. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_I ve V_{Iop} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	70
Şekil 4.23. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_I ve V_{Iop} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	71
Şekil 4.24. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_I ve V_{Iop} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması	71
Şekil 4.25. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması	74
Şekil 4.26. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir kesiti tahminleri ile karşılaştırması	76
Şekil 4.27. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması	77
Şekil 4.28. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması	79
Şekil 4.29. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması	80
Şekil 4.30. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Tesir-kesitlerinin elde edilmesinde kullanılan teknikler ve uygulamaları	9
Çizelge 4.1. Serbest parametrelili analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri	45
Çizelge 4.2. Sabit parametrelili analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri	50
Çizelge 4.3. Ek-potansiyellerle yapılan analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri	57
Çizelge 4.4. Ek-potansiyeller ile elde edilen en başarılı analizlere ait parametreler ve χ^2 değerleri	60
Çizelge 4.5. Optimizasyon algoritmaları ile yapılan hesaplamalarda parametreler için seçilen aralıklar	66
Çizelge 4.6. Optimize edilen parametreler ve bu parametrelerin hesaplamalarda kullanılmasıyla elde edilen χ^2 değerleri	67
Çizelge 4.7. Optimizasyon sonucu elde edilen en iyi parametre setleri ve χ^2 değerlerinin serbest parametrelili analiz sonuçları ile birlikte gösterimi	68
Çizelge 4.8. $E_{LAB}=145$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri	73
Çizelge 4.9. $E_{LAB}=250$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri	74
Çizelge 4.10. $E_{LAB}=350$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri	76
Çizelge 4.11. $E_{LAB}=480$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri	78
Çizelge 4.12. $E_{LAB}=704$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri	79
Çizelge 4.13. $E_{LAB}=1120$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri	80
Çizelge 4.14. Tesir-kesiti tahminleri ile test verileri arasındaki uyumu gösteren χ^2 değerleri	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Kütle numarası
b	Vurma parametresi
$d\Omega$	Katı açısı
E_{LAB}	Laboratuvar koordinat sisteminde gelme enerjisi
fm	Fermi (femtometre)
GA	Genetik algoritma
GKO	Gri kurt optimizasyon algoritması
GNU	GNU's not Unix
H	Hamiltoniyen
mb	Milibarn
MeV	Mega elektron volt
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
sr	Steradyan
TB	Tavlama benzetimi
WS	Woods-Saxon
$WS2$	Woods-Saxon kare
WSD	Woods-Saxon türev
Z	Proton sayısı
γ	Gama ışını
σ	Reaksiyon tesir-kesiti
χ^2	Hata hesabı
ψ	Dalga fonksiyonu

1. GİRİŞ

Atom çekirdeğinin doğası, karmaşık yapısı ve çözülmesi gereken bazı problemlerin içerdiği matematiksel güçlükler gibi nedenlerden dolayı halen tam ve kesin olarak tanımlanabilmiş değildir. Buna rağmen, çekirdek ile ilgili bazı temel fiziksel bilgileri başarıyla açıklayabilen sıvı damlası modeli, nükleer kabuk modeli, kollektif model gibi kuramsal modeller geliştirilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen nükleer reaksiyon deneyleri ile farklı çekirdek reaksiyonlarının saçılma verilerinin elde edilmesi, çekirdeğin yapısının anlaşılabilmesi adına önemli kazançlar sağlamaktadır.

Nükleer etkileşmeler, nükleer yapı veya nükleer davranışın belirli özelliklerine dair bilgilerin edinilmesinde önemli bir yere sahiptir. Nükleer kuvvetin doğası, yeni çekirdek sentezi, nükleer boyutların ve şekillerin tespit edilmesi üzerine yapılan çalışmalar, uyarılmış çekirdeklerin özellikleri ve farklı tür etkileşmeler sırasında nükleer maddenin dinamik davranışının analizi gibi çalışmalar için çeşitli ölçümler yapılarak elde edilen veriler ışığında bilimsel ve teknolojik gelişmelere katkı sağlanmaktadır (Lilley, 2018).

Nükleer etkileşmeler içinde hafif-ağır iyon saçılmaları önemli bir yere sahiptir ve uzun yıllardır ilgi ile çalışılmaktadır. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ saçılması da, sergilediği dikkat çekici nükleer özellikleriyle birçok çalışmaya konu olmuştur. Oksijen çekirdekleri arasındaki elastik ve inelastik saçılma mekanizmalarının açıklanabilmesi adına yapılan deneysel ve teorik çalışmalara literatürde sıklıkla rastlanmaktadır.

Saçılma reaksiyonlarının teorik olarak incelendiği çalışmalarda deneysel verilerin açıklanmasında kullanılan modellerden birisi de optik modeldir. Optik model, soğurma etkilerinin var olması halinde elastik saçılmayı yalnızca gelen parçacığın davranışını dikkate alarak inceleyen başarılı bir modeldir. Optik modelin uygulanmasında öncelikle uygun bir potansiyel şekli seçilmeli ve potansiyel formunun derinlik ve geometri parametreleri deneysel verilere en iyi uyumu gösterecek biçimde belirlenmelidir (Krane, 2002). Bu düşünceden hareketle, bu tez çalışmasında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması için fenomenolojik optik model potansiyel yapısı kapsamlı bir biçimde araştırılmıştır. Bu konuda literatürde bulunan çalışmalara katkı sağlamak amacıyla, optik model hesaplamalarında kullanılan fenomenolojik potansiyel

parametrelerinin deneysel verilerle en uyumlu hale getirilebilmesi için farklı optimizasyon algoritmaları ile fit işlemi uygulanması fikri bu çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının optik model analizleri, $E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında, fenomenolojik potansiyeller kullanılarak yapılmıştır. Önce en uygun potansiyel şekli belirlenmiş, ardından potansiyel parametrelerine farklı optimizasyon algoritmaları ile optimizasyon işlemleri uygulanmıştır. Böylece, deneysel olarak ölçülen tesir-kesiti verilerine en iyi uyum gösteren potansiyel yapısı ortaya konmaya çalışılmıştır. Ayrıca, teknolojinin gelişmesine paralel olarak, günümüzde bilgisayarların artan hesaplama gücünün sağladığı avantajlarla birlikte son yıllarda pek çok bilimsel çalışmaya katkı sağlamış makine öğrenmesi (machine learning) teknikleri (Carleo vd., 2019) ile deneysel verilerin ışığında tesir-kesiti tahminleri yapılmıştır. Bu tahminlerden elde edilen sonuçların faydaları tartışılarak sunulmuştur.

Bu tez çalışmasının odağında yer alan $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının dayandığı fiziksel temeller göz önünde bulundurulduğunda, tezin bu bölümünde nükleer reaksiyonlar, saçılmalar ve tesir-kesiti kavramları ile ilgili temel bilgilerin verilmesi uygun olacaktır.

1.1. Nükleer Etkileşmeler

Reaktör, hızlandırıcı veya radyoaktif bir kaynaktan çıkan enerjik parçacıklar ile hedefte bulunan bir maddenin bombardıman edilmesiyle bir nükleer reaksiyonun gerçekleştirilmesi mümkündür. Çoğunlukla tipik bir nükleer reaksiyonda, hedef durumunda ağır bir çekirdek ile onu bombalayan hafif mermi parçacık tepkimeye girer. Herhangi bir tür mermi parçacık ile nükleer reaksiyonlar başlatılabilirler. α parçacıkları, protonlar, döteronlar ve diğer çekirdekler pozitif yüklü olduklarından Coulomb engelini aşmak için yeterli enerjiye sahip olmaları gerekir. Nötronlar böyle bir engel ile karşılaşmazlar ve çok düşük enerjilerde dahi ekzotermik reaksiyonları başlatabilirler. Benzer şekilde elektronlar ve gama ışını fotonları da çekirdeğe yaklaştıklarında hiçbir engelle karşılaşmaz, elektromanyetik kuvvet yoluyla etkileşirler ve böylece hedef çekirdek içindeki yüklerin dağılımıyla ilgili ayrıntılı bilgi verirler (Lilley, 2018).

Gözlenen ilk deneysel nükleer etkileşme, Rutherford'un 1919 yılında laboratuvarında bir radyoaktif kaynaktan çıkan α parçacıkları ile azotu bombardıman etmesi sonucu ortaya çıkan protonları gözlediği reaksiyondur (Krane, 2002; Williams, 2014). 1930 yılında Cockcroft ve Walton tarafından ilk parçacık hızlandırıcısı yapıldı. Hızlandırılmış protonlar ile gerçekleştirilen bu ilk nükleer reaksiyonda, lityum çekirdeği bombardıman edilmiş ve tepkime sonucunda iki helyum çekirdeği gözlenmiştir (Cockcroft ve Walton, 1930; 1932a; 1932b). Teknolojinin ilerlemesi ile 1980'ler geçilirken ^{16}O , ^{48}Ca gibi ağır iyon demetlerinin mermi parçacıklar olarak kullanıldığı nükleer reaksiyon deneyleri mümkün hale gelmiştir (Kürkçüoğlu, 2006).

Bir nükleer reaksiyon genellikle aşağıdaki şekilde yazılır:

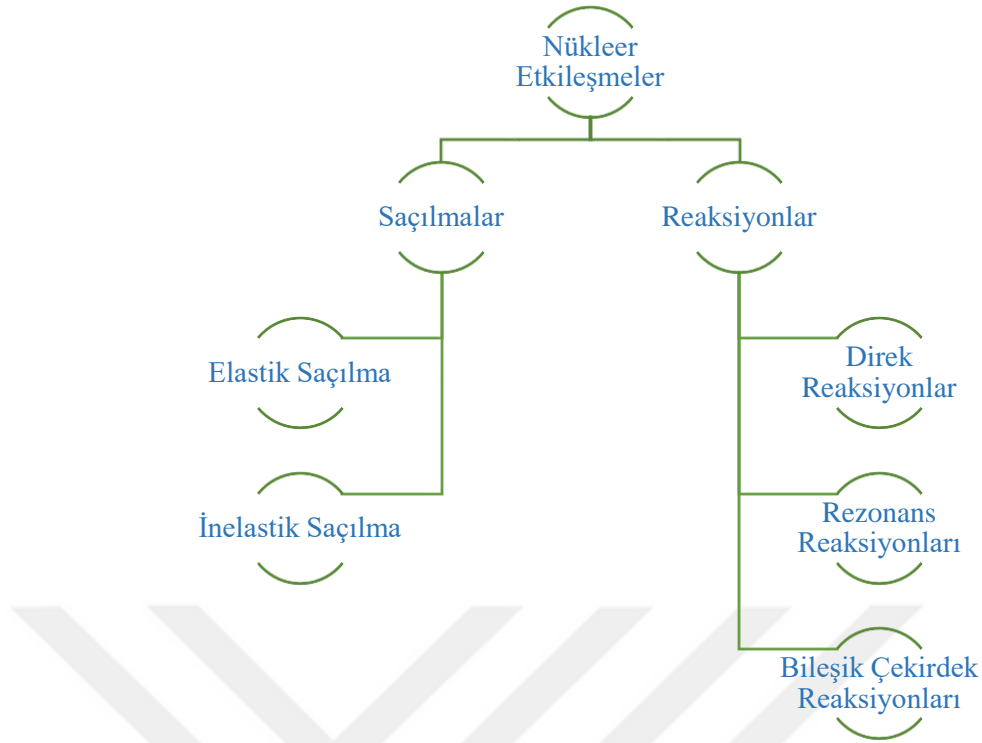


Burada a mermi parçacığı, A hedef çekirdeği, B ürün çekirdeği (veya kalan çekirdek) ve b ürün parçacığı temsil eder. Eşitlik (1.1) ile verilen reaksiyon, $A(a, b)B$ şeklinde de gösterilir. $a + A$ giriş kanalı, $B + b$ ise çıkış kanalı olarak isimlendirilir (Lilley, 2018). Reaksiyon enerjisi (Q değeri), enerjinin korunumuna göre;

$$Q = (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2 \quad (1.2)$$

olarak verilir. Eşitlikte m_a, m_A, m_b, m_B reaksiyona giren ve reaksiyondan çıkan parçacıkların kütleleri, c ise ışık hızıdır.

Nükleer reaksiyon deneylerinin sonuçları, nükleer kütleler ve enerji seviyeleri, nükleer boyut ve yapı, astrofizik ve kozmolojide çekirdek sentezi, yapay izotop ve güç üretimi gibi konularda önemli bilgilere erişmeye olanak sağlar. Reaksiyon türlerine göre öğrenilen bilgiler ve uygulama alanları değişiklik gösterdiğinden, nükleer etkileşmeleri saçılmalar ve reaksiyonlar olarak sınıflandırmak mümkündür (Kürkçüoğlu, 2006). Bu sınıflandırma Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Nükleer etkileşmelerin sınıflandırılması (Kürkçüoğlu, 2006'dan uyarlanmıştır)

Gelen ve giden parçacıkların aynı olduğu saçılma reaksiyonlarında saçılmalar, saçılan parçacıklar taban durumda ise *elastik saçılma*, uyarılmış (genellikle γ yayınlanması ile çabuk bozunabilen) bir durumda ise *inelastik saçılma* olarak adlandırılır. Yalnızca birkaç nükleonun reaksiyona katıldığı *direk reaksiyonlar* çekirdeğin kabuk yapısını tanımlamada yardımcıdırlar (Krane, 2002). *Bileşik çekirdek reaksiyonlarında* mermi ve hedef (kısa süreli) birbirleriyle kaynaşır ve oluşan bileşik sistem içerisindeki nükleon-nükleon etkileşimleri ile reaksiyon enerjisi nükleonlar arasında paylaşılır (Lilley, 2018). Direk reaksiyonlar ile bileşik çekirdek reaksiyonları arasında bulunan *rezonans reaksiyonlarında*, mermi parçacık, parçacık yayınlanmasından önce bir yarı-bağlı (quasibound) durum oluşturur (Krane, 2002).

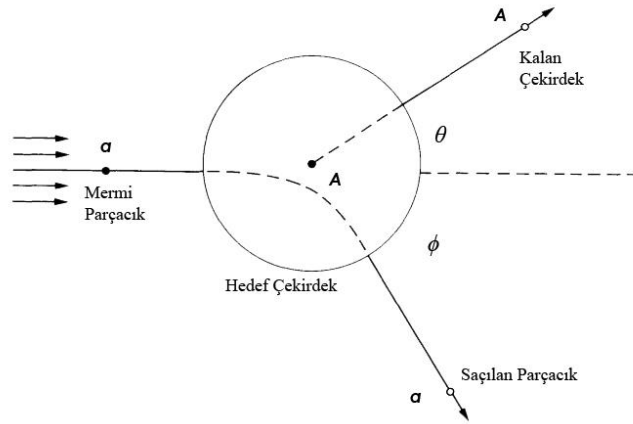
Yukarıda kısaca bahsedilen direk reaksiyonlar, rezonans reaksiyonları ve bileşik çekirdek reaksiyonları tez konusu ile doğrudan ilişkili olmadığından detaylı açıklamalarına burada yer verilmeyecektir. Öte yandan, tez çalışmasının zeminini oluşturan saçılmalar sonraki kısımlarda tanıtılmıştır.

1.1.1. Elastik (esnek) saçılma

Elastik saçılma, mermi parçacık ve hedef çekirdeğin birbirleriyle çarpışmasında toplam kinetik enerjinin değişmediği en temel etkileşmedir. Mermi parçacıklar belli bir kuvvet alanı tarafından saçılır ve kinetik enerji kaybetmeden tekrar ortaya çıkarlar. Enerji ve momentumun korunumu kanunlarının sürecin kinematığını belirlediği elastik saçılmada reaksiyonun Q değeri sıfırdır. Mermi parçacık ve hedef çekirdek ile saçılan parçacık ve kalan çekirdek taban durumundadır. Giriş kanalının çıkış kanalına eşit olduğu elastik saçılma aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$a + A \rightarrow A + a \quad (1.3)$$

Eşitlik (1.3)'den ve $^{208}\text{Pb}(\alpha, \alpha)^{208}\text{Pb}$ örneğinden görüldüğü üzere elastik saçılmada, mermi parçacıkla saçılan parçacık ve hedef çekirdek de kalan çekirdek aynıdır ve genellikle gelen parçacığın yönü değişir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Laboratuvar koordinatlarında elastik saçılma temsili (Burcham, 1979)

1.1.2. İnelastik (esnek olmayan) saçılma

İnelastik saçılma, hedef parçacığın uyarıldığı çarpışma olarak basitçe tanımlanabilir. Mermi parçacık eğer Coulomb bariyerini aşacak bir enerjiye sahip ise, çarpışma esnasında hedef çekirdeği uyararak kinetik enerjisinin bir kısmını kaybeder. Böylece, çarpışma sonrasında kalan çekirdek, hedef çekirdeğin uyarılmış bir durumunda olur.

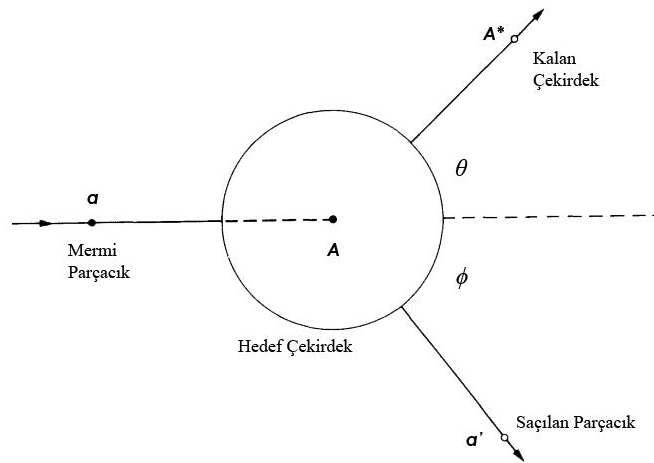
Saçılan parçacık, mermi parçacık ile aynı olsa da kinetik enerjisi farklıdır. İnelastik saçılma,

$$a + A \rightarrow A^* + a' + Q \quad (1.4)$$

olarak ifade edilebilir. Burada A^* , hedef çekirdeğin (A) uyarılmış durumu, a' ise saçılan parçacığı göstermektedir. Böyle bir çarpışmada çizgisel momentum korunsa da kinetik enerji korunmaz ve Q değeri sıfırdan farklıdır. Q değeri ile hedef çekirdeğin uyarılmış duruma geçmesi için gerekli olan enerji E_A arasında $Q = -E_A$ ilişkisi vardır.

İnelastik reaksiyondan farklı olarak inelastik saçılma, $^{27}\text{Al}(p, p')^{27}\text{Al}^*$ örneğinde olduğu gibi reaksiyona giren parçacıkların temel doğasını değiştirmez, ancak birinin veya her ikisinin enerji seviyelerini uyarır (Burcham, 1979).

Laboratuvar koordinatlarında iki parçacık arasındaki inelastik saçılmayı gösteren şema Şekil 1.3 ile verilmiştir.

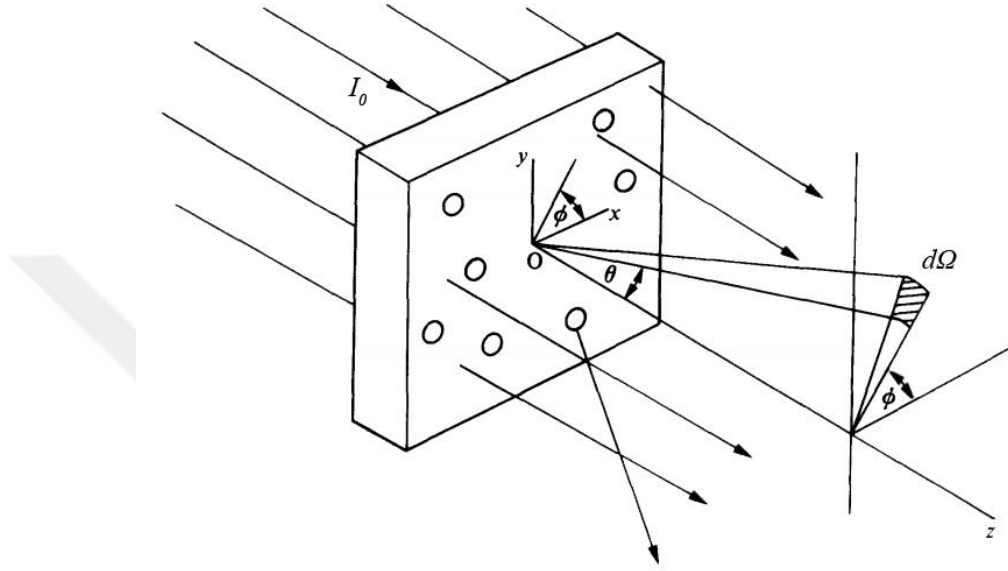


Şekil 1.3. Laboratuvar koordinatlarında inelastik saçılma temsili (Burcham, 1979)

1.2. Reaksiyon Tesir-Kesiti ve Diferansiyel Tesir-Kesiti

Nükleer etkileşmeleri ayrıntılı olarak incelemek için, bir reaksiyonun ya da saçılmanın gerçekleşme olasılığını ifade eden bir niceliğe gereksinim vardır. Bu nicelik deneysel olarak ölçülebilmesinin yanında teorik ve deneysel değerlerin kolaylıkla

karşılaştırılabileceği bir biçimde hesaplanabilen bir nicelik olmalıdır. Bu amaçla en sık kullanılan nicelik tesir-kesitidir. Basitçe, reaksiyon oluşumunun bağıl olasılığının bir ölçüsü olarak tanımlanabilen tesir-kesiti, reaksiyonların tartışılması ve yorumlanması adına, nükleer fizikte önemli bir yere sahiptir (Kaplan, 1977; Krane, 2002; Kürkçüoğlu, 2006).



Şekil 1.4. Gelen demet, hedef ve θ ile ϕ 'ye bağlı $d\Omega$ katı açısı içinde saçılan demeti temsil eden reaksiyon geometrisi (Burcham, 1979; Krane, 2002)

Şekil 1.4'de gösterildiği gibi hepsi aynı yönde hareket eden mermi demetinin durgun bir hedefe gönderildiği durumda, demet doğrultusuna göre (θ, ϕ) doğrultusunda yayınlanan b parçacığını kaydetmek üzere bir detektör yerleştirildiğinde, detektör hedef çekirdekte küçük bir $d\Omega$ katı açısı tanımlar. Birim zamanda gelen parçacıkların akımı I_0 , birim alandaki hedef çekirdek sayısı N ve çıkan parçacıkların sayısı R_b ile gösterilirse, reaksiyon tesir-kesiti σ ;

$$\sigma = \frac{R_b}{I_0 N} \quad (1.5)$$

biçiminde yazılır. Burada σ alan boyutuna sahiptir ve birimi “barn”dır. 1 barn, 10^{-24} cm^2 veya 100 fm^2 'dir ve aynı zamanda yaklaşık olarak $A=100$ kütle numaralı bir çekirdeğin geometrik kesit alanına eşittir (Lilley, 2018).

Detektörler sadece küçük bir $d\Omega$ katı açısı işgal ederler ve bu yüzden çıkan parçacıkların tümünü gözleyemezler. Bu durumda parçacıkların yalnızca küçük bir dR_b kesri detektörler tarafından sayılır ve böylece tesir-kesitinin sadece küçük bir $d\sigma$ kesri elde edilmiş olur. Ayrıca, giden parçacıklar genel olarak tüm doğrultularda eşyönlü yayınlanmadığından, θ 'ya ve muhtemelen ϕ 'ye bağlı bir açısal dağılıma sahip olurlar. Açısal dağılım fonksiyonu $r(\theta, \phi)$ ile gösterilirse, $dR_b = r(\theta, \phi)d\Omega/4\pi$ olacaktır. Böylece,

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_0 N} \quad (1.6)$$

olur. Burada $d\sigma/d\Omega$ niceliği diferansiyel tesir-kesiti olarak adlandırılır. Diferansiyel tesir-kesiti ölçümleri, reaksiyon ürünlerinin açısal dağılımları ile ilgili önemli bilgilerin edinilmesine olanak sağlar. Literatürde, genellikle $\sigma(\theta, \phi)$ veya $\sigma(\theta)$ ya da zaman zaman sadece *tesir kesiti* olarak ifade edilir. Katı açı *steradyan* cinsinden ölçüldüğü için diferansiyel tesir-kesiti birimi “*barn/steradyan*”dır. $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ olmak üzere

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (1.7)$$

elde edilir. $d\sigma/d\Omega$ sabit (açıdan bağımsız) olduğunda, integral $\sigma = 4\pi(d\sigma/d\Omega)$ olur. Bu, 4π sabitinin Eşitlik (1.6)'ya konulmasını doğrular ve R_b sabitine indirgenir (Krane, 2002; Kürkçüoğlu, 2006).

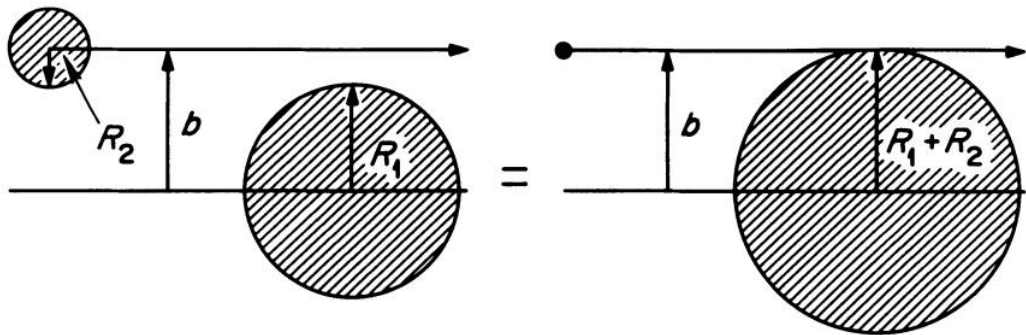
Diferansiyel tesir-kesitinin tüm açılar üzerinden integrali hesaplanarak toplam tesir-kesiti bulunur. Bir nükleer etkileşmenin toplam tesir-kesiti σ_t , elastik saçılma tesir-kesiti σ_e ile reaksiyon tesir-kesiti σ_r 'nin toplamına eşittir ($\sigma_t = \sigma_e + \sigma_r$). Birden çok reaksiyonun gerçekleştiği durumlar için her reaksiyonun tesir-kesitleri farklı olacağından toplam reaksiyon tesir-kesiti, kısmi reaksiyon tesir-kesitlerinin doğrultu ve yönleri dikkate alınmaksızın toplanmasıyla elde edilir ($\sigma_r = \sigma_{r_1} + \sigma_{r_2} + \sigma_{r_3} + \dots$) (Kürkçüoğlu, 2006).

Tesir-kesitinin kısmi ve diferansiyel şekilleri, çarpışan parçacıkların doğası ve aralarındaki kuvvetle ilişkilidir. Bu niceliklerin ölçümü, reaksiyon mekanizmasıyla

İlgili bilgi edinilmesinde çok önemlidir. Belirli bir reaksiyon tartışılırken, tesir-kesiti teriminin manası, ne ölçüldüğüyle doğrudan ilişkilidir (Krane, 2002; Williams, 2014). Çizelge 1.1’de farklı ölçümlerin, ölçüm teknikleri ve uygulamaları özet olarak verilmektedir.

Çizelge 1.1. Tesir-kesitlerinin elde edilmesinde kullanılan teknikler ve uygulamaları (Krane, 2002)

Tesir-Kesitleri	Sembol	Teknik	Uygulama
<i>Toplam</i>	σ_t	Demetin incelenmesi	Zırhlama
<i>Reaksiyon</i>	σ_r	Tüm açılar ve b 'nin tüm enerjileri üzerinden integrasyon	Bir nükleer reaksiyonda B radyoizotop üretimi
<i>Diferansiyel (Açısal)</i>	$d\sigma/d\Omega$	(θ, ϕ) 'de b 'nin gözlenmesi fakat tüm enerjiler üzerinden integrasyon	Belirli bir doğrultuda b parçacıklar demetinin oluşumu
<i>Diferansiyel (Enerji)</i>	$d\sigma/dE$	b gözlenmez fakat ardışık γ yayınlanması ile B 'nin uyarılması gözlenir	B 'nin uyarılmış durumlarının bozunmasının incelenmesi
<i>Çift Diferansiyel</i>	$d^2\sigma/dE_b d\Omega$	Belirli bir enerjide b , (θ, ϕ) 'de gözlenir	b açısal dağılımı ile B 'nin uyarılmış durumları hakkında bilgi edinme



Şekil 1.5. Katı iki kürenin çarpışması (Satchler, 1980)

Tesir-kesiti kavramı, Şekil 1.5 ile tasvir edilen, çarpışan iki kürenin durumu üzerinden, fiziksel olarak klasik bir biçimde tartışılabilir. R_2 yarıçaplı küre, durgun olan R_1 yarıçaplı küre üzerine gönderildiğinde, çarpma mesafesi b (vurma parametresi), R_1+R_2 toplamından küçük ya da eşit olmadığı müddetçe ($b \leq R_1+R_2$) çarpışma

gerçekleşmeyecektir. Bu durum, noktasal bir parçacığın, R_1+R_2 yarıçaplı bir disk ile çarpışmasıyla aynıdır. Çarpışmanın tesir-kesiti bu diskin alanıdır ($\pi(R_1+R_2)^2$). Buradan, tesir-kesitinin sadece hedefin bir özelliği olmadığı, aynı zamanda mermiye ait özellikleri de yansıttığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Farklı yarıçapa sahip bir mermi, hedef aynı olsa dahi, farklı bir tesir-kesiti verecektir. Bu bağlamda, bir saçılma ölçümünün sonuçlarından hareketle hedef çekirdeğin yarıçapı bulunmak istenirse, merminin etkisi muhakkak dikkate alınmalıdır. Ayrıca çekirdek gibi fiziksel sistemlerde keskin kenarlar yoktur. Yüzeyleri dağınıktır ve birbirlerine yaklaştıkça, sadece kısmen temas halinde oldukları bir geçiş bölgesi vardır. Sistemler arasında etkileşen kuvvetler bu durumu daha da karmaşık hale getirir. Kürelerin çarpışması üzerinden tartışılan klasik yaklaşımdaki etkileşim bir temas etkileşimidir, oysa nükleer kuvvetler sonlu mesafelerde etki ederler (Satchler, 1980).

Diferansiyel tesir-kesiti, deneysel ölçümlerin yanı sıra, saçılma problemi için kuantum mekaniksel yaklaşımla da hesaplanabilir. Kuantum mekaniğinde saçılma problemi bazı temel varsayımlarla ele alınır. Buna göre ilk olarak, mermilerin hareketsiz bir hedefe gönderildikleri varsayılır. Bu hedefin çok ağır olması halinde, etkileşmeden sonra hedefin hareketi ihmal edilir. Mermi ve hedefin kütlelerinin birbirine yakın olması durumundaysa, etkileşme iki-cisim problemi olarak ele alınır ve iki-cisim problemi de indirgenmiş kütlelerin bir potansiyelden saçılması problemine dönüştürülür. İkinci olarak, gelen parçacığın yeterli uzaklıktayken, herhangi bir potansiyelin etkisinde olmadan serbest parçacık gibi davrandığı kabul edilir. Böylece etkileşme potansiyelinin sonsuzdaki limiti sıfır olur. Bu varsayım asimptotik olarak düzlem dalgaların kullanılabilmesine olanak sağlar. Bu durumun matematiksel ifadesi Eşitlik (1.8) ile verildiği gibidir.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} rV(r) \rightarrow 0 \quad (1.8)$$

Mermi parçacıklarının hedefe sürekli olarak gönderildiği saçılma problemlerinde, zamana bağlı olma durumu ortadan kalkar ve zamandan bağımsız Schrödinger Denkleminin kullanımı mümkün hale gelir. $H\psi = E\psi$ Schrödinger Denkleminin çözümü dalga fonksiyonu, potansiyelin etkin olduğu bölgeden yeterli uzaklıkta, gelen (ψ_g) ve saçılan (ψ_s) dalga fonksiyonlarının toplamı olarak yazılabilir.

$$\psi \xrightarrow{r \rightarrow \infty} \psi_g + \psi_s \quad (1.9)$$

Gelen demetteki parçacıklar, sonsuzda serbest olacaklarından, düzlem dalga ile temsil edilebilir. Bu parçacıkların z-doğrultusunda hareket ettikleri varsayılarak $p = \hbar k = mv$ momentumuna sahip oldukları ve genliğin 1 olduğu düşünülürse gelen düzlem dalga fonksiyonu ψ_g ,

$$\psi_g = e^{i\vec{k}\vec{r}} = e^{ikz} \quad (1.10)$$

olacaktır. Saçılma sonucu $r = 0$ 'dan dışa doğru yayılan küresel dalga bileşeni bu düzlem dalgaya eklenmektedir. Elastik saçılma durumunda, dalga sayısının büyüklüğü değişmeden kalmaktadır. e^{ikr}/r formundaki küresel dalga her yöne aynı genlikte yayılmaktadır. $1/r$ ifadesi, küresel dalganın gittikçe genliğinin azalacağını göstermektedir. Saçılma merkezinden yeterli uzaklıktaki bir saçılma için dalga fonksiyonu

$$\psi_s = f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r} \quad (1.11)$$

şeklinde bir küresel dalga olarak yazılabilir. Burada $f(\theta)$, saçılan dalganın açısal dağılımını tanımlayan saçılma genliğidir. Gelen düzlem dalga ψ_g , saçılmadan önceki parçacık demetinin özelliklerini içerirken, ψ_s ise saçılan parçacıklara ait özellikleri içermektedir. ψ_s dalga fonksiyonu, r 'nin yeterince büyük olduğu hallerde serbest parçacık için Schrödinger Denkleminin asimptotik çözümü olacaktır. Bu durumda ψ dalga fonksiyonu,

$$\psi \xrightarrow{r \rightarrow \infty} e^{ikz} + f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r} \quad (1.12)$$

asimptotik sınır şartını sağlamalıdır. Düzlem dalgalar ϕ açısından bağımsız olduğundan, Eşitlik (1.12) ile verilen ifadede ϕ kutupsal açısında bağımlılık yoktur. Kuantum mekaniğindeki akı yoğunluğu kavramı diferansiyel tesir kesitini elde etmede kullanılabilir. Akı yoğunluğu, ψ dalga fonksiyonuna sahip parçacıklar için genel bir ifade ile,

$$\vec{J} = -\frac{i\hbar}{2m} [\psi^*(\vec{\nabla}\psi) - (\vec{\nabla}\psi^*)\psi] = \frac{\hbar}{m} \text{Im}(\psi^*\vec{\nabla}\psi) \quad (1.13)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadeye göre, gelen demetteki parçacıkların hepsinin $v = \hbar k/m$ hızına sahip oldukları varsayılırsa, dalga fonksiyonu $\psi_g = e^{ikz}$ formunda olan parçacıklar için akı,

$$J_g = \frac{\hbar}{m} \text{Im} e^{-ikz} \frac{d}{dz} (e^{ikz}) = v \quad (1.14)$$

biçiminde olacaktır. Küresel koordinatlarda gradyent operatörü,

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \hat{\phi} \quad (1.15)$$

şeklinde olduğu için, r 'nin büyük değerlerinde Eşitlik (1.15) ile verilen ifadede ikinci terim ve üçüncü terim ihmal edilebilmektedir. Böylece saçılan parçacıkların akısı,

$$J_s = \frac{\hbar}{m} \text{Im} f^*(\theta) \frac{e^{-ikr}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r} \right) = \frac{v}{r^2} |f(\theta)|^2 \quad (1.16)$$

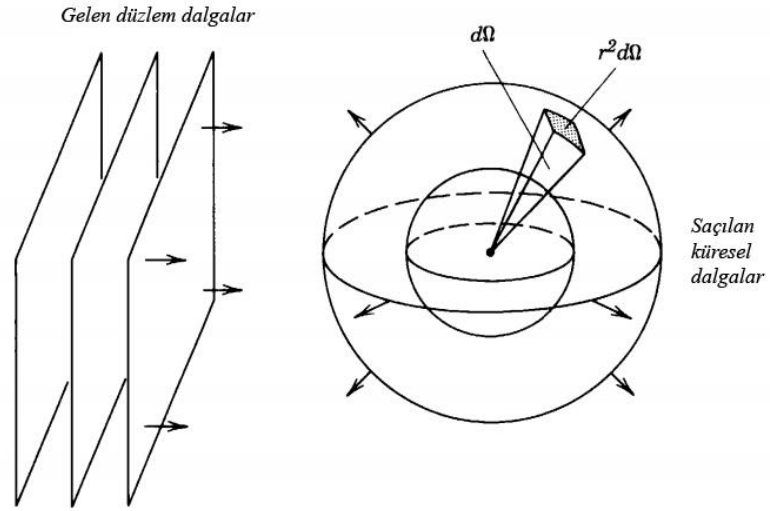
şeklinde yazılabilir. Burada, saçılan parçacıklar r yarıçaplı küre üzerine düzgün olarak dağılmıştır. Saçılmayı gözleyen detektör alanı (küre üzerindeki yüzey elemanı ($dA = r^2 d\Omega$)), saçılma merkezinde $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ katı açısını görmektedir (Şekil 1.6). $d\Omega$ katı açısı içine gelen parçacık demetinin saçılma olasılığı

$$d\sigma = \frac{J_s(r^2 d\Omega)}{J_g} \quad (1.17)$$

olacaktır ve bu olasılık *diferansiyel tesir-kesitidir*. Eşitlik (1.14) ve Eşitlik (1.16), Eşitlik (1.17)'de yerine yazılırsa, saçılma genliği cinsinden diferansiyel tesir-kesiti

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2 \quad (1.18)$$

olarak elde edilir (Kürkçüoğlu, 2006).



Şekil 1.6. Temel saçılma geometrisi (Krane, 2002)

Eşitlik (1.18) ile verilen ifadeden anlaşılacağı üzere saçılma genliğinin hesaplanmasıyla diferansiyel tesir-kesitinin de kuramsal olarak hesaplanması mümkün olacaktır. Bu bağlamda, hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen tesir-kesiti verileri birbirleriyle karşılaştırılarak, nükleer model yaklaşımlarının başarısı tartışılabilmekte, deney ve teorinin birlikte gelişim göstermesi sağlanabilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin deneysel ve teorik olarak incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Dünyada farklı gruplar tarafından uzun yıllardır ilgiyle çalışılan $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ reaksiyonuna ait bu çalışmalarla ilgili bilgiler, tezin bu bölümünde detaylara inilmeden kısa özetler halinde verilmiştir. Ayrıca son kısımda, optimizasyon tekniklerinin nükleer fizikte kullanımı ve makine öğrenmesi yaklaşımının fizik bilimindeki uygulamaları ile ilgili çalışmalardan da bahsedilmiştir.

Stiliaris vd. (1989) 350 MeV'de $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması için 61 dereceye kadar geniş bir aralıkta açısız dağılım ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, Fraunhofer kırınım desenlerinin yanı sıra, büyük açılarda net bir osilasyonlu yapı gözlediklerini bildirmişlerdir. Yarı klasik bir analizde, bu osilasyonlu yapının, iki kırıcı genliğin gökkuşağı girişiminden kaynaklandığını göstermişlerdir. Elde ettikleri verilerin, ilk kez bir ($A>6$) iyon saçılmasında kesin bir netlikle nükleer gökkuşağı yapısını gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Kondo vd. (1989) optik model çerçevesinde yaptıkları çalışmalarında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin elastik saçılması için en uygun fenomenolojik potansiyel derinliğini tanımlamak amacıyla tesir-kesiti verilerini incelemişlerdir. Çalışmada, $WS2+iWS$ formunda ele aldıkları potansiyelin gerçel kısmının derinliğini 278,8 MeV, sanal kısmının derinliğini ise 2,5 MeV olarak önermişlerdir. 15-40 MeV enerji aralığında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemindeki rezonans olgusunun, bir iyon-iyon potansiyeli cinsinden Pauli Prensibi ile tutarlı olarak başarılı bir şekilde tanımlanabileceğini ortaya koymuşlardır.

Kondo vd. (1990) diğer bir çalışmalarında nükleer gökkuşağı verilerini yeniden analiz ederek deneysel verilere eşit derecede uyan üç farklı optik potansiyel olduğunu göstermişlerdir. Bu üç potansiyelin varlığının, verilerin açısız aralığının sınırlı olmasından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Düşük enerjili $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemindeki rezonans olgusu analizleri ve optik potansiyelin gerçel ve sanal kısımları arasındaki dağılım ilişkisi göz önüne alındığında, çalışmalarında "Potansiyel A" olarak isimlendirdikleri $WS2+iWS2$ formundaki potansiyelin, $E_{LAB}=350$ MeV için en uygun aday olduğunu bildirmişlerdir.

Brandan ve Satchler (1991), $E_{LAB}=350$ MeV gelme enerjisinde $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının analizlerini daha genel optik model potansiyel şekilleri kullanarak yeniden ele almış, böylelikle açısal dağılımda gözlenen gökkuşağı sıralaması üzerindeki belirsizliği gidermeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında, $J_V \approx 295 \pm 5$ MeV fm^3 hacim integralini veren gerçel potansiyelin, birincil gökkuşağı olduğu sonucuna varmışlardır.

Khoa vd. (1991), $E_{LAB}=350$ MeV'de yapılan deneyde gözlenen gökkuşağı yapısının enerji bağımlılığı üzerine yaptıkları çalışmalarında, 240-480 MeV laboratuvar enerjilerinde $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Farklı katlı potansiyellerle çift-katlı modelin genelleştirilmiş bir halini kullandıkları analiz sonuçlarının, nükleer gökkuşağı bölgesindeki ilginç davranışın Pauli değiş-tokuş etkilerinden kaynaklanıp kaynaklanmadığını belirlemede yeterli olmadığı ve bazı ek verilere ihtiyaç duyulduğunu söylemişlerdir.

1993 yılında Bohlen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elastik saçılma, inelastik saçılma ve tek-nötron transfer kanalları, Q3D manyetik spektrometre kullanılarak 350 MeV'de $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi ve 390 MeV'de $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$ sistemi için geniş bir açısal aralıkta ölçülmüştür. Her iki sistem için diferansiyel tesir-kesitleri geniş açılarda yaklaşık 50 nb/sr'ye kadar ölçülmüş, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için bu seviyelerde kırıcı katkılar bulunurken, $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$ sistemi için kırıcı katkı belirlenememiştir. Çalışmada, elastik saçılma verileri Woods-Saxon potansiyelleri ve çift katlı modelle hesaplanan potansiyeller kullanılarak PTOLEMY ve ECIS kodlarıyla analiz edilmiştir. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için gözlenen kırılma deseni ile saçılma ve transfer verilerinin yaklaşık 2,5 fm'ye kadar mesafelerde etkileşim potansiyeline duyarlı olduğu bildirilmiştir (Bohlen vd., 1993).

Sugiyama vd. (1993) yaptıkları çalışmada, $E_{LAB}=350$ MeV'de nükleer gökkuşağı yapısının gözlemlendiği $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için, $E_{LAB}=145$ MeV enerjisindeki elastik saçılma açısal dağılım ölçümlerini gerçekleştirmiş ve bu enerjide nükleer gökkuşağı yapısının varlığını göstermişlerdir. Elde edilen verilerin analizi sonucunda $\theta_{KM}=54^\circ$ ve $\theta_{KM}=62^\circ$ değerlerinde sırasıyla Airy minimum ve Airy maksimumu belirlediklerini rapor etmişlerdir. Ayrıca, elde ettikleri verilere uyan $WS2+iWS2$ şekline sahip birkaç ayrı optik potansiyel seti bulmalarına rağmen, önceki çalışmalara dayanarak, bir tek

potansiyelin dispersiyon bağıntısına uyan gerçel hacim integrali ile uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

$E_{LAB}=350$ MeV gelme enerjisinde $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının ele alındığı bir başka çalışmada, iki aşamalı bir yöntemle tersine analizler yapılmıştır. Prosedür, sadece oldukça düzgün potansiyellerin elde edilmesi amacıyla kısıtlanmıştır. Çalışma sonuçları önceki analizlerle kıyaslandığında, potansiyellerin gerçel bileşenlerinin genel özellikleri bakımından katlı model tahminlerine benzer olduğu, sanal kısımların ise basitleştirilmiş bir Glauber modelinden elde edilenle oldukça benzerlik gösterdiği bildirilmiştir (Cooper ve Mackintosh, 1994).

Khoa vd. (1995), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasına ait 145, 250, 350 ve 480 MeV gelme enerjilerinde ölçülmüş saçılma verilerinin sistematik analizlerini katlı model potansiyelleri kullanarak yapmışlardır. Optik model analizlerinde, Paris nükleon-nükleon potansiyelinin G-matris elemanlarına dayanan yoğunluk bağımlı etkin etkileşmeyi kullanmış ve hesaplamalarını PTOLEMY kodu ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, açısal dağılımın kırıcı ve kırınımlı kısımlarının, etkin nükleon-nükleon etkileşmesi üzerine inşa edilmiş katlı potansiyel ile tanımlanabileceğini göstermişlerdir.

Bartnitzky vd. (1996), 250, 350, 480 ve 704 MeV enerjilerinde $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının tesir-kesiti ölçümlerini yaptıkları çalışmalarında, yüksek kaliteli verilere ulaştıklarını bildirmişlerdir. Kırınımlı ve kırıcı saçılma süreçlerini örnekleyen bu verilerin optik model ve model-bağımsız analizlerini yaparak saçılma potansiyellerini açıklamaya çalışmışlardır. Optik model analizlerinde Woods-Saxon potansiyel formunu kullanmış, potansiyelin gerçel ve sanal kısımlarını $WS2$ şeklinde seçmişlerdir. Potansiyelin sanal kısmına WSD formundaki yüzey terimini de ilave ederek 9 parametrelili analiz sonuçlarını sunmuşlardır. Model-bağımsız analiz sonuçlarının ise önceki katlı model analizleri ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, gerçel ve sanal potansiyellerin, hafif-iyon saçılmasında gözlenen sistematığe uyumlu olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca soğuk nükleer maddenin durum denklemi için bulgularının dikkatle incelenmesinin önemli olacağı önerisinde bulunmuşlardır.

Kondo vd. (1996), $E_{LAB}=124$ MeV'de $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için elastik saçılma açısal dağılımını ölçmüşler ve $\theta_{KM}=90^\circ$ 'deki uyarılma fonksiyonunda belirgin bir minimum gözlemlendiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca çalışmalarında, $E_{LAB}=145$ MeV'de $\theta_{KM}=90^\circ$ civarı saçılma açıları için ek açısal dağılım verilerinin de ölçümlerini yapmışlardır. Bu enerjiler için, yüzey terimini de içeren $WS2+i(WS2+WSD)$ şekline sahip optik potansiyelleri kullanarak yaptıkları analizlerin sonuçlarını makalelerinde sunmuşlardır. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, 124 MeV'de $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için, $\theta_{KM}=90^\circ$ 'deki uyarılma fonksiyonunda göze çarpan minimumunun, muhtemel bir Airy minimumdan kaynaklandığı sonucunu öne sürmüştür.

Nuoffer vd. (1998), 250-1120 MeV enerji aralığında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının deneysel ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Ölçümlerden elde edilen verilerin analizlerini, $WS2$ şekil çarpanlarını ve model-bağımsız analiz yöntemlerini kullanarak iki farklı şekilde yapmışlardır. Model-bağımsız analizlerinde, potansiyelin gerçel ve sanal kısımlarını Laguerre-Gaussian fonksiyonlarına genişleterek, saçılma verilerinin en iyi tanımını elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Nicoli vd. (1999a), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin elastik saçılması üzerine yaptıkları çalışmalarında $E_{LAB}=75-124$ MeV arasında dokuz enerji için ölçümler yapmışlardır. Optik potansiyelin $WS2$ şeklindeki gerçel kısmının, incelenen aralık boyunca, enerji ile çok az değiştiğini, ancak sanal kısmın şeklinin 90 MeV civarlarında hızlı bir biçimde değiştiğini göstermişlerdir. Buna rağmen, potansiyelin gerçel ve sanal bileşenlerinin hacim integralinin enerji bağımlılığının, dağılım ilişkisi tahminleriyle uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca aynı yıl yayınladıkları bir başka makalelerinde Nicoli ve arkadaşları, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ reaksiyonunun nükleon başına 5 ve 10 MeV enerjilerde hafif-ağır iyon elastik saçılmasının kırıcı etkilerini incelemişlerdir. Kırıcı etkilerin, ele alınan bu sistem için, nükleer gökkuşakları ve buna bağlı Airy yapılarına yol açtığı rapor edilmiştir (Nicoli vd., 1999b).

2000 yılında sonuçları yayınlanan bir diğer çalışmada, $E_{LAB}=124, 145, 250, 350, 480, 704$ ve 1120 MeV enerjilerinde, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılma verilerinin optik model analizleri gerçekleştirilmiştir. Standart optik model analizlerinde, $WS2+iWS2$ şeklindeki fenomenolojik potansiyeller kullanılmıştır. Hesaplamalarda, saçılma desenini tanımlayabilmek adına, optik potansiyelin sanal kısmına yüzey terimi ilave

edilmiştir. Analizler PTOLEMY kodu kullanılarak yapılmıştır. Standart optik model analizlerinin yanında katlı model analizleri de gerçekleştirilmiş ve potansiyelin gerçel kısmı Paris NN potansiyelinin G-matris elemanlarına dayanan M3Y etkileşimi kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, 124-1120 MeV enerji aralığında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminde kırıcı saçılma deseninin evrimi net biçimde gösterilmiştir. Ayrıca, 350 MeV’de en belirgin gökkuşağı deseni gözlenmiş, ele alınan enerjiler için Airy minimumların pozisyonlarının enerji bağımlılığı tespit edilmiştir (Khoa vd., 2000).

Gonzalez ve Brandan (2001), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ reaksiyonu için 124-1120 MeV enerji aralığında, potansiyelin enerjiye bağımlılığından hareketle, sanal potansiyelin şekli üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, dağılım ilişkisi hem enerji hem de yarıçapın bir fonksiyonu olarak $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için belirlenmiş $WS2+WSD$ şeklindeki fenomenolojik sanal potansiyele uygulanmıştır. Elastik saçılma verileriyle en iyi uyumun, potansiyelin sanal kısmının yalnızca bir hacim teriminden oluşacak şekilde basitleştirildiğinde sağlandığı sonucu öne sürülmüştür. Ayrıca, nükleon başına 10 MeV ve daha yüksek enerjiler için fenomenolojik optik potansiyellerin, derin gerçel bir kısım ile zayıf sanal bir kısma sahip oldukları bildirilmiştir.

İnelastik $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ saçılması üzerine Khoa vd. (2005) tarafından yapılan bir başka çalışmada, ^{16}O ’nin 2^+ ve 3^- uyarılmış durumları için, $E_{LAB}=250, 350, 480, 704$ ve 1120 MeV enerjilerinde, inelastik saçılma verileri analiz edilmiştir. Çalışmada, katlı modelden elde edilen inelastik şekil çarpanı ve yarı-mikroskobik optik potansiyeller kullanılarak, Bozunmuş Dalga Born Yaklaşımı (DWBA) ile analizler gerçekleştirilmiştir. Optik model ve DWBA hesaplamaları için ECIS97 kodu kullanılmıştır. İnelastik $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ saçılmasının kırılma deseni, elastik saçılma kanalında gözlenen desene göre daha az belirgin olmasına rağmen $E_{LAB}=350-704$ MeV’de nükleer gökkuşağı maksimumunun net bir izinin görülebildiği bildirilmiştir.

Kürkçüoğlu vd. (2006a), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ reaksiyonuna ait deneysel elastik saçılma verilerini $E_{LAB}=75, 80,6$ ve $87,2$ MeV’de optik model çerçevesinde analiz etmişlerdir. Fenomenolojik ($WS2+iWS2$), çift-katlı ve çift-katlı alfa kümelenme potansiyelleri ile analizlerini gerçekleştirmiş, hesaplamalarında Fresco kodunu kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçların önceki çalışmalar ve deneysel ölçümler ile iyi bir uyum sergilediğini göstermişlerdir. $I^\pi = 2^+$ ve 3^- kanallarından kaynaklanan soğrulmanın

dikkate alınmasıyla deneysel verilerle uyumun geliştirilebileceği önerisini sunmuşlardır.

Kürkçüoğlu ve arkadaşları 2006 yılında makalesi yayınlanan diğer bir çalışmalarında 5-10 MeV/nükleon enerji aralığında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin elastik saçılma verilerini, optik model yaklaşımıyla α - α çift-katlı kümelenme potansiyeli kullanarak analiz etmişlerdir. Hesaplamalarını Fresco kodunda gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarını, fenomenolojik Woods-Saxon kare potansiyeli ($WS2+iWS2$) ve nükleon-nükleon çift-katlı potansiyelinin kullanıldığı analizlerle karşılaştırmışlardır. Bu üç potansiyel formu ile yapılan analiz sonuçlarının, elastik saçılma açısal dağılım ölçümleri ile oldukça iyi uyum gösterdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, α - α çift-katlı kümelenme potansiyeli ile nükleon-nükleon çift-katlı potansiyelinin kullanıldığı hesaplamaların birbiriyle gayet tutarlı sonuçlar ürettiğini rapor etmişlerdir (Kürkçüoğlu vd., 2006b).

Gridnev vd. (2008), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ ve $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ sistemlerinin elastik saçılmalarına ilişkin deneysel verileri, optik model ve birleşik bir yaklaşımı temel alan iki yöntemle analiz etmişlerdir. Önerilen yöntemlere dayalı DWUCK4 kodunu kullanarak yaptıkları hesaplama sonuçlarının deneysel veriler ile iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda, çekirdek büyüklüğünün nükleer maddenin sıkıştırılmazlık katsayısı üzerindeki etkisi için $K=205 \text{ MeV} \pm \%15$ aralığında değerler elde ettiklerini rapor etmişlerdir.

Gridnev ve Rodionova (2008), $E_{LAB}=87,2, 94,8$ ve $103,1 \text{ MeV}$ 'de $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması ve $E_{LAB}=132, 170, 181, 200$ ve 230 MeV 'de $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ elastik saçılmasının deneysel verilerini geri açı (backward angle) aralığında analiz etmişlerdir. İleri açı aralığında itici çekirdek göz önüne alınarak optik model çerçevesinde hesaplamalar gerçekleştirilmiş, geri açı aralığında ise açısal dağılım bozunmuş dalga yaklaşımı ile DWUCK kodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında, elastik transfer sürecinin geri açı aralığında, deneysel verilerin iyi bir tanımlamasının yapıldığı bildirilmiştir.

Furumoto vd. (2009), itici ve çekici üç-cisim kuvvetlerinin çekirdek-çekirdek elastik saçılması üzerindeki etkilerini kapsamlı bir çalışma ile incelemişlerdir. Çalışmada

$^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması $E/A=70$ MeV’de detaylı olarak analiz edilmiş, gözlenen tesir-kesitlerinin, yalnızca üç-cisim kuvvetinin etkisi dahil edildiğinde, geri saçılma açılarına kadar yeniden üretildiği bildirilmiştir. 2008 yılında yayınladıkları bir diğer çalışmalarında (Furumoto vd., 2008) önerilen CEG07 G-matrisinin başarısını test etmişler ve üç-cisim kuvvetinin belirleyici etkisinin açıkça görüldüğünü ortaya koymuşlardır. Ayrıca CEG07 G-matris etkileşmesini kullanarak $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi elastik saçılmasının analiziyle üç-cisim kuvveti etkisinin çekirdek-çekirdek saçılmasında oynadığı rolü irdelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, çekirdek-çekirdek sistemleri için CEG07 ile çift-katlı model tarafından güvenilir bir kompleks optik model potansiyeli inşa etmek için mikroskobik bir model oluşturmaya yönelik adım atıldığına dikkat çekilmiştir.

Davidovskaya ve Denisov (2010), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasını 124, 145, 250, 350 ve 480 MeV enerjilerinde, optik model yaklaşımı ile çekirdek-çekirdek potansiyelini kullanarak analiz etmişlerdir. Çekirdeği dikkate alarak yaptıkları hesaplamalarda, geri açı aralığında, elastik saçılma tesir-kesitinde bir artış olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, reaksiyonun toplam tesir-kesitinin çekirdeğe bağlı olmadığını belirtmişlerdir.

Koçak vd. (2010), Coulomb bariyerinin yakınında ve altında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için elastik saçılma açısal dağılımlarının ve füzyon tesir-kesitlerinin ortak bir analizini gerçekleştirmişlerdir. Optik model çatısı altında, Fresco ve DF POT kodu kullanılarak yapılan analizlerde, mikroskobik ve fenomenolojik $WS+iWS$ şeklindeki potansiyeller kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin reaksiyon gözlenebilirlerini sistematik olarak tanımlamak adına, α - α çift-katlı kümelenme potansiyelinin önemine dikkat çekilmiştir. Ayrıca, bu potansiyelin füzyon, S-faktörü ve elastik saçılma açısal dağılım verilerinin eşzamanlı bir açıklamasını sağladığı bildirilmiştir.

Deneysel ölçümler ve teorik hesaplamaların birlikte yapılarak sunulduğu bir diğer çalışmada, düşük enerjilerde $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ ve $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılma açısal dağılımları ele alınmıştır. Deneysel prosedürler, Kazakistan’ın Astana kentinde bulunan ve Lityumdan Ksenon’a, nükleon başına enerjileri 0,35 MeV ile 1,75 MeV arasında değişen elementleri hızlandırabilen siklotron DC-60 INP NNC’de hızlandırılmış ^{16}O ve ^{12}C ışınları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Teorik hesaplamalar $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ için

$E_{LAB}=18$ ve 21 MeV’de, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ için ise $E_{LAB}=24$ ve 28 MeV’ de fenomenolojik ($WS+iWS$) ve katlı potansiyeller ile SPI-GENOA ve Fresco kodlarının kullanımıyla yapılmıştır. Yazarlar, deneysel veriler ile hesaplama sonuçları arasındaki uyumun tüm açısız aralıkta oldukça iyi olduğu sonucunu bildirmişlerdir (Hamada vd., 2012).

Hassanain vd. (2013), 124, 145, 250, 350, 480, 704 ve 1120 MeV bombardıman enerjilerinde, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılma diferansiyel tesir-kesitinin açısız dağılımı için $WS2+i(WS2+WSD)$ yapısındaki fenomenolojik ve mikroskobik $M3Y$, $DFC1$, $DFC2$ potansiyellerini kullanarak HIOPTIM-94 ve HERMES kodları ile optik model analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucunda, teorik tahminlerle deneysel veriler karşılaştırıldığında, kullanılan tüm potansiyeller ile tatmin edici sonuçlar üretildiğini bildirmişlerdir. Elde ettikleri hacim integralleri ve reaksiyon tesir-kesitlerinin çoğunun, önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile tutarlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Böylece ağır-iyon optik potansiyelin enerji bağımlılığının, dikkate aldıkları katlı modelin iki versiyonu tarafından başarı ile tahmin edildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Hamada vd. (2013), 20, 24 ve 28 MeV enerjilerinde $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılma açısız dağılımının deneysel ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Ölçümlerden elde edilen verileri optik model yaklaşımı ile fenomenolojik ($WS+iWS$) ve mikroskobik potansiyeller kullanarak analiz etmişlerdir. Analizlerinde SPI-GENOA ve Fresco kodunu kullanmışlardır. Gözlemlenen açısız aralıkta, deneysel veriler ile teorik hesaplamalar arasında iyi bir uyum olduğunu bildirdikleri çalışmalarında, normalizasyon katsayısını 0,833-1,07 aralığında belirlemişlerdir. Deneysel verilerin tipik Fresnel saçılma desenini gösterdiği ve 90 derece yakınında simetrik girişimin açıkça gözlemlendiği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Kürkçüoğlu ve arkadaşları $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması üzerine yaptıkları bir çalışmada, 5-10 MeV/nükleon enerji aralığında optik model yaklaşımı ile $WS2+iWS2$ ve $WS2+iWS$ şekline sahip fenomenolojik potansiyeller kullanarak deneysel açısız dağılım verilerini analiz etmişlerdir. Makalelerinde, gerçel potansiyel parametrelerinin hemen hemen sabit olduğu ve nükleer potansiyelin sanal kısmının potansiyel derinliği için gelme enerjisine bağlı lineer bir ifade ileri süren analizlerin başarıyla gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Derin, çekici bir gerçel potansiyel ve nispeten zayıf,

enerji bağımlı soğurucu yapıdaki sanal potansiyelden oluşan optik potansiyeller ile $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının global bir tanımının ortaya koyulduğu çalışmada, deneysel ölçümler ile hesaplama sonuçlarının uyumuna dikkat çekilmiş, bu enerji aralığında maksimum ve minimumların büyük oranda doğru tahmin edilebildiği rapor edilmiştir (Kürkçüoğlu vd., 2013).

Hassanain ve Al Sebiey (2014), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik ve inelastik saçılmalarını optik model yaklaşımı ve çiftlenmiş kanal mekanizması ile analiz etmişlerdir. $E_{LAB}=250, 350, 704$ ve 1120 MeV enerjilerde inelastik $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ saçılması için yarı-mikroskobik optik potansiyel ve fenomenolojik $WS2$ potansiyeli ile verilen inelastik şekil çarpanı kullanımıyla analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri gerçel potansiyellerle birlikte fenomenolojik $WS2$ potansiyelinin, elastik ve inelastik saçılma açısız dağılımları için deneysel verilerle tatmin edici uyumunu göstermişlerdir. Çiftlenmiş kanal mekanizması çerçevesinde, fenomenolojik potansiyellerin sanal kısmının $WS2$ şeklinde olmasının, özellikle düşük enerjilerde ölçülen açısız aralıkta, elastik ve inelastik verilerle uyumu önemli ölçüde iyileştirdiği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Kürkçüoğlu ve Tülüler (2015), $E_{LAB}=75, 80,6$ ve $87,2$ MeV gelme enerjilerinde $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması üzerine yaptıkları çalışmada, nükleer potansiyele eklenen sığ yapıdaki ek potansiyellerin optik model analizleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ek potansiyelleri, $WS2+iWS2$ formundaki nükleer potansiyelin gerçel ve sanal kısımlarına ekleyerek analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Fresco kodunu kullanarak yaptıkları analizlerin sonucunda, genel olarak, sanal kısma eklenen ek potansiyeller ile yapılan analiz sonuçlarının daha başarılı olduğunu bildirmişlerdir. Çalışma özelinde, %30 potansiyel derinliğine sahip Woods-Saxon Derivatif (WSD) formundaki ek potansiyelli analizlerin, elastik saçılma açısız dağılım verilerini üretmekte daha başarılı olduğu sonucuna varmışlardır.

Tülüler (2015), optik model yaklaşımıyla ele aldığı $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin elastik ve inelastik saçılmalarının analizlerini $145-1120$ MeV enerji aralığında fenomenolojik potansiyeller kullanarak gerçekleştirmiştir. Analizlerinde, optik potansiyelin gerçel kısmını $WS2$, sanal kısmını ise WS ve $WS2$ formunda seçerek hesaplamalarını gerçekleştirmiştir. Ayrıca, WSD formundaki yüzey terimini de optik potansiyele ilave ederek derin ve sığ yapıdaki ek-potansiyellerin etkisini de araştırmıştır.

Hesaplamalarında Fresco kodunu kullanmış ve analizlerinin ardından en iyi sonuçlara $WS2+iWS2$ formundaki potansiyel yapısı ile ulaşıldığını bildirmiştir. İnelastik saçılma formalizmi altında 2^+ ve 3^- uyarılmış kanallarının hesaplamalara dahil edilmesiyle, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ saçılması için en başarılı optik model analizlerinin yapılabildiğini rapor etmiştir.

Minomo vd. (2016), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ ve $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ saçılmalarını ele aldıkları çalışmada, elastik ve inelastik tesir-kesitleri üzerindeki çiftlenmiş kanallar ve üçlü-çekirdek kuvvetinin (3NF) etkilerini, mikroskobik çiftlenmiş kanal yöntemi ile analiz etmişlerdir. Mikroskobik çiftlenmiş kanal hesaplamalarında, 3NF etkilerine göre değiştirilmiş Melbourne G-matris etkileşmesini kullanmışlardır. Çiftlenmiş kanallar ve 3NF etkilerinin göz önüne alınmasıyla elastik ve inelastik tesir-kesitlerinde değişiklik olduğunu ifade eden yazarlar, 3NF etkilerini içeren çiftlenmiş kanal hesaplamalarının, teorik sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki uyumu önemli ölçüde iyileştirdiğini rapor etmişlerdir.

Rahmat ve Modarres (2018), $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ ve $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ saçılmalarının deneysel verilerini makalelerinde tanımladıkları LOCV AEI yöntemi ile optik model çerçevesinde analiz etmişlerdir. $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ için 112, 126,7, 250, 300 ve 360 MeV, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ için ise 124, 145, 250, 350 ve 480 MeV gelme enerjilerinde, Fresco kodunda LOCV AEI kullanarak, tesir-kesiti hesaplamalarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, LOCV AEI'nin nükleer madde ve ağır-iyon elastik saçılma verilerine makul bir açıklama sağladığını bildirmiş ve buna bağlı olarak LOCV AEI'nin, nükleer madde ve sonlu çekirdekler için iyi bir nükleon-nükleon etkileşmesi adayı olduğunu öne sürmüşlerdir.

Optimizasyon teknikleri, enerji seviyeleri ve spektrumlar gibi niceliklerin, teorik olarak hesaplanmış verileri ile deneysel ölçümleri arasında iyi bir eşleşme elde etmek için nükleer fizik hesaplamalarında kullanılabilir. Literatürde, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin incelenmesinde optimizasyon tekniklerinin kullanılması ile ilgili çalışmalar pek göze çarpmamasına rağmen, nükleer fizikte, optimizasyon başlığı altında çalışmalara rastlamak mümkündür. Optimizasyon tekniklerinin nükleer fizik hesaplamalarına entegre edilmesi (Sosonkina vd., 2008), nükleer fizikte bayes optimizasyonu (Ekström vd, 2019), nükleer kabuk modeli hesaplamalarında kullanılan tek-parçacık enerjilerinin optimizasyonu (Öztürk, 2010; Dikmen vd., 2015) gibi teorik

çalışmaların yanı sıra, radyasyondan korunma, nükleer reaktörler ve güvenliklerinin tasarımları gibi nükleer mühendislikteki uygulamalara yönelik çalışmalar da bulunmaktadır (Sacco vd., 2006; Norouzi vd., 2013; Chen vd., 2021). Optimizasyon algoritmaları kullanılarak $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının optik model analizlerinin yapıldığı bu tez çalışmasının da literatüre bu konuda katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Son yıllarda, bilimsel çalışmalara katkı sağlamak adına, makine öğrenmesi yaklaşımları birçok bilimsel disiplinde kullanılmaya başlanmıştır. Makine öğrenmesi, doğrudan bilimsel sonuçları tahmin ya da tayin etmekten ziyade, çalışma sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesinde yardımcı olabilmektedir. Carleo vd. (2019) tarafından yayınlanan derleme makalesinde, makine öğrenmesi ve fizik bilimi arasındaki ilişki kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır. Çalışmada, her ne kadar başarılı sonuçlar ortaya koysa da, makine öğrenmesinin fizik bilimi ile arasındaki etkileşimin henüz emekleme aşamasında olduğu vurgulanmıştır. Bir başka çalışmada (Neudecker vd., 2020), makine öğrenmesinin, nükleer veri doğrulama analizleri için yardımcı bir araç olarak kullanılabilmesi önerilmiş, makine öğrenmesi algoritmalarının şüpheli verilerin değerlendirilmesi ve eksik verilerin telafi edilmesinde kısmen katkı sağladığı bildirilmiştir. Deneysel verilerin yokluğunda yapay sinir ağları algoritmalarının dev dipol rezonans parametrelerinin hesaplanmasında kullanılabilmesi üzerine yakın zamanda yapılan teorik çalışmalar ise spesifik bir örnek olarak gösterilebilir (Özdoğan vd., 2021a; 2021b).

3. YÖNTEM

3.1. Optik Model

İki çekirdek arasındaki bir nükleer etkileşmeyi tanımlamak için Schrödinger denkleminin, sistemin her bir nükleonu için yazılması gerekir. Her nükleon, sistemdeki diğer nükleonlar tarafından oluşturulan potansiyel kuyuda olduğundan karşımıza çok-parçacık problemi çıkmaktadır. Parçacık sayısının birkaç taneden fazla olması durumunda matematiksel olarak çözülmesi neredeyse imkansız olan çok-parçacık problemine farklı yaklaşımlar ile çözüm yöntemleri bulunması gerekir. Böyle durumlarda basitleştirilmiş, matematiksel olarak kolay çözülebilen ve fiziğin temel özelliklerini içeren modellerden faydalanılmaktadır. Bu modellerden birisi olan optik model temelde, mermi nükleonları ile hedef nükleonları arasındaki etkileşmeler yerine, mermi ve hedefin taban durumlarındaki ortalama ve merkezi bir etkileşmeyi göz önüne alarak problemi çözmeyi hedefler.

Nükleer saçılmaları açıklama noktasında gayet başarılı sonuçlar veren optik model, özellikle elastik saçılmanın incelenmesinde önem arz eder. Saçılma problemini daha kolay anlamayı sağlayan bu model, mermi ile hedef arasındaki iki-cisim etkileşmesini, indirgenmiş kütlelerin bir potansiyelden saçılması problemine indirger. Hedefe gönderilen mermi parçacık, kabuk modelindeki gibi bir potansiyel kuyusu ile karşı karşıyadır ancak bu potansiyel sanal bir bileşene de sahiptir. Bir nükleer etkileşme için, mermi ve hedef arasındaki iki-cisim etkileşmesini temsil eden potansiyel, mermi ve hedef arasında oluşan elastik saçılma ve reaksiyonların tümüne uygun olmalıdır. Genellikle, etkileşme potansiyelinde gerçel kısım elastik saçılmayı, sanal kısım ise soğrulmayı ifade eder (Satchler, 1980; 1983; Kürkçüoğlu, 2006).

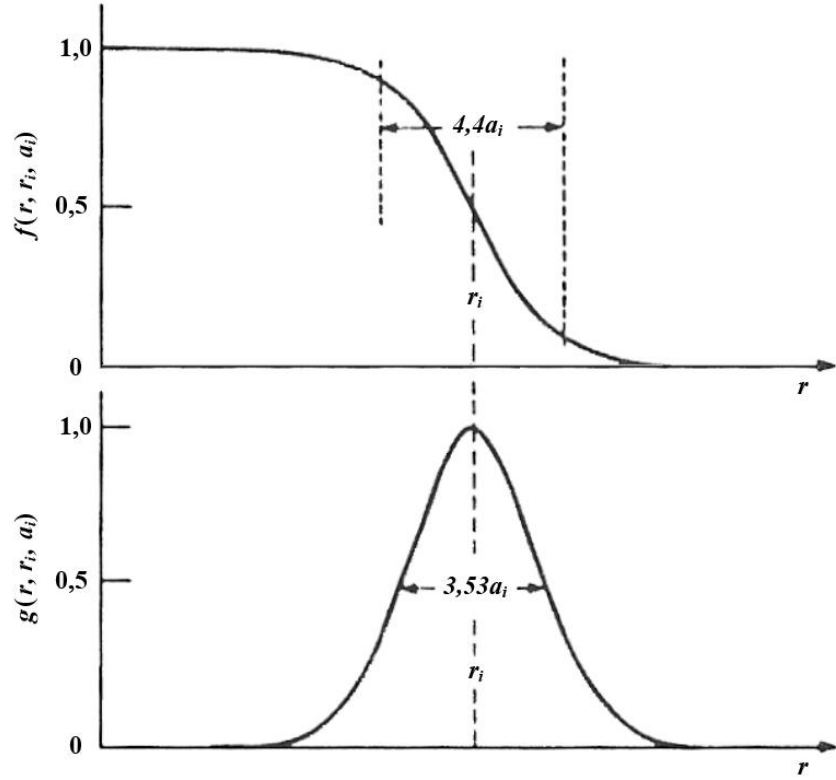
Karmaşık kırılma indisine sahip bir ortamda ışığın sergilemiş olduğu kırılma, yansıma ve soğrulma özelliklerine benzerliğinden hareketle *optik potansiyel* olarak adlandırılan ve Eşitlik (3.1) ile verilen şekle sahip kare kuyu potansiyeli literatürdeki ilk optik potansiyel olarak tanımlanmıştır (Fesbach vd., 1954).

$$V(r) = \begin{cases} -(V_0 + iW) & r \leq r_0 A^{1/3} \\ 0 & r \geq r_0 A^{1/3} \end{cases} \quad (3.1)$$

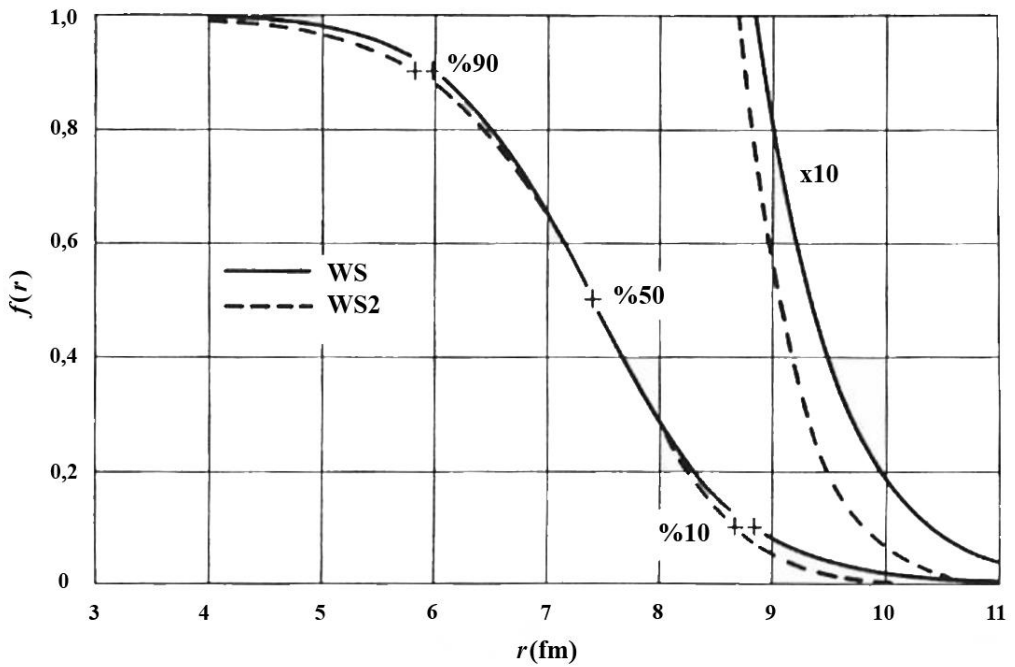
Burada V_0 ve W sırasıyla, optik potansiyelin gerçel ve sanal kısımlarının derinliklerini ifade eder. Sonraki yıllarda yapılan çalışmalarla başarısı ve geçerliliği ortaya konan optik model için farklı şekle sahip etkileşim potansiyelleri önerilmiştir. Optik modelin uygulanması için ilk olarak uygun bir potansiyel şekli belirlenmesi gerekliliğinden yola çıkarak, mermi parçacık ile hedef arasındaki nükleon-nükleon etkileşmesinin büyük uzaklıklarda üstel olarak azalmasından dolayı optik potansiyelin de benzer özellikleri sergilemesi beklenir (Krane, 2002). Bu duruma uygun olarak, artan yarıçapla üstel olarak azalan ve çekirdek kuvvetlerinin doyum özelliğini sağlayacak şekilde sabit olan Woods-Saxon (WS) potansiyeli 1954 yılında tanımlanmıştır (Woods ve Saxon, 1954). Optik potansiyelde kullanılan WS şekil çarpanı

$$f^n(r, r_i, a_i) = \frac{1}{\left[1 + \exp\left(\frac{r - r_i(A_p^{1/3} + A_t^{1/3})}{a_i}\right)\right]^n} \quad (3.2)$$

ile verilir. Eşitlikte r ve r_i sırası ile mermi ile hedef çekirdek merkezleri arası uzaklığı ve çekirdek potansiyelinin merkez değerinin yarısına düştüğü yarıçapı (indirgenmiş yarıçap) göstermektedir. A_t hedef çekirdeğin kütle numarası ve A_p ise mermi çekirdeğin kütle numarasını temsil eder. a_i , potansiyelin maksimum değerinin %90'ından %10'una düştüğü noktalar arasındaki uzaklıktan elde edilen yayılma (difüzyon) parametresidir. Şekil 3.1'de $f(r, r_i, a_i)$ ve bunun türev biçimi $g(r, r_i, a_i)$ fonksiyonlarının uzaklığa göre değişimleri verilmiştir. Eşitlik (3.2)'de WS formu için $n = 1$ ve Woods-Saxon kare ($WS2$) formu için $n = 2$ alınır. Şekil 3.2'de, WS ve $WS2$ formlarının uzaklığın fonksiyonu olarak sergiledikleri davranışlar gösterilmektedir. İki potansiyel formu arasındaki fark, şekil çarpanının hemen hemen %90'a ve %10'a düştüğü değerlerde kendini belli etmektedir. Bu fark Şekil 3.2'de WS ve $WS2$ formları 10 kez yakınlaştırılarak ayrıca vurgulanmıştır.



Şekil 3.1. *WS* şekil çarpanı ve türev formu (Satchler, 1980)



Şekil 3.2. *WS* ile *WS2* formlarının uzaklığa göre değişimlerinin karşılaştırılması (Satchler, 1983)

3.2. Optik Model Potansiyeli

Optik modelde bir saçılma problemi için etkileşim potansiyelinin en genel ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$V(r) = V_C(r) + V_{NR}(r) + iW_{NI}(r) + \hbar^2\{V_{SR}(r) + iW_{SI}(r)\}(\vec{S} \cdot \vec{L}) + V_l(r) \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte, mermi ile hedef çekirdeğin kütle merkezleri arasındaki uzaklığa bağlı olmak üzere, $V_C(r)$ Coulomb potansiyelini, $V_{NR}(r)$ ve $iW_{NI}(r)$ nükleer potansiyelin gerçel ve sanal kısımlarını, $V_{SR}(r)$ ve $iW_{SI}(r)$ spin-yörünge potansiyelinin gerçel ve sanal kısımlarını, $V_l(r)$ ise merkezci potansiyeli ifade eder. \vec{S} ile \vec{L} operatörleri merminin spin ve yörüngesel açısal momentum operatörleridir.

Coulomb potansiyeli, yüklü parçacıkların etkileşimlerinde göz önüne alınarak, düzgün yük dağılımına sahip $R_C = r_c A^{1/3}$ yarıçaplı bir kürenin potansiyeli olarak yazılabilmektedir (Satchler, 1980).

$$V_C(r) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_p Z_t e^2}{r} & r \geq R_C \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_p Z_t e^2}{2R_C} \left(3 - \frac{r^2}{R_C^2}\right) & r < R_C \end{cases} \quad (3.4)$$

Burada $Z_p e$ merminin, $Z_t e$ ise hedef çekirdeğin yüküdür. $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ saçılması için yapılan deneylerde $r_c = 1,4$ fm olarak tespit edilse de kuantum mekaniksel düzeltmeler ile $r_c = 1,2$ fm olduğu ortaya konmuştur (Brandan ve Satchler, 1997).

Nükleer potansiyelin gerçel kısmı Eşitlik (3.5) ile verilmiştir. V_0 potansiyel derinliğine sahip fenomenolojik Wood-Saxon tipindeki bu potansiyel ifadesinde, A_t hedef çekirdeğin kütle numarası ve A_p mermi çekirdeğin kütle numarası olmak üzere, $A^{1/3} = (A_t^{1/3} + A_p^{1/3})$ 'dir. WS formu için $n = 1$ ve $WS2$ formu için $n = 2$ alınır.

$$V_{NR}(r) = \frac{-V_0}{\left[1 + \exp\left(\frac{r - r_0 A^{1/3}}{a_0}\right)\right]^n} \quad (3.5)$$

Optik potansiyelde, inelastik saçılmalarla ilgili olmasına rağmen, elastik saçılmalarda da bulunması zorunlu olan sanal kısım, çekirdek hacmindeki soğrulma ile çekirdek yüzeyindeki soğrulmayı ifade eden bileşenlerden oluşur. Sanal hacim potansiyeli V_{NI} ve sanal yüzey potansiyeli V'_{NI} olmak üzere sanal potansiyel

$$W_{NI}(r) = V_{NI} + V'_{NI} \quad (3.6)$$

biçiminde yazılabilir. $WS(n = 1)$ veya $WS2(n = 2)$ formunda olabilen sanal hacim potansiyeli Eşitlik (3.7)'de verilmiştir.

$$V_{NI}(r) = \frac{-W_V}{\left[1 + \exp\left(\frac{r - r_V A^{1/3}}{a_V}\right)\right]^n} \quad (3.7)$$

Sanal yüzey potansiyeli ise çekirdek yüzeyinde en büyük olacak şekilde Gaussian veya Woods-Saxon Derivatif (WSD) formunda olabilmektedir (Brandan ve Satchler, 1997). Bu ifadeler sırasıyla Eşitlik (3.8) ve Eşitlik (3.9) ile verilmiştir.

$$V'_{NI}(r) = -W_S \exp\left\{-\left[\frac{r - r_S A^{1/3}}{b}\right]^2\right\} \quad (3.8)$$

$$V'_{NI}(r) = -4a_S W_S \left\{-\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - r_S A^{1/3}}{a_S}\right)}\right]\right\} \quad (3.9)$$

Karmaşık yapıda bir spin-yörünge potansiyel teriminin optik potansiyele eklenmesiyle, saçılma etkileşmesinden kaynaklanan kutuplanmalar daha doğru hesaplanabilmektedir (Aydın, 1997; Kürkçüoğlu, 2006). Yüzeyde maksimuma ulaşan Thomas şekline (Satchler, 1980) sahip spin-yörünge potansiyelinin gerçel ve sanal kısımları aşağıdaki gibi yazılır:

$$V_{SR}(r) = \frac{2}{\hbar^2 r} V_{SO} \left\{-\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - r_{SO} A^{1/3}}{a_{SO}}\right)}\right]\right\} \quad (3.10)$$

$$V_{Sl}(r) = \frac{2}{\hbar^2 r} W_{SO} \left\{ -\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - r_{SO} A^{1/3}}{a_{SO}}\right)} \right] \right\} \quad (3.11)$$

Açısal momentum kuantum sayısı l 'ye bağlı olan merkezci potansiyel, mermi ve hedef çekirdeğin bağıl açısal momentumlarından meydana gelir ve Eşitlik (3.12) ile ifade edilir. Bu eşitlikte μ , mermi ve hedef çekirdeğin indirgenmiş kütesini ($\mu = m_p m_t / m_p + m_t$) temsil etmektedir.

$$V_l(r) = \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} \quad (3.12)$$

Bu ifadeler (Eşitlik (3.4) - Eşitlik (3.12)) göz önüne alınarak optik potansiyel yeniden yazılırsa;

$$V(r) = V_C(r) - V_0 f^n(r, r_0, a_0) - iW_V f^n(r, r_V, a_V) - iW_S 4a_S g(r, r_S, a_S) + (V_{SO} + iW_{SO}) \frac{2}{r} g(r, r_{SO}, a_{SO}) (\vec{S} \cdot \vec{L}) + V_l(r) \quad (3.13)$$

olacaktır. Eşitlik (3.13) ile verilen bu ifade optik potansiyelin genel formunu tanımlar ve altı dinamik parametre ($V_0, W_V, W_S, V_{SO}, W_{SO}, V_l$) ve sekiz geometri parametresi ($r_0, a_0, r_V, a_V, r_S, a_S, r_{SO}, a_{SO}$) olmak üzere toplam on dört ayarlanabilir parametreden oluşur. Bu parametrelerden a_V ile a_S ve r_V ile r_S için aynı değerler kullanılabilir (Aydın, 1997). Optik model hesaplamalarında bu dinamik parametreler ve geometri parametreleri ayarlanarak optik model analizleri gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında ele alınan $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ sisteminde olduğu gibi, sıfır spinli mermilerin sıfır spinli hedeften saçılması durumunda $\vec{S} \cdot \vec{L} = 0$ olacağı için Eşitlik (3.13) ile verilen ifadede spin-yörünge potansiyeli ile ilgili terim sıfır olmaktadır. Bunun sonucunda geometri parametrelerinin sayısı azalmakta ve fenomenolojik potansiyellerin yer aldığı etkileşim potansiyelinin şekli aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$V(r) = V_C(r) - V_0 f^n(r, r_0, a_0) - iW_V f^n(r, r_V, a_V) - iW_S 4a_S g(r, r_S, a_S) + V_l(r) \quad (3.14)$$

Bu ifadede yer alan Coulomb potansiyeli ve merkezci potansiyelin özellikleri iyi biliniyor olsa da nükleer potansiyelin yapısı henüz tam ve kesin olarak anlaşılabilmiş değildir. Hafif ağır-iyon reaksiyonlarının araştırılmasında önemli bir problem teşkil eden nokta da bu potansiyel şeklinin doğru belirlenmesidir. Buna bağlı olarak, spesifik bir reaksiyon ele alındığında, nükleer potansiyelin gerçel ve sanal kısımları için en uygun potansiyel şekillerinin seçilmesi yapılacak analizler açısından önem arz eder. Bu tez çalışmasında kullanılan nükleer potansiyelin gerçel ve sanal kısımları fenomenolojik Woods-Saxon tipinde seçilmiştir.

$$V_N(r) = \frac{-V_0}{\left[1 + \exp\left(\frac{r - r_0 A^{1/3}}{a_0}\right)\right]^2} + i \frac{-W_V}{\left[1 + \exp\left(\frac{r - r_V A^{1/3}}{a_V}\right)\right]^n} \quad (3.15)$$

Eşitlik (3.15) ile verilen nükleer potansiyel ifadesinde V_0 ve W_V sırasıyla gerçel ve sanal potansiyellerin derinliklerini gösterir. r_0 , a_0 , r_V ve a_V ise geometri parametreleridir. Potansiyelin gerçel kısmı $WS2$, sanal kısmı ise $n = 1$ alındığında WS , $n = 2$ alındığında $WS2$ formundadır. Ek-potansiyeller ise Eşitlik (3.9) ile verilen WSD formunda seçilmiş ve nükleer potansiyelin sanal kısmına ilave edilmiştir.

3.3. Optik Model Analizleri

Optik model, çekirdek etkileşmelerinin anlaşılmasına imkan veren elastik ve inelastik saçılmanın açıklanmasında oldukça başarılıdır (Krane, 2002). Bir nükleer saçılmanın optik model analizi, çok sayıda hesaplama yapılarak potansiyel parametrelerinin deneysel verilere en iyi biçimde uydurulması ile gerçekleştirilir. Deneysel saçılma ve tesir-kesiti verilerini açıklaması beklenen potansiyeller, teorik olarak, bilgisayar yazılımları yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş PTOLEMY (Macfarlane ve Pieper, 1978), Fresco (Thompson, 1988; 1997), ECIS95 (Carlson, 2001) gibi reaksiyon analiz programları mevcuttur. Bu programlar vasıtasıyla gerçekleştirilen hesaplamalar ile elde edilen tesir-kesiti verileri, deneysel tesir-kesiti ölçümleri ile karşılaştırılarak, ele alınan enerji aralığı için en uygun potansiyeller araştırılabilmektedir. Hesaplanan tesir-kesiti verileri ile deneysel ölçümler arasındaki uyum, Eşitlik (3.16) ile verilen hata hesabı kullanılarak belirlenmektedir.

$$\chi^2 = \frac{1}{N_\sigma} \sum_{i=1}^{N_\sigma} \frac{(\sigma_{teori} - \sigma_{deney})^2}{(\Delta\sigma_{deney})^2} \quad (3.16)$$

Bu ifadede N_σ ölçülen açılarının sayısını, σ_{teori} teorik tesir-kesiti değerlerini, σ_{deney} deneysel tesir-kesiti verilerini ve $\Delta\sigma_{deney}$ deneysel tesir-kesiti verilerindeki hata değerini göstermektedir.

Burada, χ^2 'nin olabilecek en küçük değeri, her zaman için deney ile teorik hesaplamanın en iyi uyumunu ifade etmez. Zira hesaplanan verilerin grafiği çizildiğinde, deneysel ölçümlerin sergilediği desen ile örtüşmesi gerekir. Buna bağlı olarak potansiyel parametreleri için en uygun değerlerin bulunması, optik model analizlerinin başarısı ve ele alınan saçılmayı açıklayan potansiyelin tanımlanması açısından önemlidir. Bu durum göz önünde bulundurularak, potansiyel parametreleri için en uygun değerlerin elde edilmesi amacıyla, bu çalışmada farklı optimizasyon algoritmalarından yararlanılmıştır.

3.4. Optimizasyon İşlemleri ve Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon, genel bir ifadeyle, belirlenen amaç veya amaçlar doğrultusunda gerekli şartların sağlanarak en uygun çözümün bulunması işlemi olarak tanımlanabilir. Matematiksel olarak ise, bir veya daha fazla bağımsız değişken içeren bir gerçel fonksiyonu minimize ya da maksimize etmek için, tanımlanan aralıkta seçilen değerlerin fonksiyona yerleştirilerek, sistematik olarak en iyi çözümün aranması işlemlerini ifade eder. Optimizasyon problemlerinin çözümünde, analitik teknikleri kullanan klasik optimizasyon yöntemlerinin yanı sıra doğadan esinlenilerek geliştirilmiş sezgisel optimizasyon yöntemleri de kullanılmaktadır.

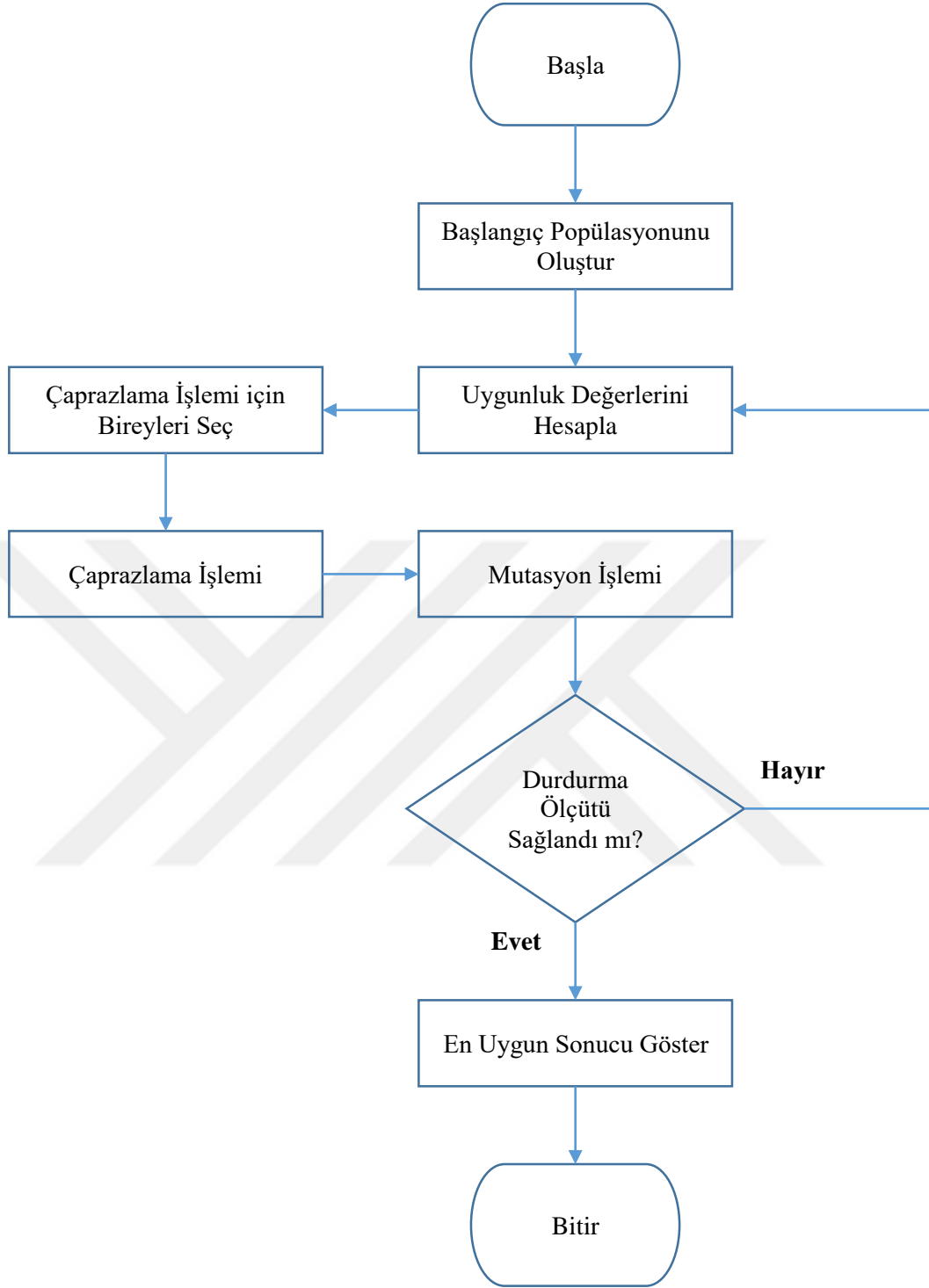
Bu çalışmada gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinde genetik algoritma, gri kurt optimizasyon algoritması, tavlama benzetimi algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. Bahsedilen optimizasyon algoritmalarının kodları C# programlama dilinde yazılmıştır. Kodlar, *GNU Kısıtlı Genel Kamu Lisansı (LGPLv2)*'na sahip tümleşik bir geliştirme ortamı olan MonoDevelop aracılığı ile Linux işletim sistemi üzerinde çalıştırılmıştır. Tezde kullanılan algoritmalara ait bu

kaynak kodlar Ek A.'da yer almaktadır. Takip eden kısımlarda ise bu optimizasyon algoritmalarının esasları ve işleyişleri genel hatlarıyla tanıtılmaktadır.

3.4.1. Genetik algoritma

Genetik algoritma (GA) (Holland, 1975) doğadaki evrim fikrinden esinlenerek doğal seçim prensiplerini temel alan, “iyi” olanın hayatta kaldığı esası üzerine inşa edilmiş bir arama ve optimizasyon metodudur. Genetik algoritma olasılık kurallarına göre çalışır ve sadece amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyar. Çözüm uzayının tamamı değil belirli bir kısmı taranarak daha kısa sürede çözüme ulaşılır. Ayrıca çözümlerden oluşan popülasyonu eş zamanlı inceler ve bu sayede yerel en iyi çözümlere takılmaz (Goldberg, 1989; Emel ve Taşkın, 2002).

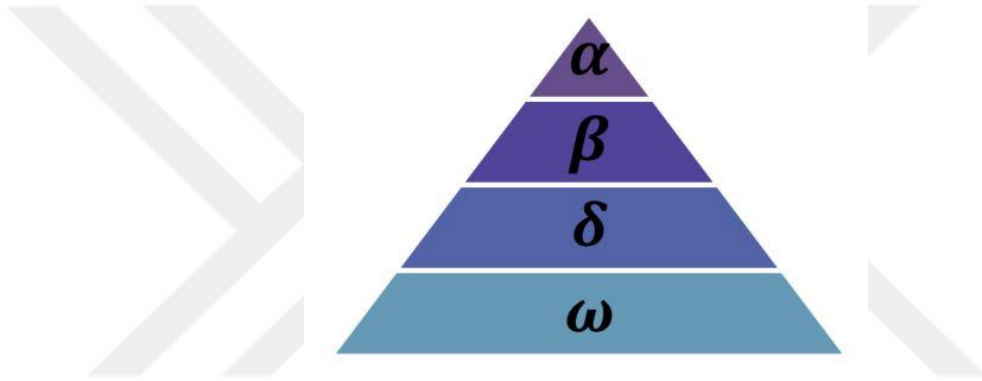
Genetik algoritmada ilk olarak mümkün çözümlerin kodlandığı çözüm grubu (popülasyon) oluşturulur. Çözümlerin kodları da birey veya kromozom olarak isimlendirilir. Uygunluk (fitness) fonksiyonu ile her bireyin ne kadar iyi olduğu tespit edilir. Bu bireyler eşlenerek çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır. Böylece yeni bir popülasyon oluşturulur. Yeni bireyler oluştuğunda eski bireyler yok olur. Tüm bireylerin uygunlukları yeniden hesaplanır. Durdurma ölçütü sağlanana kadar bu adımlar yinelenir. Amaç popülasyondaki yeterince iyi olmayan bireylerin elenerek iyi bireylerin hayatta kalmasıdır. Böylece zamanla daha iyi yeni bireyler oluşacak ve her nesilde bir iyileşme gerçekleşecektir (Çetin, 2002; Şenel, 2019). Şekil 3.3'te genetik algoritma akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.3. Genetik algoritma akış şeması (Şenel, 2019'dan uyarlanmıştır)

3.4.2. Gri kurt optimizasyon algoritması

Gri kurt optimizasyon (GKO) algoritması (Mirjalili ve Lewis, 2014), gri kurtların doğadaki toplumsal davranışları ve avlanma izlemlerinden ilham alınarak geliştirilmiştir. Gri kurtlar *alfa*, *beta*, *delta* ve *omega* olarak sınıflandırılırlar ve aralarında Şekil 3.4 ile gösterilen biçimde bir hiyerarşi mevcuttur. Buradan hareketle gri kurt optimizasyon algoritmasında çözümler kurtların toplumsal hiyerarşisi dikkate alınarak yapılandırılmıştır. Bu optimizasyon algoritmasında en iyi çözüm alfa kurtlar ile temsil edilmektedir. Beta ve delta kurtlar ikinci ve üçüncü en iyi çözümler, omega kurtlar ise aday çözümleri ifade ederler (Koç vd., 2018; Şenel, 2019).



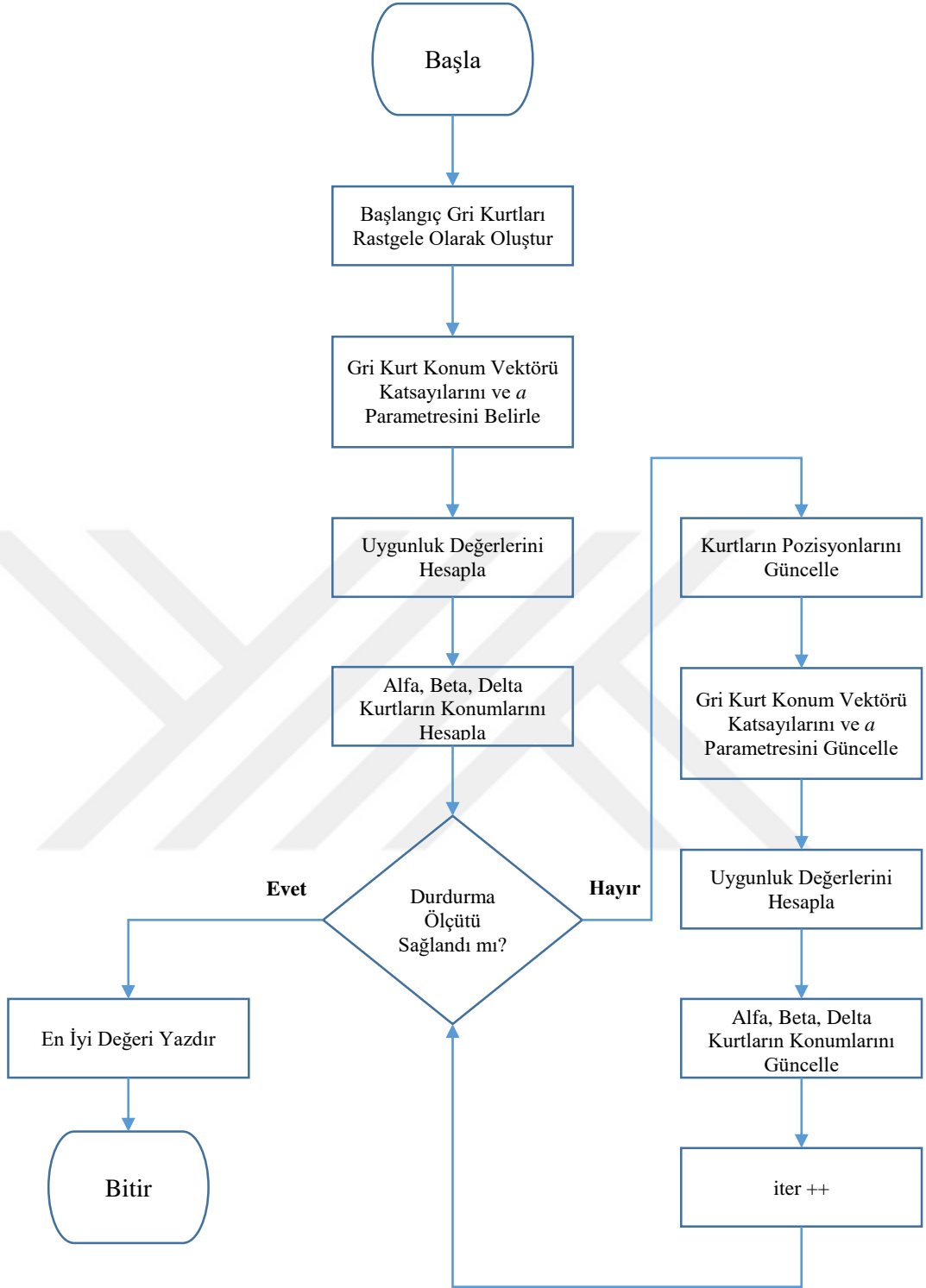
Şekil 3.4. Gri kurt hiyerarşisi (Mirjalili ve Lewis, 2014)

Gri kurt optimizasyon algoritmasının ana bölümleri gri kurtların avlanma davranışlarına dayanarak;

- İzleme, takip ve ava yaklaşma
- Avı çevreleme ve av yorulup duruncaya kadar avı hareket ettirme
- Ava saldırma

adımlarından oluşmaktadır.

Arama işleminin başlangıçta rastgele başladığı gri kurt optimizasyon algoritmasının her iterasyonunda en iyi üç kurt (en iyi çözümler) güncellenir. Avın yeri belirlendikten sonra saldırı işlemi gerçekleştirilir. Durdurma ölçütü sağlanana kadar ya da istenilen iterasyon sayısına varılıncaya dek avlanma işlemi devam ettirilir (Şenel vd., 2018). Gri kurt optimizasyon algoritmasının akış şeması Şekil 3.5 ile verilmiştir.

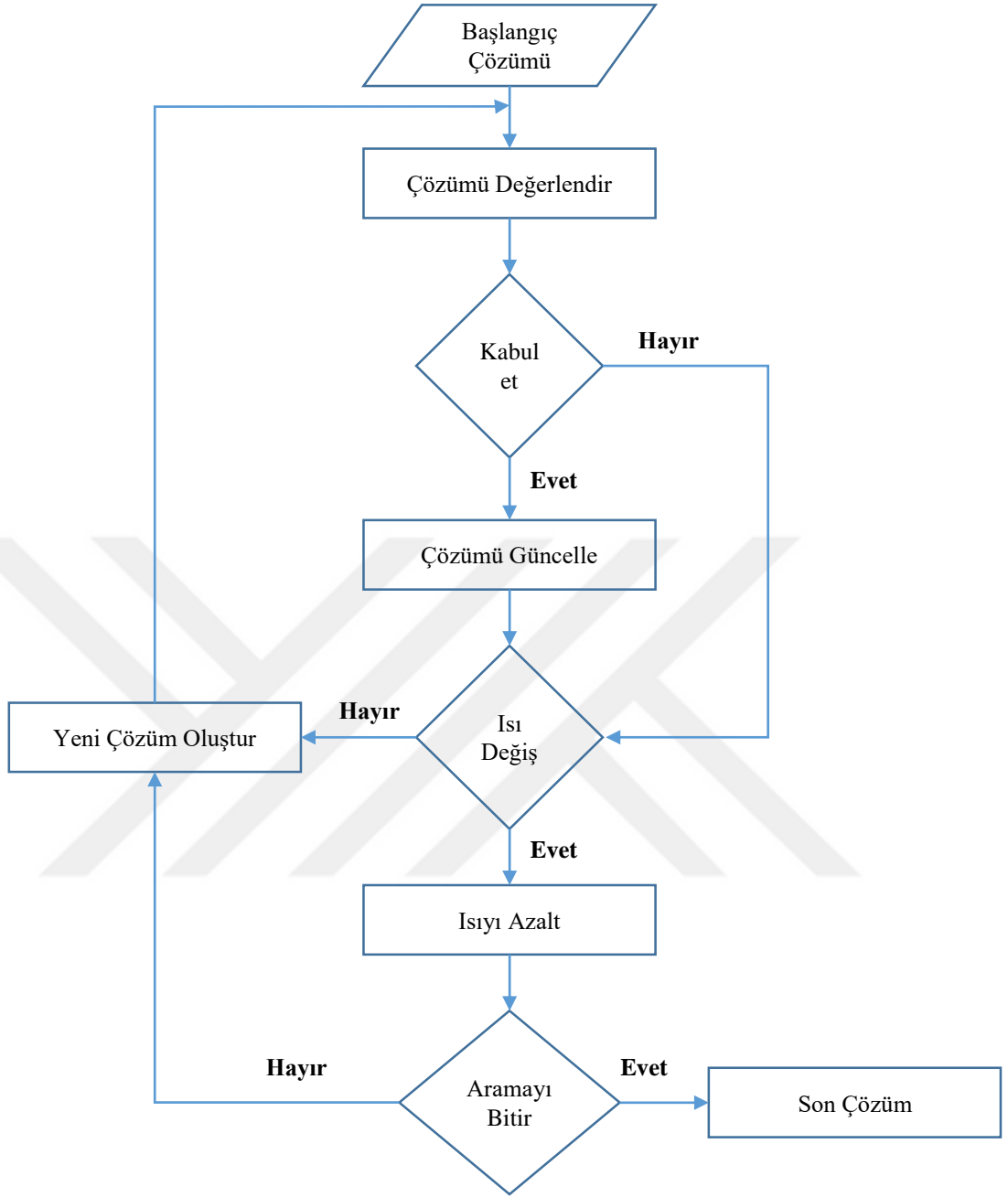


Şekil 3.5. Gri kurt optimizasyon algoritması akış şeması (Şenel, 2019'dan uyarlanmıştır)

3.4.3. Tavlama benzetimi

Tavlama benzetimi (TB) (Kirkpatrick, 1983) metallerin fiziksel olarak tavlama işleminden esinlenerek geliştirilmiş, adım adım iyileştirme yapan bir optimizasyon yöntemidir. Optimizasyon işlemi esnasında yalnızca daha iyi sonuçlar alınmayıp, belli bir olasılıkla kötü çözümler de kabul edilerek algoritmanın yerel en iyilere takılması önlenir. Tavlama benzetiminde amaç yerel en iyilerden kurtularak genel en iyiye varmaktır (Şahin, 2008).

Buna göre temel bir tavlama benzetimi modeli, başlangıç parametreleri (başlangıç sıcaklığı (T), soğutma oranı (R) ve her bir enerji seviyesindeki iterasyon sayısı (IT)) belirlenerek başlangıç durumuna getirilir. Daha sonra başlangıç çözümü ve ona ait maliyet değeriyle çözüm başlatılır. Tanımlanan bu çözüm güncel çözüm kabul edilerek hareket operatörünün (çaprazlama, yerleştirme) uygulanmasıyla bir komşuluk çözümü bulunur. Bu komşu çözümün maliyeti hesaplanır ve güncel çözüm ile karşılaştırılır. Komşu çözümün maliyetinin güncel çözümün maliyetinden daha iyi olması durumunda, bu çözüm güncel çözüm olarak kabul edilerek komşu çözümün değerini alır. Şayet güncel çözüm maliyetinden daha kötü bir komşu çözüm maliyeti söz konusu ise bu durumda Metropolis kriteri uygulanır ve bu çözüm $(-\Delta/T)$ olasılığı ile güncel çözüm olarak kabul edilir (burada Δ , komşu çözümden, güncel çözümün çıkarılması ile elde edilen maliyetteki değişimi temsil etmektedir). Hala daha iyi çözüm bulunamamış ise güncel çözüm aynı kalır. Belirlenen durdurma ölçütü sağlanıncaya dek, bu arama mekanizması her sıcaklık düzeyinde iterasyon sayısınca yinelenir (Çerçioğlu vd., 2009). Tavlama benzetimi akış şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.

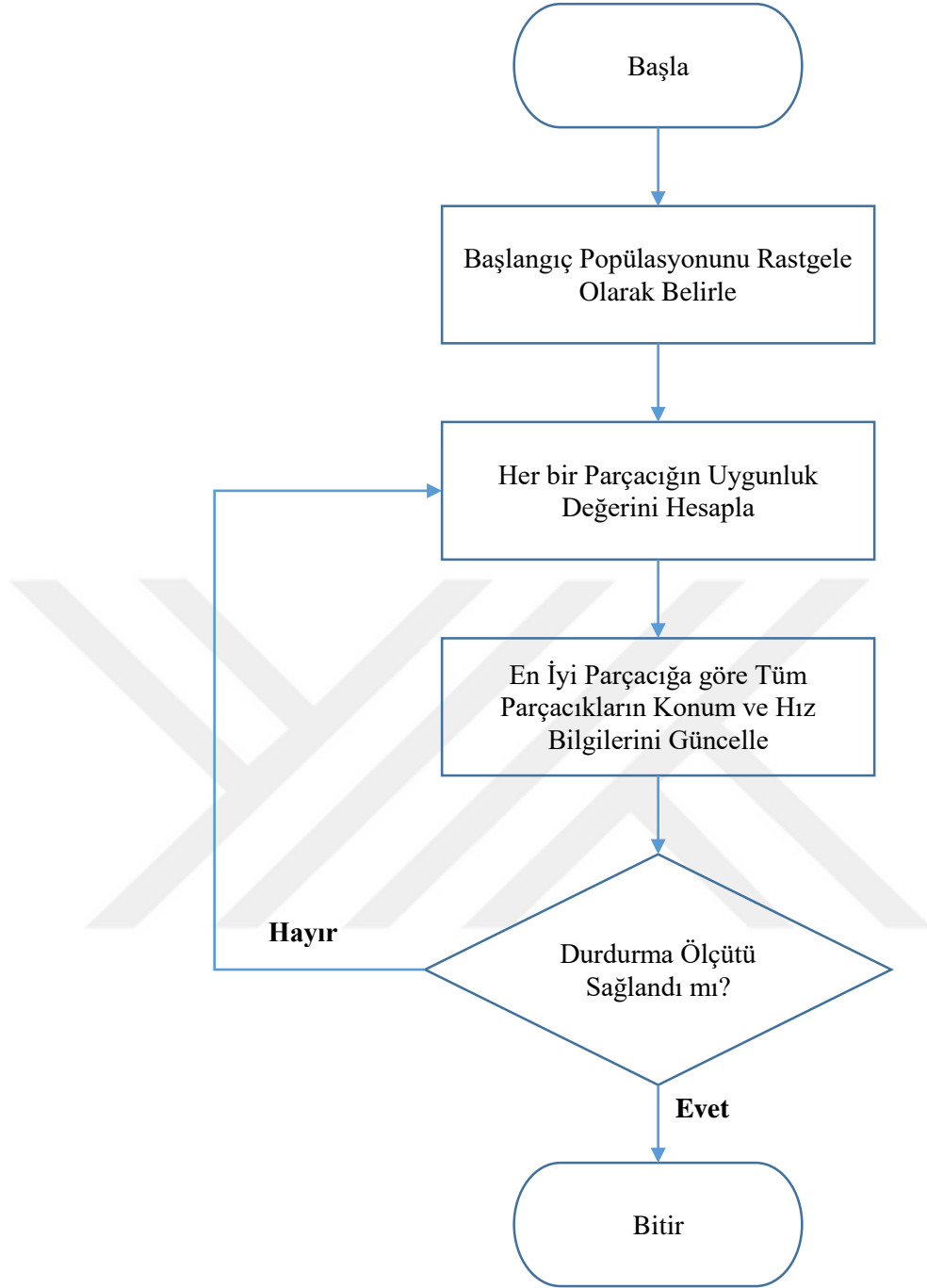


Şekil 3.6. Tavlama benzetimi algoritması akış şeması (Gözüdeli ve Akcayol, 2010'dan uyarlanmıştır)

3.4.4. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Kennedy ve Eberhart, 1995), doğada sürü halinde hareket eden kuş ve balıkların avlanma stratejilerinden esinlenilerek geliştirilmiş, temeli sürü zekasına dayanan bir optimizasyon yöntemidir. Sürü halinde hareket eden hayvanların yiyecek bulma, avlanma gibi durumlarda, çoğunlukla gelişigüzel sergiledikleri davranışların, hedeflerine daha kolay ulaşmalarını sağladığı görülmüştür. Parçacık sürü optimizasyonu, sürüdeki bireylerin (parçacıkların) pozisyonunun, sürünün en iyi pozisyona sahip olan bireyine yaklaştırılması esasına göre işler (Özsağlam ve Çunkaş, 2008).

Parçacık sürü optimizasyonu, bir grup rastgele çözümle (parçacık sürüsü) başlar ve güncellemelerle en uygun çözüm aranır. Her iterasyonda, her bir parçacığın uygunluk değeri hesaplandıktan sonra, parçacık konumları iki en iyi parçacığa göre güncellenir. Bunlardan birincisi; o ana kadar kullanılan aynı numaralı parçacıklar arasındaki en iyi uygunluk değerine sahip olan ve yerel en iyi olarak adlandırılan parçacıktır. İkincisi, popülasyonda o ana kadar bütün parçacıklar içinde elde edilmiş en iyi uygunluk değerini sağlayan parçacıktır. Bu parçacık global en iyi olarak adlandırılır. İki en iyi değer bulunmasının ardından parçacık hız ve konumları güncellenir (Çavuşlu vd., 2010). Durdurma kriteri sağlandığında ya da iterasyon sayısına aynı adımlar tekrar edilir. Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına ait akış şeması Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması akış şeması (Şenel, 2019'dan uyarlanmıştır)

Tezde uygulanan optimizasyon sürecinde ilk olarak, algoritmalar rastgele belirlediği potansiyel parametreleri ile Fresco girdi kartlarını oluşturmaktadır. Ardından bu girdi kartları ile Fresco kodunu çalıştırarak tesir-kesiti hesaplamalarını yapmakta ve sonuçları mevcut deneysel veriler ile kıyaslamaktadır. Bu kıyaslamayı χ^2 hata hesabı ile değerlendirerek, belirlenen iterasyon sayısı sonunda en küçük χ^2 değerine ulaşıncaya dek parametreleri sistematik olarak değiştirmektedir. Son olarak, en iyi χ^2 değerlerini veren potansiyel parametreleriyle yapılan hesaplamalardan elde edilen verilerin grafiği çizilerek deneysel desenle uyumu görsel olarak değerlendirilmektedir. En küçük χ^2 değerine sahip ve aynı zamanda grafiklerde en iyi uyumu gösteren deseni üreten parametreler belirlenerek süreç sona erdirilmektedir. Şekil 3.8’de optimizasyon algoritmalarının çalıştırıldığı yazılımın ekran görüntüsü verilmiştir.

```

kodlar - Program.cs* - MonoDevelop
File Edit View Search Project Build Run Version Control Tools Window Help
Debug Defaults MonoDevelop
Solution Explorer
MainClass Main (string args)
25 PSO ps = new PSO (6, 30, 100, 0, rang, false, r65);
26 sonuc = ps.SOLVER();
27 Console.WriteLine ("PSO Sonuclar = {" + sonuc [0] + "});
28
29 //sinavla r_0, r_0, a_0, k_V, r_V, a_0
30 V_0 = 410; r_0 = 0.777; a_0 = 1.53; k_V = 35.4; r_V = 3.382; a_V = 0.76;
31 FileStream fs = new FileStream ("e1145.in", FileMode.OpenOrCreate, FileAccess.Write);
32 StreamWriter sw = new StreamWriter (fs);
33 //sw.WriteLine ("260-160 145.0 MeV, no transfer no.045 " +
34 "18.0 0.50 0.0375 2.000 -0.00in 8.00 0.030 " +
35 "16.000 8.0 0 0 1 0 24 00in 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1610-0 " +
36 "18.0 0.50 0.0375 2.000 -0.00in 8.00 0.030 " +
37 "1 1 1 " +String.Format ("0:0.000", r_0).Replace ('.', ',') + " " +String.Format ("0:0.000", r_0).Replace ('.', ',') + " " +
38 " " +String.Format ("0:0.000", a_0).Replace ('.', ',') + " " +String.Format ("0:0.000", k_V).Replace ('.', ',') + " " +
39 " " +String.Format ("0:0.000", r_V).Replace ('.', ',') + " " +String.Format ("0:0.000", a_V).Replace ('.', ',') + " " +
40 //sw.WriteLine ("260-160 145.0 MeV, no transfer no.045 " +
41 "18.0 0.50 0.0375 2.000 -0.00in 8.00 0.030 " +
42 "16.0 0.0in 0.000, -0.001 F 0 1 0 00 11: -02.6 " +
43 "1.0in0.02 0 0 1 0 24 00in 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1610-0 " +
44 "16.000 8.0 0 0 1 0 24 00in 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1610-0 " +
45 "18.000 8.0 0 0 1 0 24 00in 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1610-0 " +
46 "1 1 1 " +String.Format ("0:0.000", r_0).Replace ('.', ',') + " " +String.Format ("0:0.000", r_0).Replace ('.', ',') + " " +
47 " " +String.Format ("0:0.000", a_0).Replace ('.', ',') + " " +String.Format ("0:0.000", k_V).Replace ('.', ',') + " " +
48 " " +String.Format ("0:0.000", r_V).Replace ('.', ',') + " " +String.Format ("0:0.000", a_V).Replace ('.', ',') + " " +
49 //sw.WriteLine ("260-160 145.0 MeV, no transfer no.045 " +
50 "18.0 0.50 0.0375 2.000 -0.00in 8.00 0.030 " +
51 //ExecuteCommand ("touch e1145.out");
52 ExecuteCommand ("rm -f e1145.out");
53 ExecuteCommand ("fresco < e1145.in > e1145.out");
54 ExecuteCommand ("gfortran ch1_145.f");
55 double sonuc = ExecuteResult ("f.out");
56 ExecuteCommand ("rm -f f.out");
57 ExecuteCommand ("rm -f f.out");
58 ExecuteCommand ("rm -f e1145.out");
59 Console.WriteLine (sonuc.ToString ());
60
Application Output
Iteration => 42, Cost => 147.129908237482 (125, 0.35, 0.04, 78.5, 0.384, 0.82)
Iteration => 43, Cost => 147.129908237482 (125, 0.35, 0.04, 78.5, 0.384, 0.82)
Iteration => 44, Cost => 147.129908237482 (125, 0.35, 0.04, 78.5, 0.384, 0.82)
Iteration => 45, Cost => 147.129908237482 (125, 0.35, 0.04, 78.5, 0.384, 0.82)
Iteration => 46, Cost => 147.129908237482 (125, 0.35, 0.04, 78.5, 0.384, 0.82)
Iteration => 47, Cost => 147.129908237482 (125, 0.35, 0.04, 78.5, 0.384, 0.82)

```

Şekil 3.8. Optimizasyon algoritmalarının çalıştırıldığı MonoDevelop yazılımının ekran görüntüsü

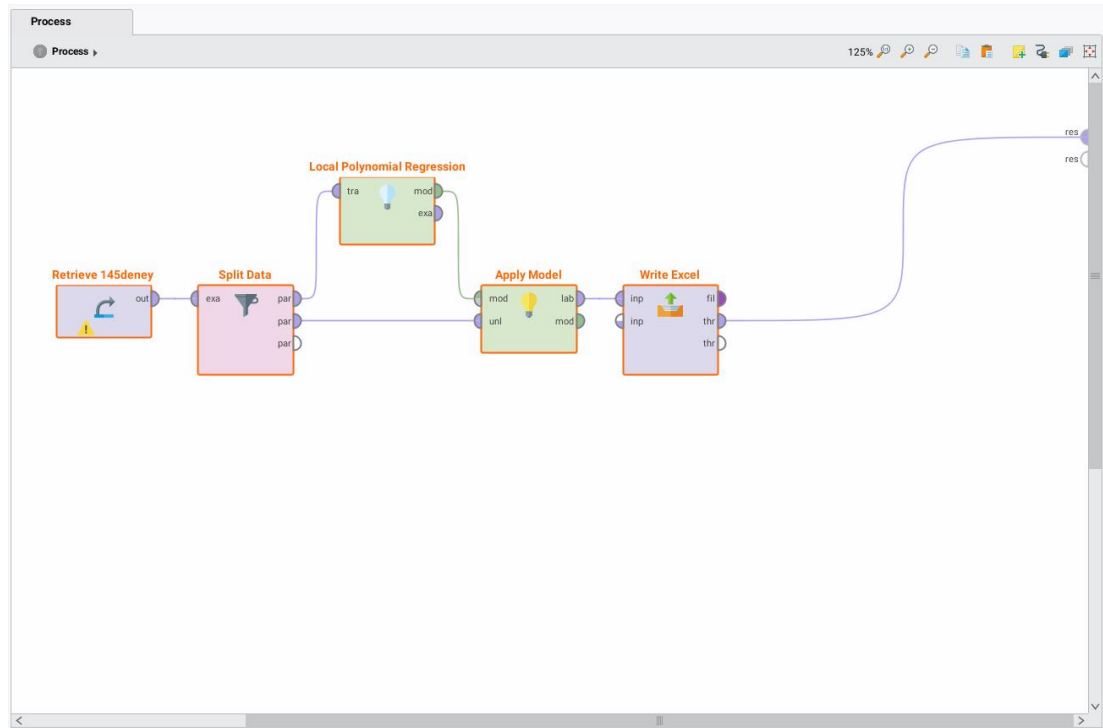
3.5. Makine Öğrenmesi Yaklaşımı

Son yıllarda adı sıkça duyulan makine öğrenmesi, bilgisayarların örnek veri veya geçmiş deneyimi işleyerek belli kriterlere göre başarımlarını artıracak şekilde programlanmasıdır. Model oluşturmada istatistik kuramını kullanan makine öğrenmesinin (yapay öğrenme) temeli, gözlenmiş bir örneklemden çıkarım yapmaktır (Alpaydın, 2018). Danışmanlı/danışmansız öğrenme, genetik algoritmalar, takviyeli

öğrenme, derin öğrenme, sinir ağları, karar ağaçları gibi çok sayıda makine öğrenme algoritması vardır. Bu gibi algoritmalar ile veri setlerinde anlamlı desenler aranarak bulunan desenler yeni verilere uygulanır ve sonuç elde edilmeye çalışılır.

Bu çalışmada makine öğrenmesi yaklaşımı ile tahmin edici analiz işlemleri RapidMiner yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. RapidMiner, ilk olarak YALE (Yet Another Learning Environment) adıyla 2001 yılında Ralf Klinkenberg, Ingo Mierswa ve Simon Fischer tarafından Dortmund Teknik Üniversitesi yapay zeka biriminde geliştirilmiştir (Mierswa vd., 2003). RapidMiner, makine öğrenmesi, veri madenciliği, tahmin edici analiz gibi amaçlara yönelik olarak geliştirilmiş bir yazılım olup ticari uygulamalarının yanı sıra akademik lisans alınarak, araştırma, eğitim ve uygulama geliştirme gibi amaçlarla da kullanılmaktadır.

Tez çalışmasında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının 145-1120 MeV enerji aralığındaki deneysel verileri kullanılarak RapidMiner yazılımında yerel polinom regresyona dayalı tahmin modeli oluşturulmuştur. Deneysel verilerin %80'ini eğitim, %20'sini test için kullanan tahmin modelinin RapidMiner blok şeması Şekil 3.9 ile verilmiştir.



Şekil 3.9. Tesir-kesiti tahminleri için kullanılan tahmin modelinin RapidMiner blok şeması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin elastik saçılması için optik model yaklaşımıyla yapılan analizler sunulmaktadır. $E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında fenomenolojik potansiyeller ile gerçekleştirilen analizlerde öncelikle, 3. Bölüm’de tanımlanan nükleer potansiyelin derinlik ve geometri parametrelerinin serbest parametre ve sabit parametre durumları ele alınmıştır. Ayrıca derin ve sıg yapıdaki ek-potansiyellerin etkisi de araştırılarak en uygun potansiyel yapısı belirlenmeye çalışılmıştır.

Optik model analizleri, hesaplanan tesir-kesiti değerlerinin, nükleer potansiyelin gerçel ve sanal kısımlarına ait parametrelerin değiştirilmesiyle, deneysel olarak ölçülmüş tesir-kesiti verilerine fit edilmesi esasına dayanır. Dolayısıyla, ele alınan saçılmayı açıklayan en uygun nükleer potansiyele ait parametrelerin optimizasyonu sağlanarak, deney ve teori arasındaki uyumu arttırmak mümkündür. Bu fikirden yola çıkarak analizlerimizde, $E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin elastik saçılması için önerilen nükleer potansiyellere ait parametrelere, gri kurt optimizasyon algoritması, genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu algoritması ve tavlama benzetimi algoritması ile optimizasyon işlemleri uygulanmış ve böylece en iyi parametre setleri araştırılmıştır.

Son olarak, makine öğrenmesi yaklaşımıyla, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması için incelenen enerji aralığında mevcut deneysel veriler kullanılarak, farklı saçılma açılarına karşılık gelen tesir-kesiti tahminleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılarak sunulmuştur.

Tezin tamamında kullanılan deneysel veriler EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data)’dan alınmıştır (Sugiyama vd., 1993; Khoa vd., 1995; Kondo vd., 1996; Bartnitzky vd., 1996; Nuoffer vd., 1998; Khoa vd., 2000; EXFOR, 2017).

4.1. Ön Analizler

Optik model analizlerinde hangi potansiyel yapısının kullanılacağına belirlenmesi, hesaplamalardan elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumu açısından önem arz eder. Bu bağlamda, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının optik model hesaplamalarında

kullanılacak nükleer potansiyelin şekline karar verilmesi amacıyla ilk olarak serbest ve sabit parametrelili analizler üzerinde durulmuş, ardından ek-potansiyellerin etkisi incelenmiştir. Bu kısımdaki analizlerde, literatürde yer alan bilgiler (Bartnitzky vd., 1996; Brandan ve Satchler, 1997; Nicoli vd., 1999, Khoa vd., 2000; Gonzalez ve Brandan, 2001, Kürkçüoğlu vd., 2006) doğrultusunda nükleer potansiyelin gerçel kısmı $WS2$, sanal kısmı ise WS veya $WS2$ şeklinde seçilmiştir. Seçilen potansiyel yapılarının kullanımıyla Fresco (Thompson, 1988; 1997) programında tesir-kesiti hesaplamaları yapılarak incelenen enerji aralığında optik model analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasındaki uyum 3. Bölüm’de Eşitlik (3.16) ile verilen χ^2 hata hesabı ile değerlendirilmiştir.

4.1.1. Serbest parametrelili analizler

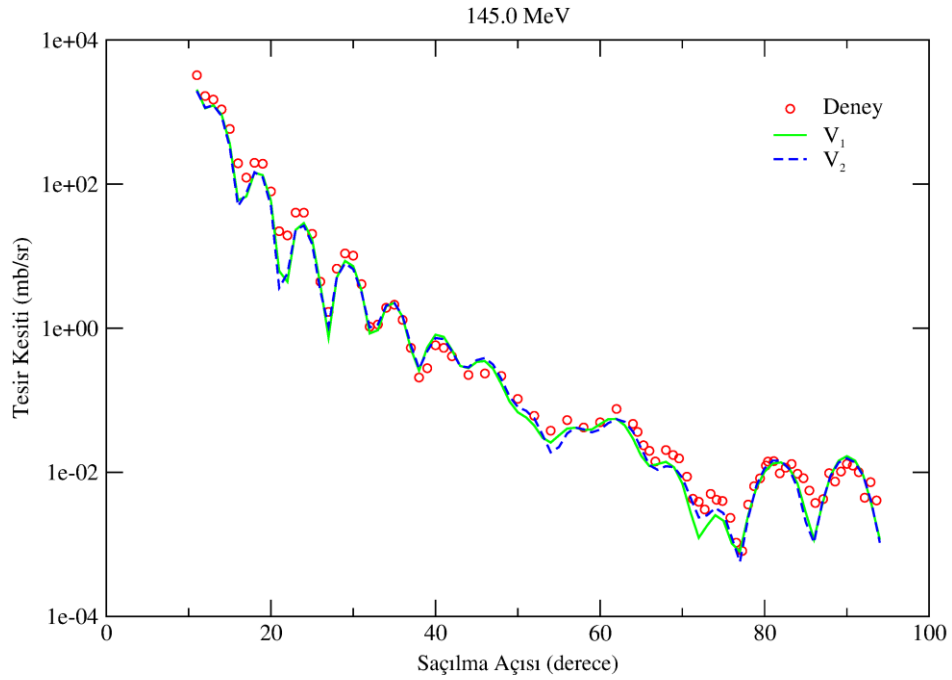
Serbest parametre durumlarının ele alındığı bu analizlerde, 145, 250, 350, 480, 704 ve 1120 MeV gelme enerjilerinde, Eşitlik (4.1) ile verilen V_1 ve V_2 potansiyel formları kullanılarak, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılma reaksiyonunun saçılma açısı tesir-kesiti hesaplamaları yapılmıştır.

$$\begin{aligned} V_1 &= WS2 + iWS2 \\ V_2 &= WS2 + iWS \end{aligned} \tag{4.1}$$

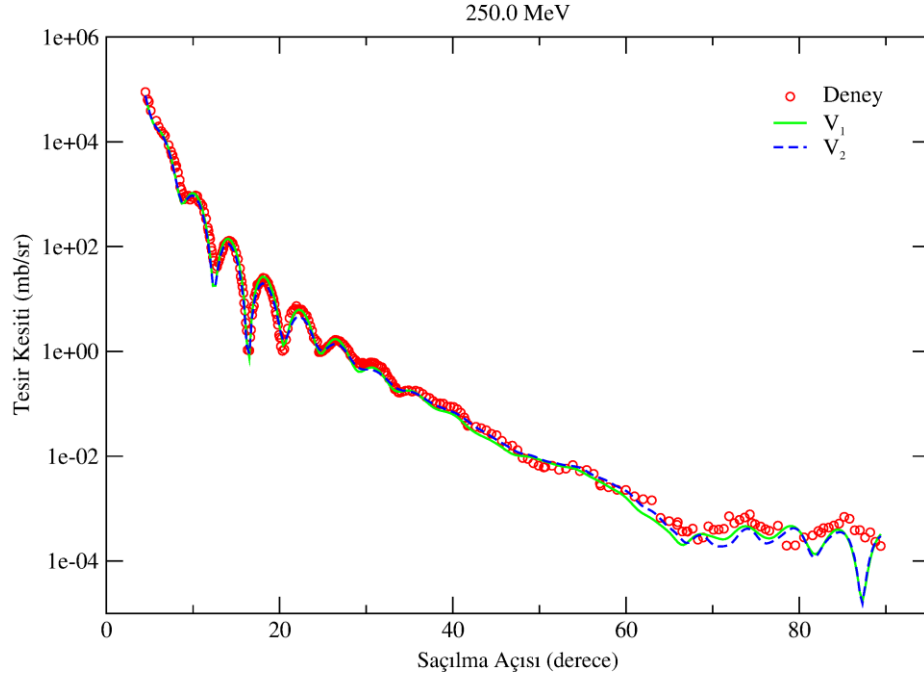
Her iki potansiyel formuna ait derinlik ve geometri parametreleri serbest bırakılarak (fiziksel sınırlar dâhilinde) hesaplanan değerlerin deneysel ölçümlere uyan en iyi fitleri elde edilmeye çalışılmıştır. Teorik olarak hesaplanan verilerle deneysel verilerin uyumu χ^2 hata hesabı ile incelenirken, aynı zamanda karşılaştırmalı grafikleri de çizilerek görsel değerlendirmelerde bulunulmuştur. Her bir gelme enerjisi için analizlerden elde edilmiş en iyi parametre takımları ve χ^2 değerleri Çizelge 4.1’de verilmektedir. Bu parametreler ile hesaplanan saçılma açısı tesir-kesiti değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırmalı grafikleri ise Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ile sunulmuştur. Grafiklerde düşey eksen logaritmik ölçekte Rutherford diferansiyel tesir-kesitlerini ve yatay eksen derece cinsinden saçılma açısını göstermektedir.

Çizelge 4.1. Serbest parametrelili analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri

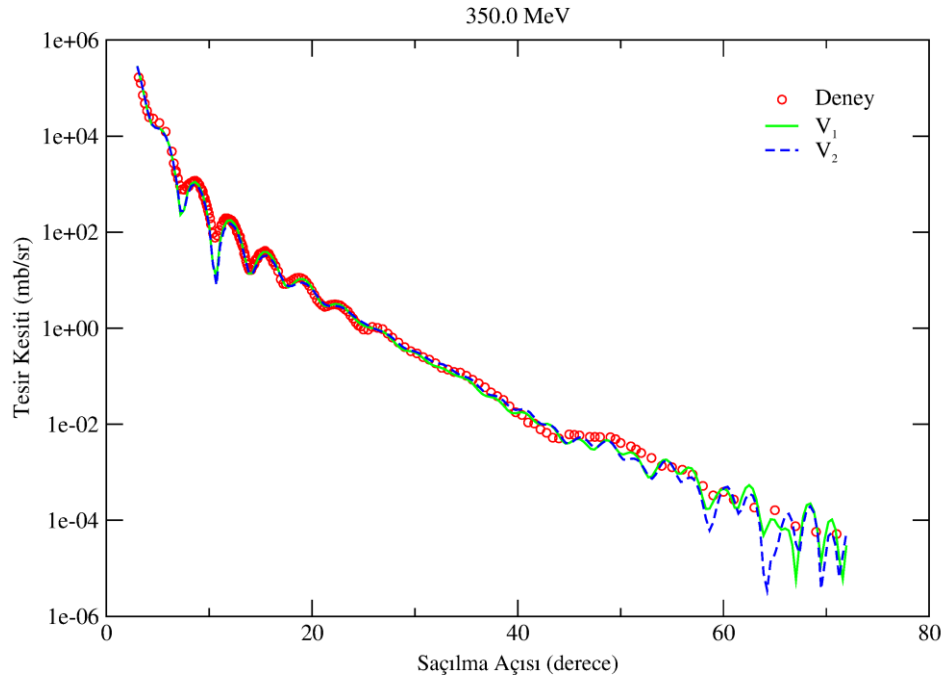
E_{LAB} (MeV)	Potansiyel Formu	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	χ^2
145	V_1	414	0,781	1,52	15,4	1,361	0,76	14,6
	V_2	413	0,790	1,52	14,3	1,273	0,49	12,7
250	V_1	352	0,802	1,46	30,9	1,248	1,06	9,2
	V_2	358	0,798	1,45	30,1	1,066	0,81	9,1
350	V_1	335	0,810	1,49	39,9	1,197	1,02	6,7
	V_2	336	0,805	1,48	37,0	1,043	0,72	8,3
480	V_1	277	0,799	1,26	45,2	1,130	1,01	45,2
	V_2	287	0,801	1,24	44,4	0,975	0,63	48,1
704	V_1	223	0,799	0,96	50,5	1,197	0,62	136,6
	V_2	235	0,759	0,97	49,4	1,058	0,44	234,8
1120	V_1	153	0,566	0,96	67,3	0,688	0,83	248,3
	V_2	155	0,546	0,96	62,4	0,582	0,55	241,5



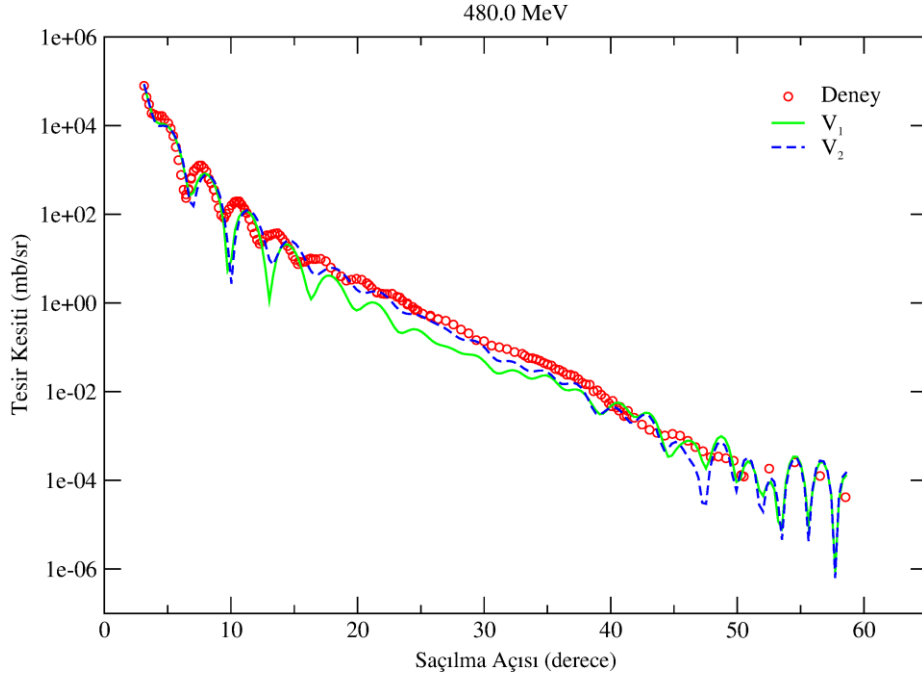
Şekil 4.1. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısali dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



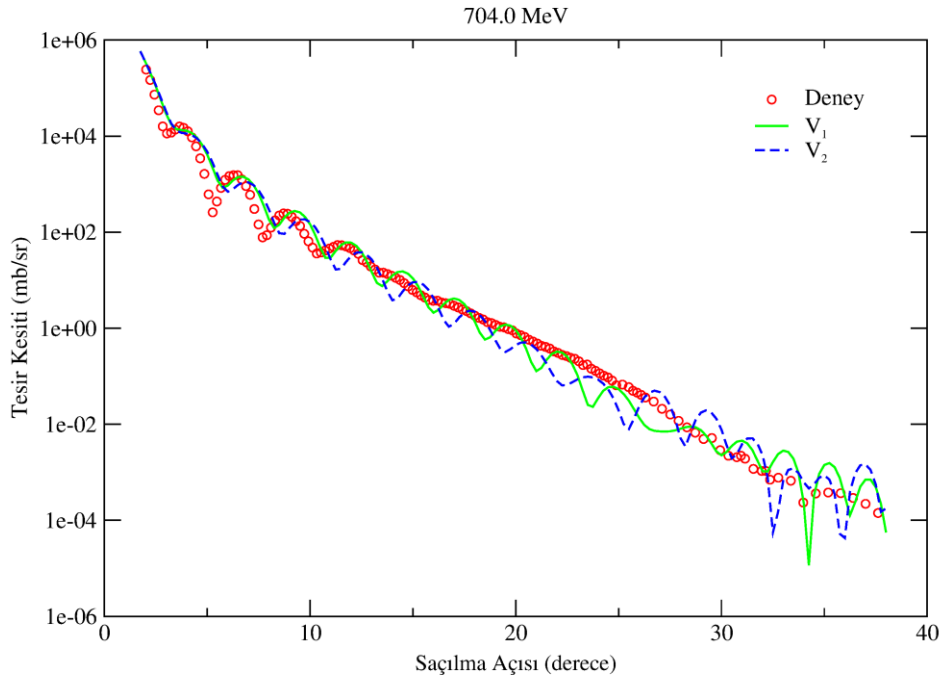
Şekil 4.2. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



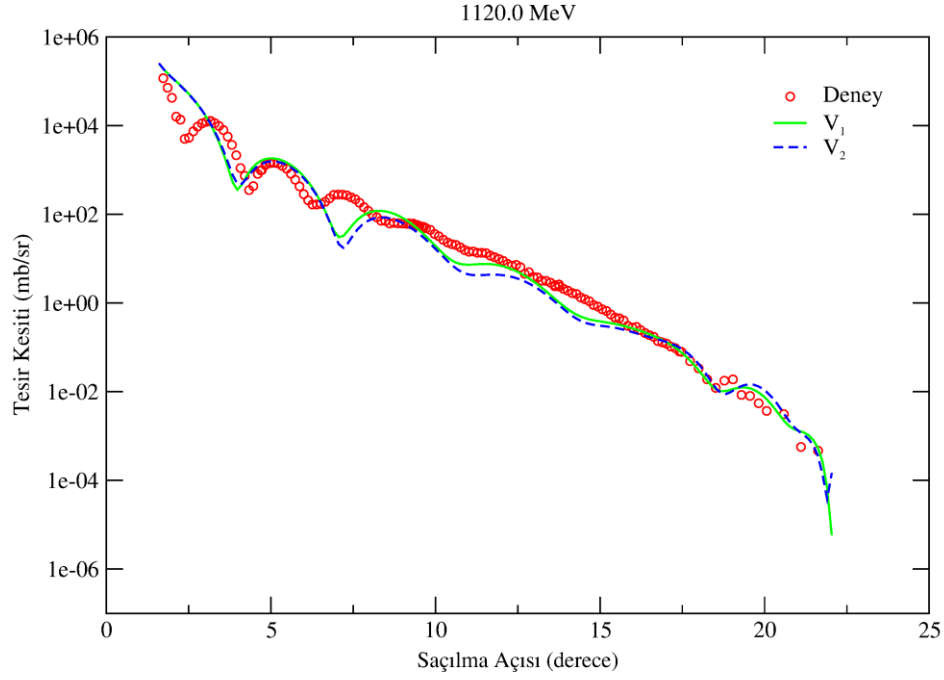
Şekil 4.3. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.4. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.5. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.6. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açılma dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesisir-kesiti fitleriyle karşılaştırması

145 MeV gelme enerjisi için Şekil 4.1 ile verilen grafikten, V_1 ve V_2 potansiyellerinin kullanımıyla elde edilen sonuçların deneysel verilerin oluşturduğu desen ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Saçılma açısının 20 - 30 derece aralığında V_1 potansiyeli ile yapılan hesaplamaların sonuçları deneysel verilerle daha iyi uyum gösterirken, 50 derece civarı ve 70 - 80 derece aralığında V_2 potansiyelinin kullanıldığı hesaplama sonuçlarının deneysel verilere daha yakın olduğu görünmektedir.

250 MeV gelme enerjisinde, V_1 ve V_2 potansiyelleri ile yapılan hesaplamaların sonuçları birbirine oldukça yakın olmakla birlikte deneysel verilerle de büyük oranda uyumludur. 10 - 20 derece aralığında V_2 potansiyeli ile elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumu ön plana çıkarken, 20 - 25 ve 70 - 80 derece aralıklarında V_1 potansiyeliyle yapılan analizin deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 4.2). $E_{LAB}=250$ MeV için V_1 ve V_2 potansiyelleri ile yapılan analizlerde elde edilen χ^2 değerleri de birbirine oldukça yakın olup onda bir oranında farklılık göstermektedir (Çizelge 4.1).

$E_{LAB}=350$ MeV için Şekil 4.3'te verilen grafikten, V_1 ve V_2 potansiyelleriyle yapılan analiz sonuçlarının yine genel anlamda deneysel desenle uyumlu olduğu görülmektedir. 25 derece civarına kadar, V_1 potansiyeli ile yapılan hesaplamaların sağladığı sonuçlarla deneysel verilerin nispeten daha uyumlu olduğu gözlenmektedir. Bu uyum V_1 ve V_2 potansiyelleri için elde edilen χ^2 değerlerinde de kendini göstermektedir (Çizelge 4.1).

Şekil 4.4 ile verilen 480 MeV enerjisine ait grafik incelendiğinde V_2 potansiyelini içeren analizin V_1 potansiyeliyle yapılan analize göre deneysel veriler ile daha uyumlu olduğu söylenebilir. Çizelge 4.1'deki χ^2 değerleri bu durumun tersine işaret etse de, 5-10 derece civarı saçılma açılarına karşılık gelen tesir-kesiti değerlerinde V_1 potansiyeliyle yapılan analizin deneysel verilerle daha iyi uyum göstermesi bu durumu açıklamaktadır.

704 MeV gelme enerjisi için V_1 potansiyeliyle gerçekleştirilen analizin deneysel verilere daha yakın sonuçlar sağladığı bulunmuştur. Saçılma açısının 12 derece civarlarına kadar V_1 ve V_2 potansiyelleri ile elde edilen desenler benzerlik gösterirken, 12 dereceden sonra V_2 'nin ürettiği sonuçlarda faz dışılık fark edilmektedir (Şekil 4.5).

$E_{LAB}=1120$ MeV için her iki potansiyel yapısının kullanıldığı hesaplamalarla ulaşılan desenler, deneysel desene göre yaklaşık olarak aynı seyirdedir (Şekil 4.6). Saçılma açısının 7 derece yakınlarına kadar, V_1 ve V_2 potansiyellerinin kullanımıyla elde edilen desenlerin birlikte hareket ettiği gözlenirken, grafik genel olarak değerlendirildiğinde V_1 potansiyelinin biraz daha başarılı sonuçlar ürettiği görüşüne varmak mümkündür.

4.1.2. Sabit parametrelili analizler

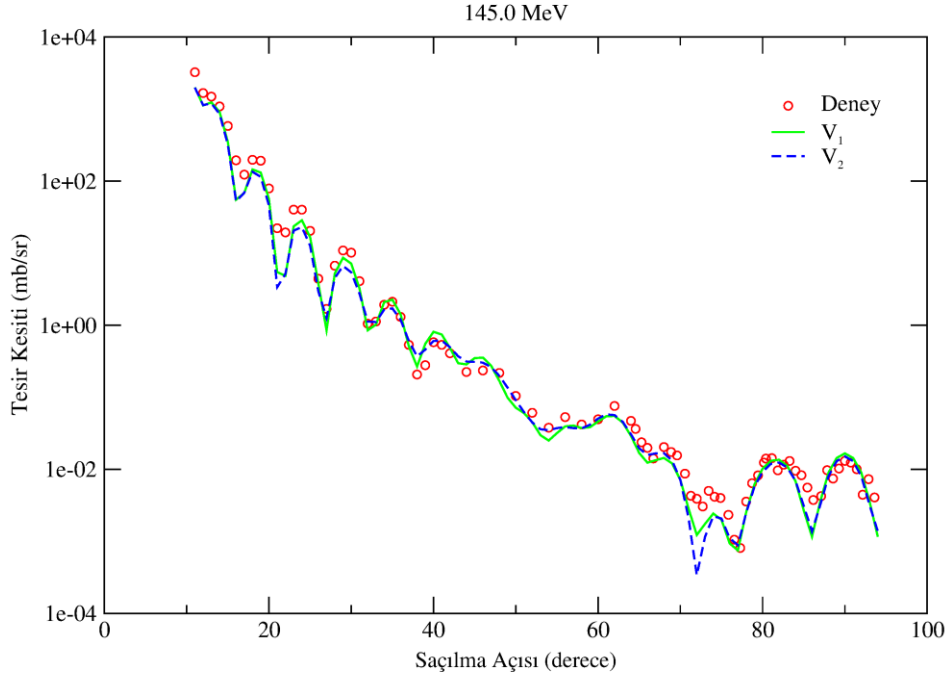
Bu kısımda, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının $E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında, V_1 ve V_2 potansiyel formları kullanılarak yapılan sabit parametrelili optik model analizleri verilmektedir. Hesaplamalarda, V_1 ve V_2 potansiyellerine ait V_0 , r_0 , a_0 ve W_V parametreleri her bir enerjiye ait analiz için sabit tutulurken, r_V ve a_V parametreleri ise serbest bırakılmıştır. Hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasındaki uyum χ^2 hata

hesabı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen en iyi analizlere ait parametre setleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

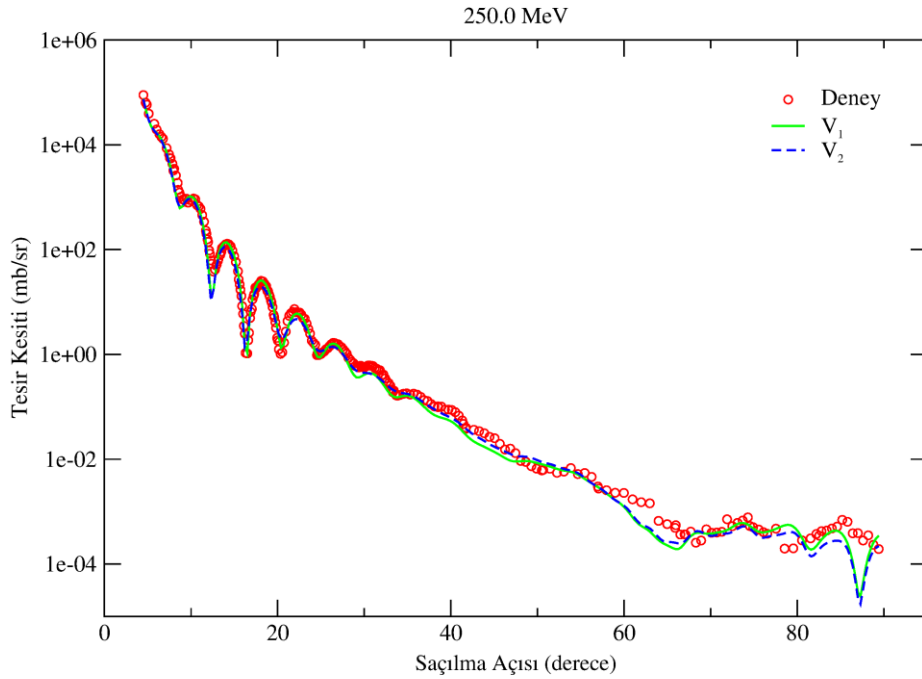
Çizelge 4.2. Sabit parametrelili analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri

E_{LAB} (MeV)	Potansiyel Formu	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	χ^2
145	V_1	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	14,8
	V_2	419	0,777	1,53	15,4	1,225	0,59	15,2
250	V_1	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	11,3
	V_2	369	0,778	1,51	28,9	1,077	0,80	11,4
350	V_1	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	8,3
	V_2	339	0,784	1,55	38,3	1,017	0,76	9,7
480	V_1	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	52,5
	V_2	286	0,775	1,30	43,5	0,949	0,65	62,9
704	V_1	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	139,0
	V_2	233	0,778	0,99	52,0	1,054	0,44	256,7
1120	V_1	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	253,5
	V_2	163	0,572	0,94	65,0	0,597	0,57	277,6

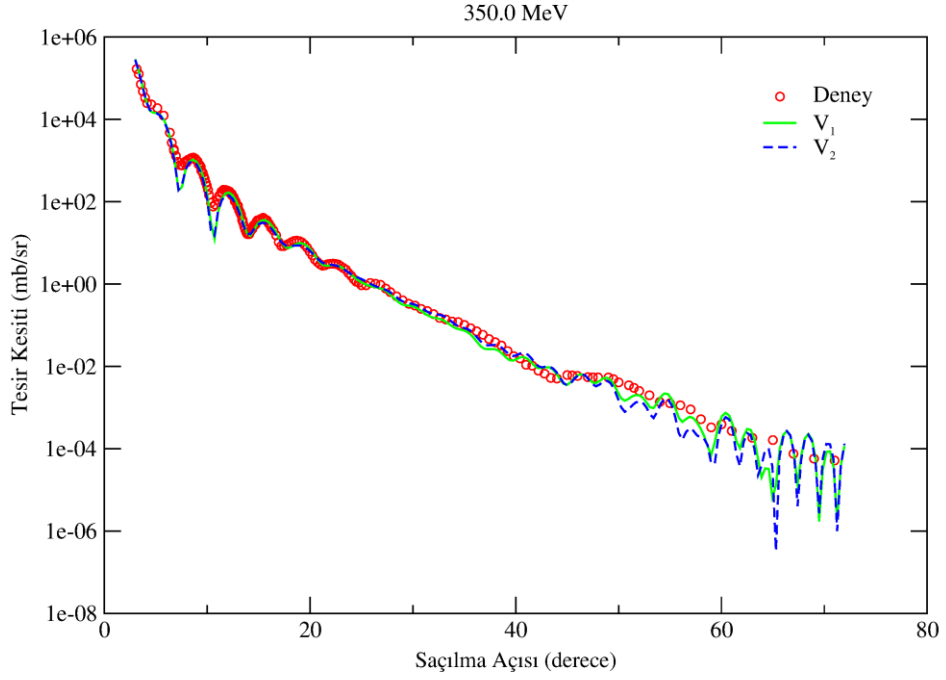
En başarılı analizlere ait parametre setlerinin kullanımı ile hesaplanan saçılma açısı tesir-kesiti değerlerinin deneysel verilerle uyumunu görsel olarak değerlendirmek üzere çizilen grafikler Şekil 4.7 - Şekil 4.12 ile verilmiştir.



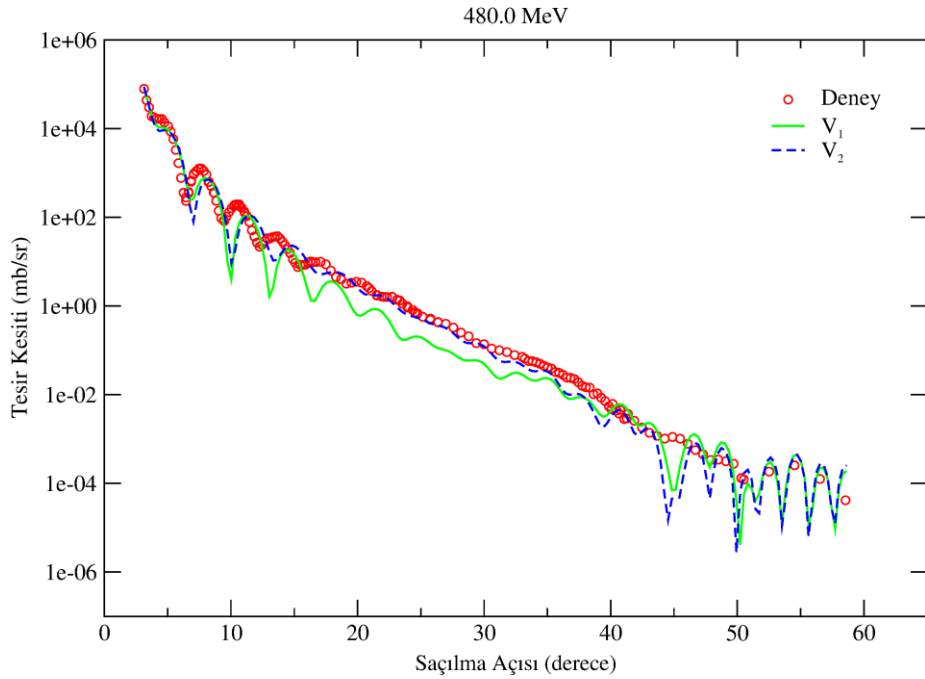
Şekil 4.7. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



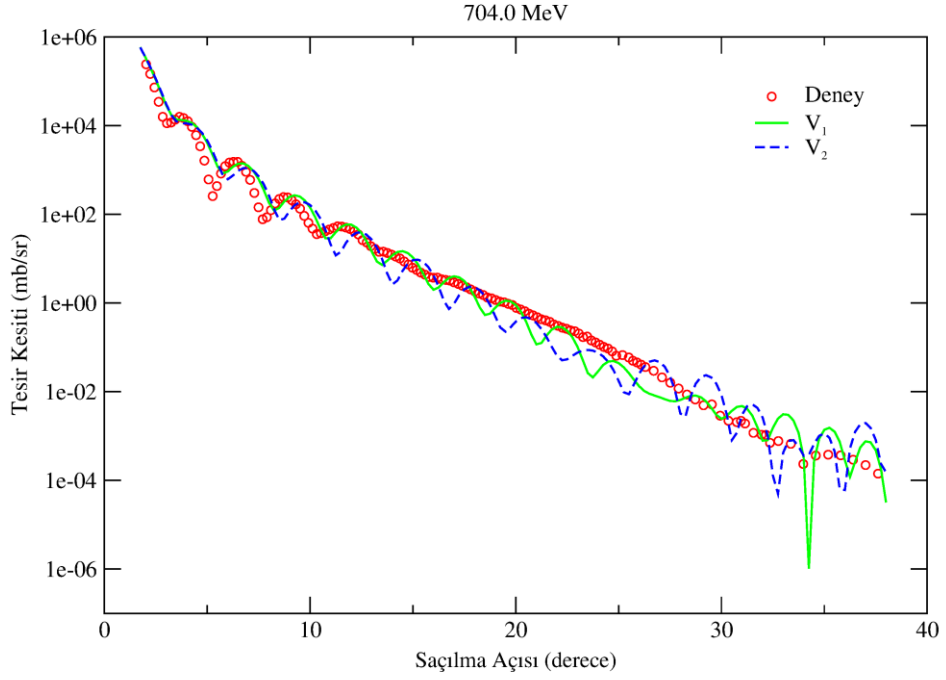
Şekil 4.8. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



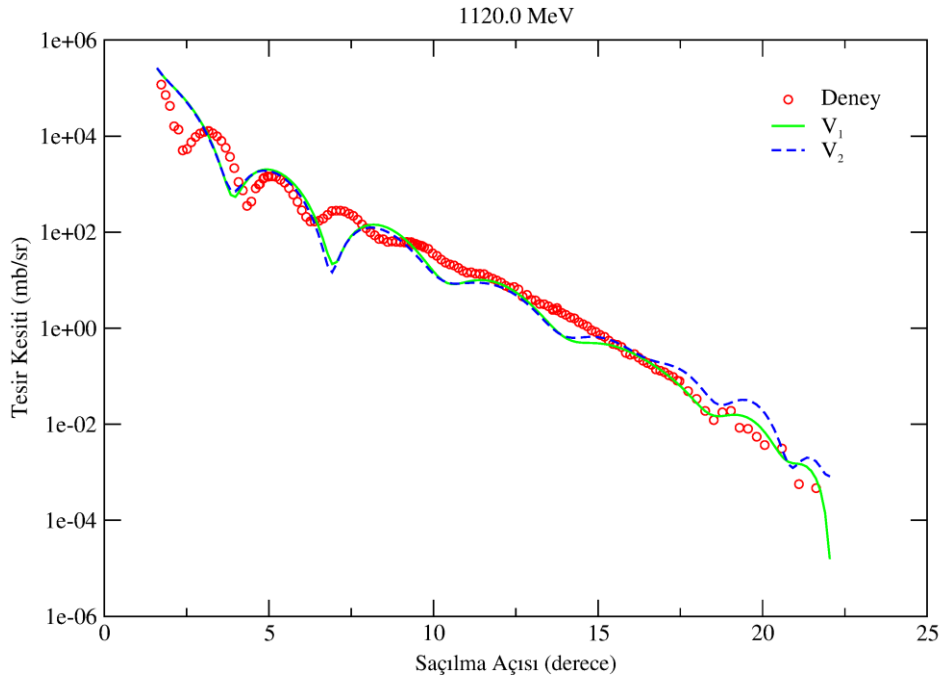
Şekil 4.9. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açisal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.10. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açisal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.11. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.12. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ve V_2 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması

$E_{LAB}=145$ MeV için Şekil 4.7’de verilen grafikten, V_1 ve V_2 formundaki potansiyellerin ürettiği desenlerin deneysel desen ile iyi uyumu görülmektedir. Her iki potansiyel formu ile elde edilen desenlerin yaklaşık olarak birlikte hareket ettiği söylenebilir. Ancak saçılma açısının 20, 30 ve 40 derece civarlarındaki değerlerinde V_1 potansiyelinin kullanıldığı analizin maksimum ve minimumları daha iyi ürettiği göze çarpmakta, bu farklılık Çizelge 4.2 ile verilen χ^2 değerlerinden de gözlenebilmektedir.

250 MeV gelme enerjisindeki analizlerin grafiğinde (Şekil 4.8), iki potansiyel formu ile elde edilen desenlerin hemen hemen aynı davranışı sergilediği gözlenmektedir. χ^2 değerlerinin de birbirine oldukça yakın olması bu durumu doğrular niteliktedir (Çizelge 4.2). Üretilen desenlerin, özellikle 40 derece saçılma açısına kadar, deneysel verilerin oluşturduğu desen ile uyumu fark edilir biçimde görülmektedir.

350 MeV’de V_1 ve V_2 potansiyellerinin ürettiği sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırıldığında, Şekil 4.9’daki grafikten görüleceği üzere, 50 derece saçılma açısı civarına kadar oldukça uyumlu seyretmektedir. χ^2 değerleri de göz önüne alındığında V_1 ile deneysel verilere daha yakın sonuçlar elde edildiği söylenebilir (Çizelge 4.2).

$E_{LAB}=480$ MeV için elde edilen sonuçların grafiğine bakıldığında (Şekil 4.10), V_1 potansiyelini içeren analiz için χ^2 değeri daha başarılı olmasına rağmen, V_2 potansiyelinin kullanımıyla varılan sonuçlardan üretilen desen, deneysel tesir-kesiti verilerine yaklaşma anlamında daha başarılı görünmektedir. Bu durum, saçılma açısının 2 - 7 derece civarlarına karşılık gelen tesir-kesiti değerlerinde V_1 ile deney verilerine daha yakın sonuçlar üretilmesi ile açıklanabilir.

704 MeV gelme enerjisi için Şekil 4.11’deki grafikten, bu enerji değerinde daha başarılı sonuçlar üreten V_1 potansiyelinin V_2 potansiyeline üstünlüğü farkedilir biçimde görülmektedir. 5 derece civarına kadar benzer davranış sergileyen her iki analize ait desenlerin bu saçılma açısı değerinden sonra, V_1 potansiyelinin ürettiği desenin deneysel desene daha yakın seyrine karşın V_2 potansiyeli ile elde edilen desenin 7 – 12 derece aralığında fazdışı yöneliminde olduğu gözlenmektedir. Çizelge 4.2’deki χ^2 hata hesabı sonuçları da bu durumu açıkça ortaya koymaktadır.

$E_{LAB}=1120$ MeV için Şekil 4.12’de verilen grafikte V_1 ve V_2 potansiyelleri ile üretilen desenler, deneysel desene göre hemen hemen benzer görünümündedir. Saçılma açısının 7 derece yakınlarında faz dışılık iki potansiyel formu için de göze çarpmaktadır. χ^2 değerleri göz önüne alındığında ise V_1 potansiyeliyle elde edilen sonuçların daha başarılı olduğu söylenebilir (Çizelge 4.2).

Serbest ve sabit parametrelili analizler genel olarak değerlendirildiğinde, her iki durumda da V_1 ve V_2 potansiyelleri ile hesaplanan diferansiyel tesir-kesiti verilerinin deneysel ölçümlerle tutarlı olduğu, deneysel maksimum ve minimumların büyük oranda doğru biçimde üretilebildiği görülmektedir. Bunun yanında, iki potansiyel yapısı ile elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, $WS2+iWS2$ formundaki V_1 potansiyelinin daha başarılı olduğu söylenebilir. Varılan bu sonuç, $^{16}O+^{16}O$ elastik saçılması için daha başarılı optik model analizlerinin elde edilmesinde V_1 formundaki potansiyelin kullanılması tercihinin, literatürde yer alan önceki bazı çalışmalarla da (Bartnitzky vd., 1996; Brandan ve Satchler, 1997; Nicoli vd., 1999, Khoa vd., 2000; Gonzalez ve Brandan, 2001, Kürkçüoğlu vd., 2006) tutarlılığını ortaya koymaktadır. Ayrıca V_1 potansiyelinin serbest parametre ve sabit parametre durumları χ^2 değerleri ile birlikte göz önüne alındığında, beklenildiği gibi serbest parametrelili analizlerin daha başarılı olduğu bulunmuştur.

4.1.3. Ek-potansiyeller ile yapılan analizler

Nükleer potansiyele bir yüzey teriminin eklenmesiyle, yüzeydeki soğrulmanın önemli olduğu durumlarda saçılma reaksiyonları için daha başarılı optik model analizlerinin elde edilebilmesi mümkündür (Brandan ve Satchler, 1991; Sugiyama vd., 1993; Khoa vd., 1994; Khoa vd., 2000). Bu kısımdaki analizlerde, derin ve sığ yapıdaki ek-potansiyellerin temel nükleer potansiyel olarak belirlediğimiz V_1 potansiyeline ilave edilmesiyle elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Farklı derinlikteki ek-potansiyeller, önceki çalışmalarda (Brandan ve Satchler, 1991; Khoa vd., 1994; Khoa vd., 2000) ortaya koyulan sonuçlar göz önüne alınarak, Woods-Saxon Derivatif (WSD) şeklinde seçilmiş ve nükleer potansiyelin sanal kısmına eklenmiştir. WSD şeklindeki bu potansiyelin yapısı 3. Bölümde Eşitlik (3.9) ile verilmiştir. Böylelikle ek-potansiyeller ile yapılan analizler için aşağıda sunulan potansiyel formları kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} V_3 &= WS2 + i(WS2 + WSD_{ek-derin}) \\ V_4 &= WS2 + i(WS2 + WSD_{ek-sıg}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Ek-potansiyellerin oluşturulmasında kullanılan potansiyel derinlikleri (W_S), temel nükleer potansiyele ait W_V derinliklerinin %65, %70, %75, %80, %85, %90 ve %95'i alınarak derin, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35'i alınarak sıg yapıda elde edilmiştir. Hesaplamalarda, ek-potansiyellerin katkısının doğru tespit edilebilmesi için Çizelge 4.2 ile verilen sabit parametrelili analiz sonuçları baz alınarak, V_0 , r_0 , a_0 , W_V , r_V ve a_V parametreleri sabit tutulmuş, ek-potansiyellere ait r_S ve a_S parametreleri ise serbest bırakılmıştır.

Çizelge 4.3'te derin ve sıg yapıdaki ek-potansiyellerin ilave edilmesiyle yapılan hesaplamalarda kullanılan parametre değerleri ve analizlerin deneysel veriler ile uyumunu gösteren χ^2 değerleri yer almaktadır. Potansiyel formlarının yanlarında parantez içinde sahip oldukları yüzdeler derinlikler belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. Ek-potansiyellerle yapılan analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri

E_{LAB} (MeV)	Potansiyel Formu	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	W_S (MeV)	r_S (fm)	a_S (fm)	χ^2
145	V_3 (%65)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	10,01	0,318	0,02	14,1
	V_3 (%70)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	10,78	0,318	0,02	14,1
	V_3 (%75)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	11,55	0,318	0,02	14,0
	V_3 (%80)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	12,32	0,318	0,02	14,0
	V_3 (%85)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	13,09	0,318	0,02	14,0
	V_3 (%90)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	13,86	0,318	0,02	14,0
	V_3 (%95)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	14,63	0,318	0,02	13,9
	V_4 (%5)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	0,77	0,672	0,04	14,6
	V_4 (%10)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	1,54	0,672	0,03	14,4
	V_4 (%15)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	2,31	0,672	0,03	14,3
	V_4 (%20)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	3,08	0,671	0,03	14,2
	V_4 (%25)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	3,85	0,672	0,02	14,2
	V_4 (%30)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	4,62	0,672	0,02	14,2
	V_4 (%35)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	5,39	0,672	0,02	14,2
250	V_3 (%65)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	18,79	0,273	0,45	10,2
	V_3 (%70)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	20,23	0,267	0,45	10,2
	V_3 (%75)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	21,68	0,258	0,45	10,2
	V_3 (%80)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	23,12	0,254	0,45	10,2
	V_3 (%85)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	24,57	0,250	0,44	10,2
	V_3 (%90)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	26,01	0,250	0,44	10,2
	V_3 (%95)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	27,46	0,250	0,43	10,2
	V_4 (%5)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	1,45	0,853	0,11	10,5
	V_4 (%10)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	2,89	0,761	0,10	10,3
	V_4 (%15)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	4,34	0,760	0,11	10,2
	V_4 (%20)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	5,78	0,680	0,10	10,2
	V_4 (%25)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	7,22	0,678	0,11	10,2
	V_4 (%30)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	8,67	0,676	0,11	10,2
	V_4 (%35)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	10,11	0,599	0,11	10,2

Çizelge 4.3. Ek-potansiyellerle yapılan analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri (devam)

E_{LAB} (MeV)	Potansiyel Formu	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	W_S (MeV)	r_S (fm)	a_S (fm)	χ^2
350	V_3 (%65)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	24,89	0,288	0,04	8,0
	V_3 (%70)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	26,81	0,288	0,04	8,0
	V_3 (%75)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	28,73	0,288	0,04	8,0
	V_3 (%80)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	30,64	0,288	0,04	8,0
	V_3 (%85)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	32,56	0,288	0,04	8,0
	V_3 (%90)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	34,47	0,288	0,04	8,0
	V_3 (%95)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	36,39	0,289	0,03	8,0
	V_4 (%5)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	1,92	0,938	0,14	7,7
	V_4 (%10)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	3,83	0,834	0,12	7,6
	V_4 (%15)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	5,75	0,833	0,12	7,7
	V_4 (%20)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	7,66	0,743	0,09	7,9
	V_4 (%25)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	9,57	0,741	0,10	8,0
	V_4 (%30)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	11,49	0,526	0,03	8,1
	V_4 (%35)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	13,40	0,455	0,02	8,1
480	V_3 (%65)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	28,28	1,010	0,35	48,2
	V_3 (%70)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	30,45	1,010	0,35	46,7
	V_3 (%75)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	32,63	1,010	0,35	45,6
	V_3 (%80)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	34,80	1,010	0,36	44,9
	V_3 (%85)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	36,98	1,010	0,36	44,5
	V_3 (%90)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	39,15	1,008	0,36	44,5
	V_3 (%95)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	41,33	1,004	0,36	44,6
	V_4 (%5)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	2,18	0,676	0,04	48,3
	V_4 (%10)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	4,35	0,678	0,03	47,0
	V_4 (%15)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	6,53	0,679	0,02	47,0
	V_4 (%20)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	8,70	0,678	0,01	47,1
	V_4 (%25)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	10,88	0,678	0,01	47,0
	V_4 (%30)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	13,05	0,678	0,01	47,2
	V_4 (%35)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	15,22	0,681	0,01	47,7

Çizelge 4.3. Ek-potansiyellerle yapılan analizler için kullanılan parametreler ve χ^2 değerleri (devam)

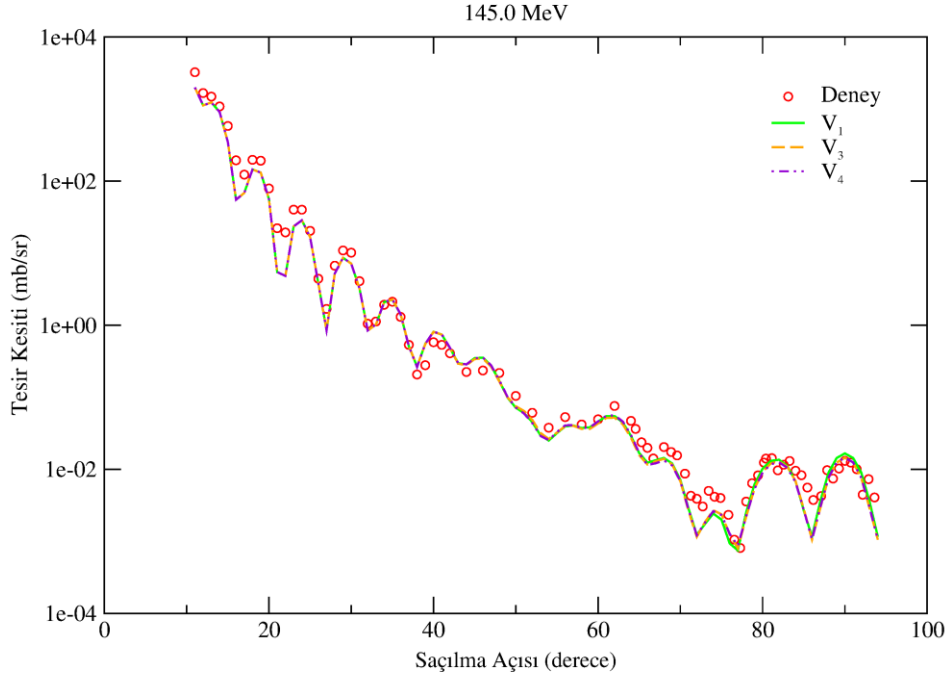
E_{LAB} (MeV)	Potansiyel Formu	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	W_S (MeV)	r_S (fm)	a_S (fm)	χ^2
704	V_3 (%65)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	33,80	0,723	0,13	137,0
	V_3 (%70)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	36,40	0,723	0,13	137,0
	V_3 (%75)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	39,00	0,719	0,14	137,0
	V_3 (%80)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	41,60	0,718	0,14	137,0
	V_3 (%85)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	44,20	0,716	0,14	137,0
	V_3 (%90)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	46,80	0,717	0,14	137,1
	V_3 (%95)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	49,40	0,714	0,14	137,1
	V_4 (%5)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	2,60	0,911	0,02	136,6
	V_4 (%10)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	5,20	0,912	0,01	136,6
	V_4 (%15)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	7,80	0,912	0,01	137,1
	V_4 (%20)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	10,40	0,912	0,01	138,9
	V_4 (%25)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	13,00	0,890	0,20	141,9
	V_4 (%30)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	15,60	0,890	0,20	144,0
	V_4 (%35)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	18,20	0,890	0,20	146,6
1120	V_3 (%65)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	42,25	0,314	0,02	250,7
	V_3 (%70)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	45,50	0,313	0,02	250,7
	V_3 (%75)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	48,75	0,314	0,02	250,7
	V_3 (%80)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	52,00	0,313	0,01	250,7
	V_3 (%85)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	55,25	0,312	0,01	250,6
	V_3 (%90)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	58,50	0,313	0,01	250,6
	V_3 (%95)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	61,75	0,312	0,01	250,5
	V_4 (%5)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	3,25	0,644	0,01	250,4
	V_4 (%10)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	6,50	0,651	0,01	250,5
	V_4 (%15)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	9,75	0,656	0,01	251,1
	V_4 (%20)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	13,00	0,660	0,01	252,8
	V_4 (%25)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	16,25	0,666	0,01	255,8
	V_4 (%30)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	19,50	0,666	0,01	266,1
	V_4 (%35)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	22,75	0,666	0,01	290,6

Bu analizler sonucunda ulaşılan parametreler (Çizelge 4.3) ile hesaplanan saçılma açısı tesir-kesiti verilerinin deneysel ölçümlerle uyumu χ^2 hata hesabı ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, hesaplanan verilerin grafikleri çizilerek deneysel desenle karşılaştırılmıştır. Buna göre, 145 ve 250 MeV’de %30 ek-sığ potansiyeller ile en iyi sonuçlar elde edilirken, 350-1120 MeV aralığındaki enerjilerde %10 ek-sığ potansiyeller ile en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Derin yapıdaki potansiyellerde ise %95 ek-derin potansiyel ilavesiyle en iyi sonuçlar gözlenmiştir. Çizelge 4.4’te en iyi sonuçları veren derin ve sığ yapıdaki ek-potansiyellere ait parametreler, V_1 formundaki sabit parametrelili potansiyelin kullanıldığı (Çizelge 4.2) parametreler ile birlikte karşılaştırılarak özetlenmiştir.

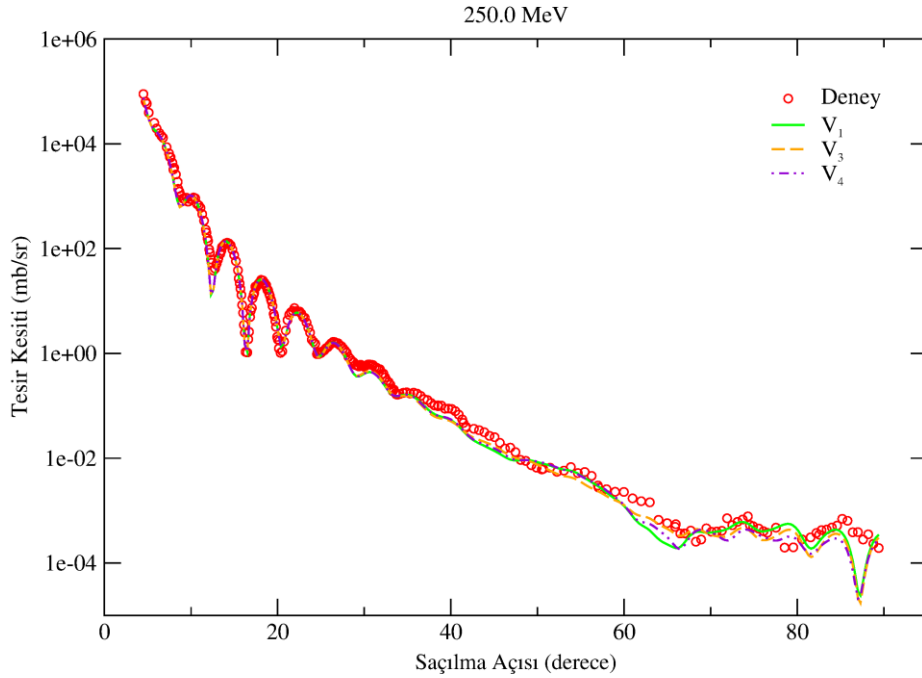
Çizelge 4.4. Ek-potansiyeller ile elde edilen en başarılı analizlere ait parametreler ve χ^2 değerleri

E_{LAB} (MeV)	Potansiyel Formu	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	W_S (MeV)	r_S (fm)	a_S (fm)	χ^2
145	V_1	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	-	-	-	14,8
	V_3 (%95)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	14,63	0,318	0,02	13,9
	V_4 (%30)	419	0,777	1,53	15,4	1,362	0,76	4,62	0,672	0,02	14,2
250	V_1	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	-	-	-	11,3
	V_3 (%95)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	27,46	0,250	0,43	10,2
	V_4 (%30)	369	0,778	1,51	28,9	1,262	1,04	8,67	0,676	0,11	10,2
350	V_1	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	-	-	-	8,3
	V_3 (%95)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	36,39	0,289	0,03	8,0
	V_4 (%10)	339	0,784	1,55	38,3	1,192	1,03	3,83	0,834	0,12	7,6
480	V_1	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	-	-	-	52,5
	V_3 (%95)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	41,33	1,004	0,36	44,6
	V_4 (%10)	286	0,775	1,30	43,5	1,128	1,01	4,35	0,678	0,03	47,0
704	V_1	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	-	-	-	139,0
	V_3 (%95)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	49,40	0,714	0,14	137,1
	V_4 (%10)	233	0,778	0,99	52,0	1,192	0,63	5,20	0,912	0,01	136,6
1120	V_1	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	-	-	-	253,5
	V_3 (%95)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	61,75	0,312	0,01	250,5
	V_4 (%10)	163	0,572	0,94	65,0	0,714	0,81	6,50	0,651	0,01	250,5

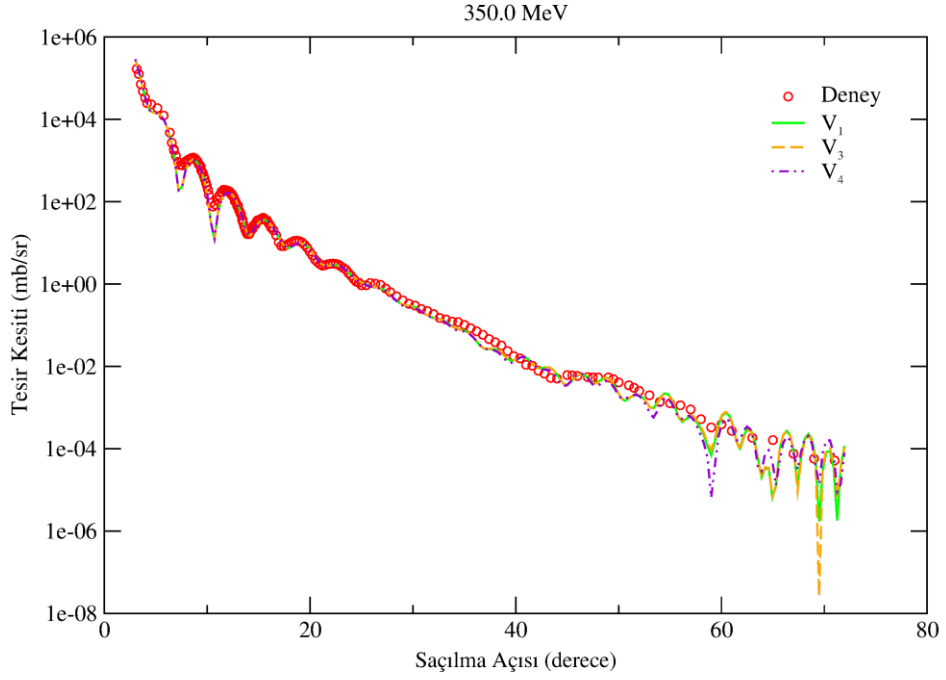
Her enerji değeri için, Çizelge 4.4’te özetlenen parametreler ile hesaplanan saçılma açısı tesir-kesiti verilerinin deneysel verilerle karşılaştırıldığı grafikler Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ile verilmiştir.



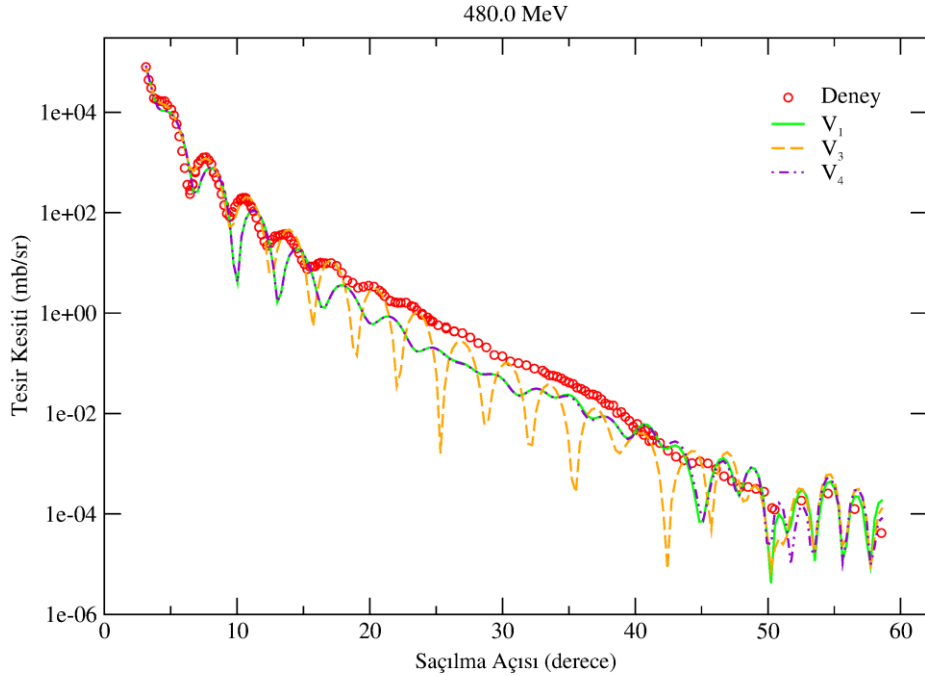
Şekil 4.13. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



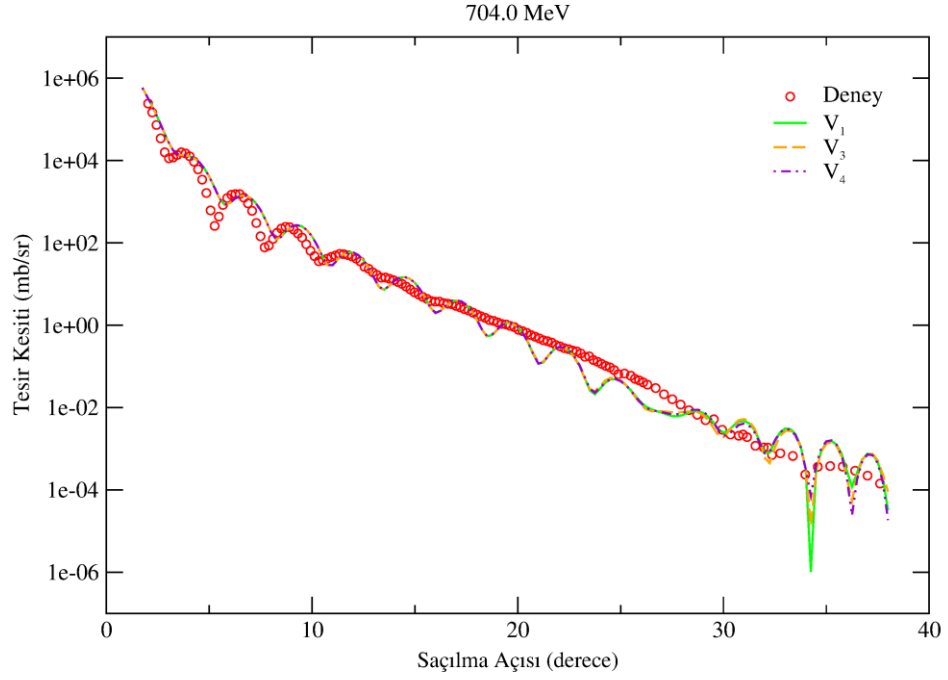
Şekil 4.14. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



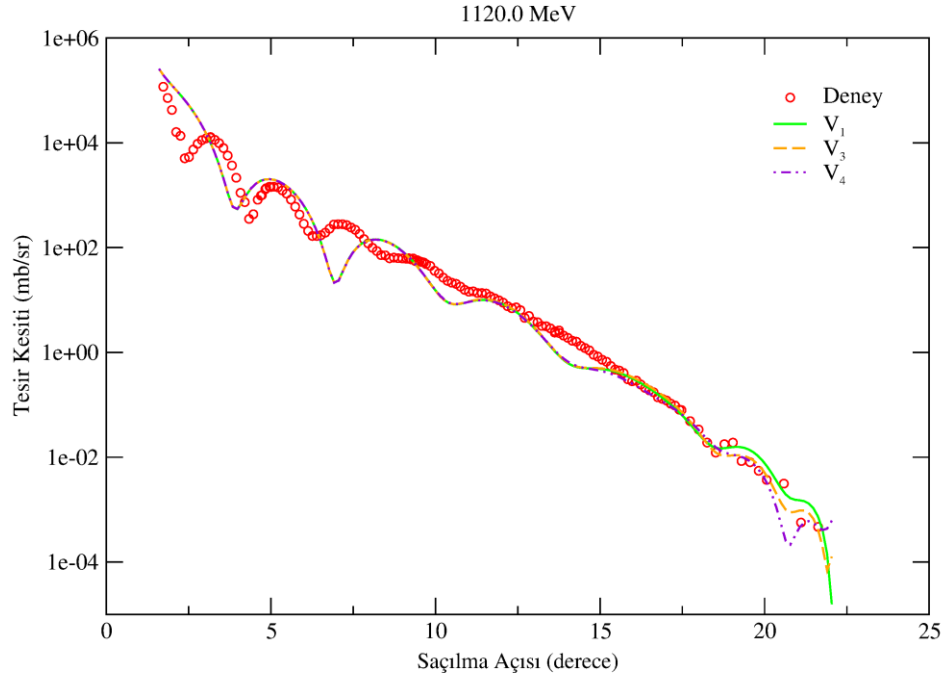
Şekil 4.15. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısıl dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.16. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısıl dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.17. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.18. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, sabit parametrelili V_1 ile derin ek-potansiyelli V_3 ve sığ ek-potansiyelli V_4 potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması

Derin ve sıg yapıdaki ek-potansiyellerin V_1 potansiyeline ilavesiyle yapılan analizlerde V_3 ve V_4 potansiyelleri genel olarak benzer desenleri veren sonuçlar üretmişlerdir. Şekil 4.13 – Şekil 4.18’de verilen grafiklerde V_1 potansiyel formunun kullanıldığı sabit parametrelili analizlerden elde edilen desenlere de yer verilerek V_1 , V_3 ve V_4 potansiyellerinin ürettikleri sonuçların da birbirleri ile kıyaslanması amaçlanmıştır. Buna göre, her üç potansiyelin de birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği söylenebilir. Buradaki sonuçlar, literatürde yer alan önceki çalışmalar (Brandan ve Satchler, 1991; Sugiyama vd., 1993; Khoa vd., 1994; Khoa vd., 2000) ile tutarlı ve ek-potansiyellerin katkısını doğrular niteliktedir. Sugiyama ve arkadaşları, *WSD* formundaki yüzey teriminin nükleer potansiyelin sanal kısmına eklenmesi ile χ^2 değerlerinde %10’luk bir iyileşme olduğunu 145 MeV için göstermişlerdir (Sugiyama vd., 1993). Bu kısımdaki analizlerde, 145, 250, 350 ve 480 MeV enerjileri için de yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 4.4). Ancak, sonuçların geneli üzerinden χ^2 değerleri göz önüne alındığında, %95 derinliğe sahip V_3 potansiyeli ile elde edilen sonuçlar daha başarılı görünse de beklenen düzeyde bir iyileşme gözlenemediği söylenebilir. Zira grafiklerden görüldüğü üzere desenler büyük oranda birbiri ile aynı davranışı sergilemektedir (Şekil 4.13 - Şekil 4.18). Oksijen çekirdeğinin küresel yapısı, yüzey teriminin katkısını sınırlı kılmaktadır. Bu bağlamda, analizlerin başarısına katkısı çok az olan ve daha fazla parametre içeren V_3 ’ün V_1 ’e tercih edilmesi, matematiksel hesaplamalarda artışa neden olacağı için makul görünmemektedir.

Çalışmanın devamında kullanılacak potansiyel formunun tercihine yönelik yapılan bu ön analizlerde, ele alınan serbest parametre ve sabit parametre durumları ile ek-potansiyellerin katkısı üzerinden genel bir değerlendirme yapıldığında, analiz sonuçlarının deneysel ölçümleri açıklamada başarılı olduğunu söylemek mümkündür. Analizlerin birbirleri arasındaki kıyaslamada V_1 ve V_3 potansiyellerinin kullanıldığı analizler öne çıksa da, yukarıda söz edilen nedenler göz önüne alındığında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapılacak optik model analizlerinde V_1 formundaki potansiyel yapısı tercih edilmiştir.

4.2. Optimizasyon Algoritmalarının Kullanımı ile Yapılan Analizler

Bu kısımda, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması için hesaplanan tesir-kesiti değerlerinin deneysel verilerle uyumunu arttırmak adına, hesaplamalarda kullanılan serbest parametrelili V_1 potansiyelinin parametreleri üzerinden optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ele alınan enerjilerde, deney ve teori arasındaki uyumu ifade eden χ^2 değerlerinin minimize edilmesi amaçlanırken, aynı zamanda hesaplamalardan elde edilen sonuçların grafiklerde sergilediği desenler izlenmiş ve böylece bu saçılmayı açıklayan en iyi potansiyeller araştırılmıştır.

V_1 potansiyelinin gerçel ve sanal kısmına ait V_0 , r_0 , a_0 , W_V , r_V ve a_V parametrelerinin optimizasyonu, 3. Bölüm'de tanımlanan dört farklı optimizasyon algoritması ile yapılmıştır. Optimizasyon işlemlerinde, algoritmaların her biri dayandığı temeller çerçevesinde parametreleri belli aralıklarda değiştirilerek deneysel verilere en yakın sonuçları aramıştır. Her iterasyonda, belirlenen aralıklarda parametrelere rastgele atanan değerler ile oluşturulan parametre seti Fresco bilgisayar programında hesaplama sokulmuştur. Hesaplama sonuçları ile deneysel veriler arasındaki uyum χ^2 hata hesabı ile değerlendirilmiş, belirlenen iterasyon sayısı sonunda en küçük χ^2 değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, çalıştırılan her optimizasyon algoritmasında iterasyon sayısı kadar parametre seti oluşturulmuş ve hesaplama yapılmıştır.

$E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında ön analizlerin sonuçları baz alınarak parametrelerin optimizasyon aralıkları seçilmiş ve bu aralıklarda optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.5'te parametreler için seçilen optimizasyon aralıkları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Optimizasyon algoritmaları ile yapılan hesaplamalarda parametreler için seçilen aralıklar

E_{LAB} (MeV)	V_{0min} (MeV)	V_{0maks} (MeV)	r_{0min} (fm)	r_{0maks} (fm)	a_{0min} (fm)	a_{0maks} (fm)	W_{Vmin} (MeV)	W_{Vmaks} (MeV)	r_{Vmin} (fm)	r_{Vmaks} (fm)	a_{Vmin} (fm)	a_{Vmaks} (fm)
145	400	450	0,600	0,999	1,00	2,00	10,0	30,0	1,000	2,500	0,20	1,20
250	350	400	0,600	0,999	1,00	2,00	20,0	40,0	1,000	2,500	0,20	1,20
350	310	360	0,600	0,999	1,00	2,00	20,0	50,0	1,000	2,500	0,20	1,20
480	250	300	0,600	0,999	1,00	2,00	25,0	60,0	1,000	2,500	0,20	1,20
704	200	250	0,600	0,999	0,70	1,70	30,0	75,0	1,000	2,500	0,20	1,20
1120	125	175	0,350	0,800	0,70	1,70	45,0	90,0	0,350	1,850	0,20	1,20

Her bir optimizasyon algoritması için iterasyon sayısı 2000 olarak tercih edilmiştir. Tavlama benzetimi algoritmasında başlangıç çözümü el ile girildiğinden, her enerji değeri için tavlama benzetimi algoritması bir kez çalıştırılmıştır. Genetik algoritma, gri kurt optimizasyon algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu algoritmalarında başlangıç çözümleri rastgele üretildiği için, seçilen aralıklarda en uygun değerlere ulaşabilmek ve aynı zamanda yerel en iyilerden kurtulmak amacıyla bu algoritmalar her enerji değeri için 5'er kez çalıştırılmıştır.

Optimizasyon işlemleri sonucu elde edilen parametre değerleri ve bu parametre setleri ile yapılan hesaplama sonuçlarının deneysel verilere uyumunu gösteren χ^2 değerleri Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Optimize edilen parametreler ve bu parametrelerin hesaplamalarda kullanılmasıyla elde edilen χ^2 değerleri

E_{LAB} (MeV)	Optimizasyon Algoritması	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	χ^2
145	GA	424	0,828	1,36	16,7	1,352	0,80	12,3
	GKO	448	0,807	1,40	16,7	1,350	0,79	11,5
	PSO	450	0,804	1,40	16,6	1,350	0,79	11,6
	TB	448	0,807	1,40	16,7	1,350	0,79	11,5
250	GA	386	0,756	1,56	35,0	1,218	1,09	19,0
	GKO	355	0,800	1,46	32,8	1,230	1,13	8,2
	PSO	350	0,809	1,44	32,8	1,234	1,10	8,3
	TB	355	0,799	1,46	32,8	1,230	1,13	8,2
350	GA	344	0,799	1,51	42,5	1,180	1,06	7,2
	GKO	310	0,846	1,43	38,5	1,217	0,98	5,8
	PSO	310	0,844	1,44	38,0	1,219	0,98	5,8
	TB	310	0,846	1,43	38,5	1,217	0,98	5,8
480	GA	250	0,917	1,14	48,9	1,182	0,82	20,3
	GKO	250	0,918	1,12	60,0	1,142	0,91	16,9
	PSO	250	0,918	1,12	60,0	1,142	0,91	16,9
	TB	250	0,918	1,12	60,0	1,142	0,91	16,9
704	GA	200	0,765	0,98	40,0	1,242	0,58	125,8
	GKO	230	0,629	0,97	30,0	1,307	0,53	93,8
	PSO	233	0,626	0,98	30,0	1,307	0,53	93,8
	TB	230	0,629	0,97	30,0	1,307	0,53	93,8
1120	GA	125	0,350	1,21	78,5	0,350	0,77	115,6
	GKO	125	0,350	1,21	78,5	0,350	0,77	115,6
	PSO	125	0,350	1,21	78,5	0,350	0,77	115,6
	TB	125	0,350	1,21	78,5	0,350	0,77	115,6

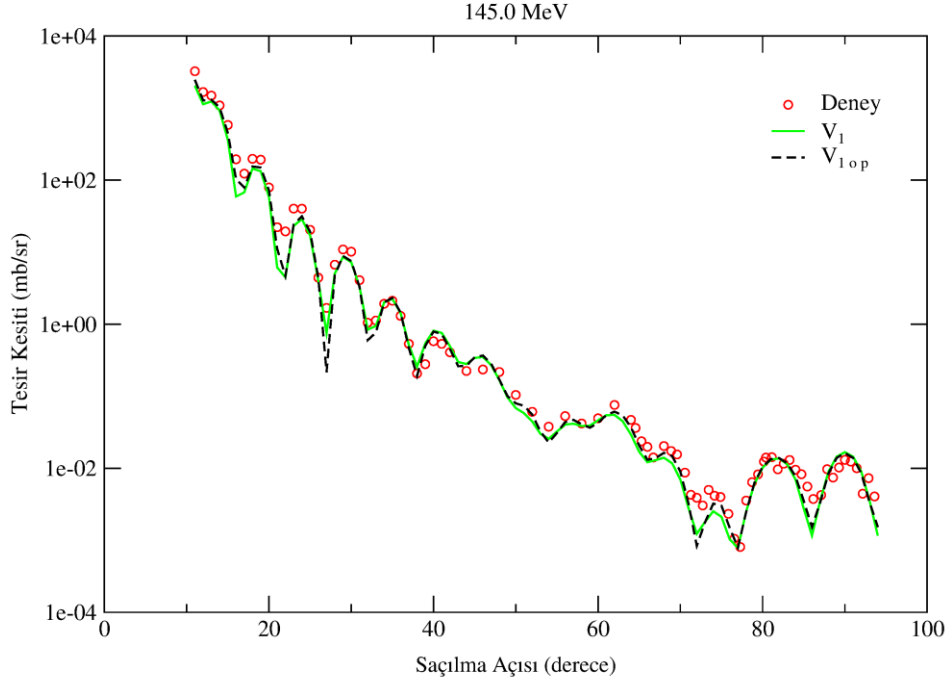
Çizelge 4.6'daki elde edilen veriler incelendiğinde, χ^2 değerleri göz önüne alınarak gri kurt optimizasyon algoritmasının ön plana çıktığı söylenebilir. Yine bu sonuçlar için, genetik almırtmaya kıyasla parçacık sürü optimizasyonun daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Başlangıç çözümünün el ile girildiği tavlama benzetimi algoritmasında, diğer algoritmaların bulduğu en iyi değerler başlangıç çözümü olarak girilmiş ve bu en iyi değerlerden hareketle çözümler aranmıştır. Çizelge 4.6'da her bir enerji için tavlama benzetimi satırlarına bakıldığında, genel olarak, en iyi χ^2 değerlerinin üretildiği parametre setlerinin tavlama benzetimi tarafından tekrar bulunduğu görülmektedir. Bu bağlamda, diğer üç algoritma ile bulunan en iyi

değerlerin tavlama benzetimi algoritmasında başlangıç çözümü olarak girilmesi ve tekrar aynı sonuçlara ulaşılmasıyla bir nevi sağlama işlemi yapıldığı da düşünülebilir.

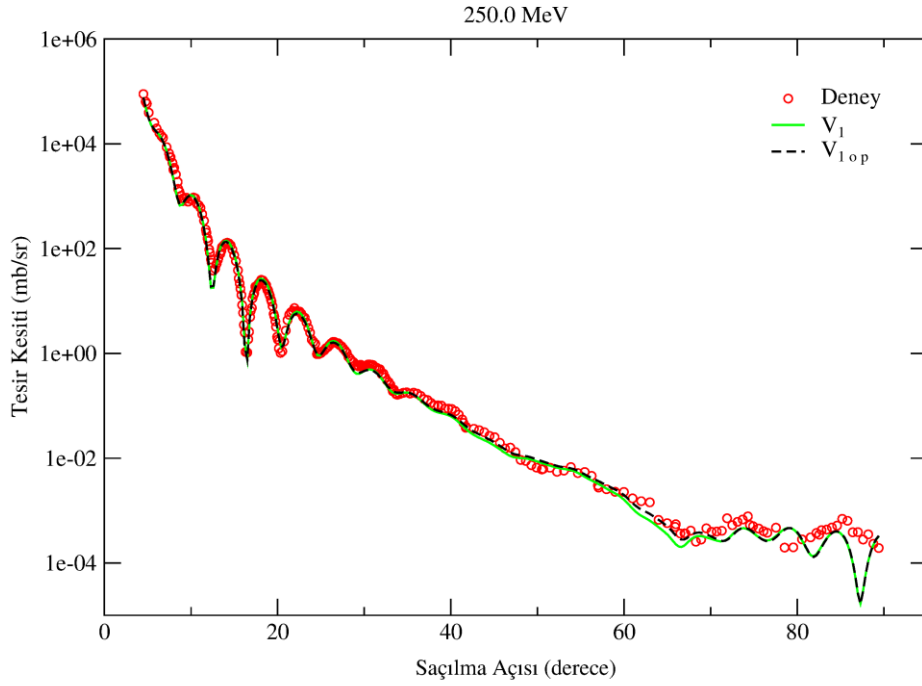
Elde edilen en iyi χ^2 değerlerine göre üretilen parametre setleri, optimizasyon işlemlerinin katkısının değerlendirilmesi amacıyla, ön analizlerde elde edilen en iyi analizler olan V_1 potansiyelinin kullanıldığı serbest parametrelili analizlerin χ^2 değerleri ile birlikte Çizelge 4.7’de özetlenmiştir. Bu parametreler ile hesaplanan saçılma açısı tesir-kesiti değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırmalı grafikleri sonraki sayfalarda yer almaktadır. Optimizasyon uygulandıktan sonra sonuçlardaki iyileşmeyi değerlendirebilmek açısından, ön analizlerde en iyi sonuçları veren V_1 potansiyelinin kullanıldığı serbest parametrelili analizlerin sonuçları da grafiklerdeki karşılaştırmaya dahil edilmiştir.

Çizelge 4.7. Optimizasyon sonucu elde edilen en iyi parametre setleri ve χ^2 değerlerinin serbest parametrelili analiz sonuçları ile birlikte gösterimi

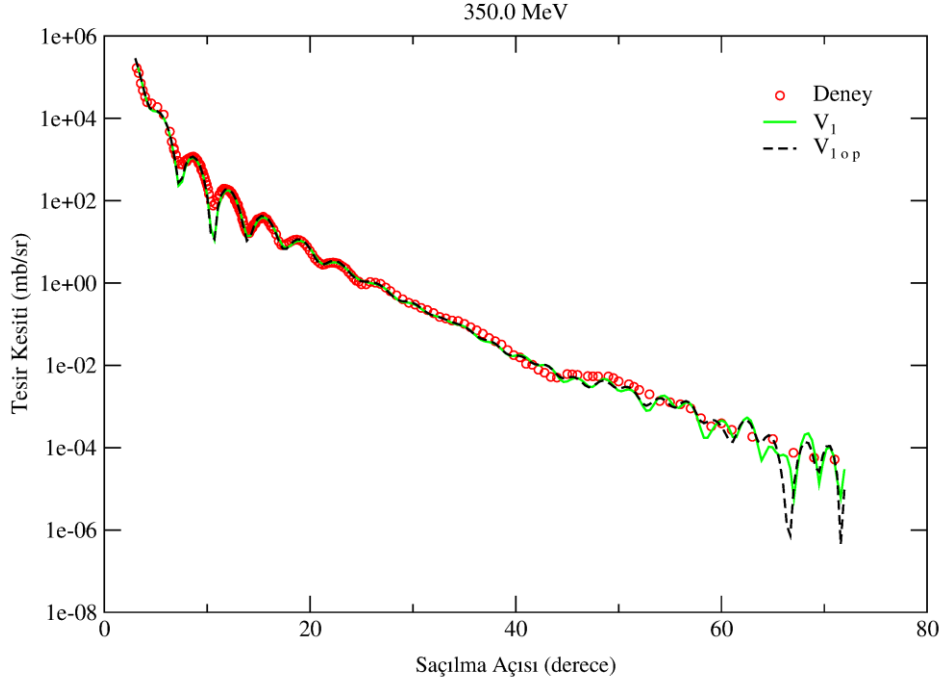
E_{LAB} (MeV)	Potansiyel Formu	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_V (MeV)	r_V (fm)	a_V (fm)	χ^2
145	V_{1op}	448	0,807	1,40	16,7	1,350	0,79	11,5
	$V_{1(serbest)}$	414	0,781	1,52	15,4	1,361	0,76	14,6
250	V_{1op}	355	0,799	1,46	32,8	1,231	1,13	8,2
	$V_{1(serbest)}$	352	0,802	1,46	30,9	1,248	1,06	9,2
350	V_{1op}	310	0,844	1,44	38,0	1,219	0,98	5,8
	$V_{1(serbest)}$	335	0,810	1,49	39,9	1,197	1,02	6,7
480	V_{1op}	250	0,918	1,12	60,0	1,142	0,91	16,9
	$V_{1(serbest)}$	277	0,799	1,26	45,2	1,130	1,01	45,2
704	V_{1op}	230	0,629	0,97	30,0	1,307	0,53	93,8
	$V_{1(serbest)}$	223	0,799	0,96	50,5	1,197	0,62	136,6
1120	V_{1op}	125	0,350	1,21	78,5	0,350	0,77	115,6
	$V_{1(serbest)}$	153	0,566	0,96	67,3	0,688	0,83	248,3



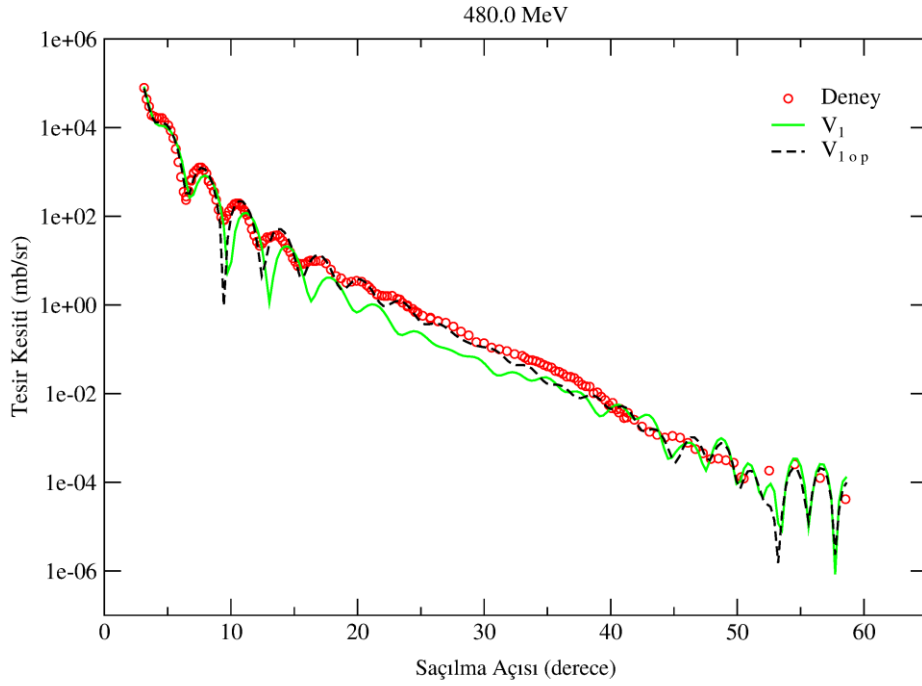
Şekil 4.19. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



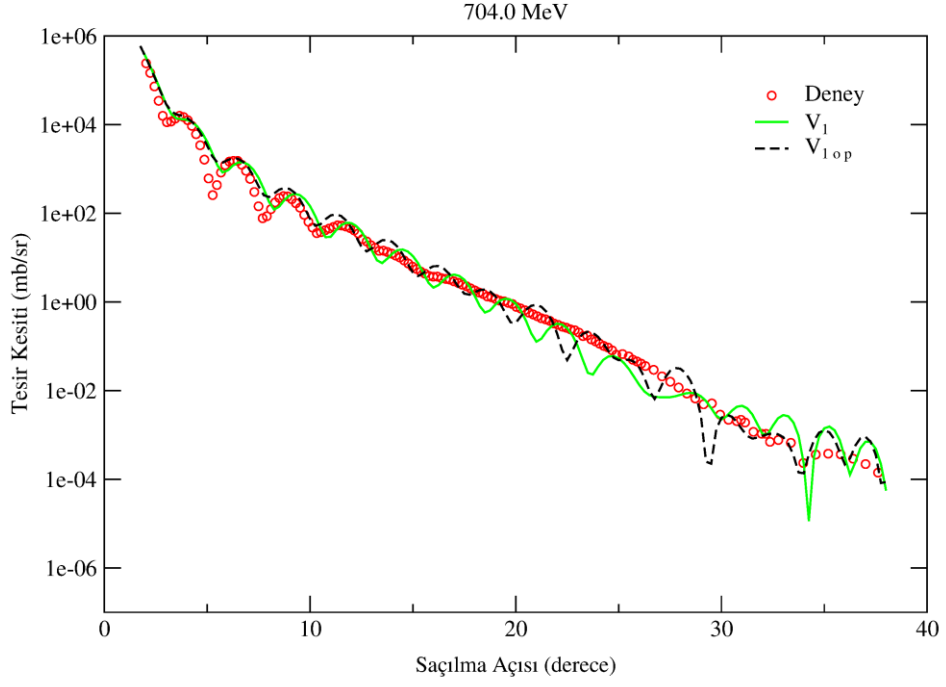
Şekil 4.20. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



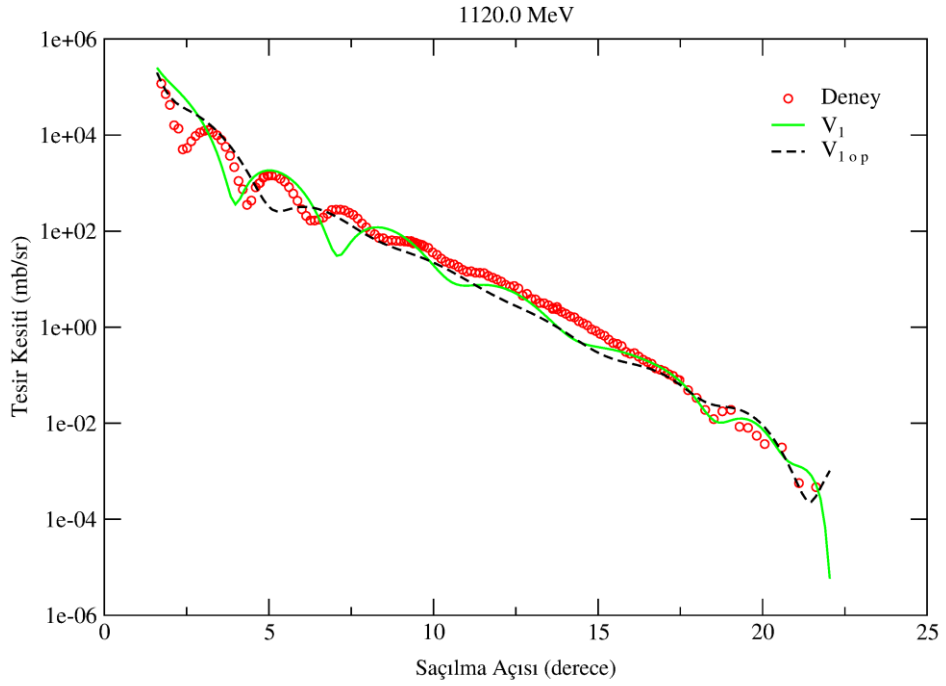
Şekil 4.21. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.22. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.23. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması



Şekil 4.24. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, serbest parametrelili V_1 ve V_{1op} potansiyel formlarının kullanıldığı optik model hesaplamalarından elde edilen tesir-kesiti fitleriyle karşılaştırması

Optimizasyon sonucu elde edilen düşük χ^2 değerleri ve hesaplanan tesir-kesiti verilerinin deneysel tesir-kesiti ölçümleri ile karşılaştırıldığı grafiklerdeki desenlerin uyumu, varılan sonuçların başarısını ortaya koymaktadır. Ön analizler göz önüne alındığında, en iyi sonuçları veren gri kurt optimizasyon algoritması ile χ^2 değerlerinde %10 ila %60 oranında iyileşme sağlanmıştır (Çizelge 4.7). Özellikle 480, 704 ve 1120 MeV gelme enerjilerindeki analiz sonuçları, ön analizler ve önceki teorik çalışmalara (Tülüler, 2015; Öztürk vd., 2019) göre fark edilir biçimde iyileştirilmiştir. 250, 704 ve 1120 MeV enerjileri için elde edilen sonuçlar, Hassanain vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada aynı enerji değerleri için sunulan χ^2 değerlerinden daha düşük bulunmuştur. Benzer şekilde, 145, 250, 350 ve 480 MeV enerjileri için, Rahmat ve Modarres (2018)'in 124 - 480 MeV enerji aralığında gerçekleştirdikleri $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasına ait analizlerin yayınlanan sonuçlarına göre daha düşük χ^2 değerleri elde edilmiştir. Optimize edilmiş parametre setleri ile yapılan hesaplamalarda, ön analizlerde gözlenen 480 MeV'deki 11 derece civarından başlayıp 20 derece civarına kadar devam eden fazdışılık sorunu giderilmiş görünmektedir. 704 MeV gelme enerjisinde 30-35 derece aralığındaki uyum artmış, 1120 MeV için ise, saçılma açısının 4-6 derece aralığında bir fazdışılık görölse de, ön analizlere göre ($V_{1(\text{serbest})}$), deneysel desenle çok daha uyumlu bir görüntü elde edilmiştir. Özet olarak, optimizasyon işlemlerinin uygulanmasıyla, ele alınan enerji aralığında yapılan analiz sonuçlarının olumlu yönde geliştirildiğini söylemek mümkündür.

4.3. Makine Öğrenmesi Yaklaşımı ile Saçılma Açısı Tesir-Kesiti Tahminleri

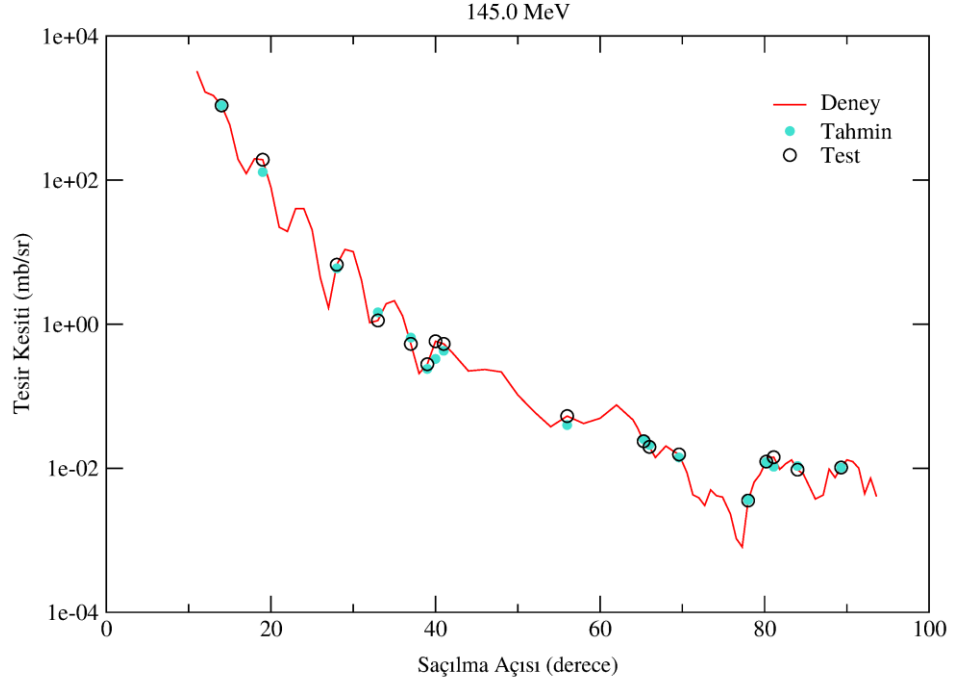
Son yıllarda bilimsel disiplinlerin çoğunda kullanılmaya başlanan makine öğrenmesi, çeşitli veri işleme görevleri için farklı algoritma ve modelleme araçlarıyla bilimsel çalışmalara yardımcı olabilmektedir (Carleo vd., 2019). Tez çalışmasının buraya kadar olan kısımlarında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasını açıklayan en iyi potansiyel yapısı araştırılmış, diferansiyel tesir-kesiti hesaplamaları yapılarak optik model analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda ise makine öğrenmesi ile $E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasına ait deneysel veriler kullanılarak tahminler yapılmış, saçılma açısı ile tesir-kesiti arasındaki ilişkiyi açıklayıcı bilgilere ulaşılması amaçlanmıştır. Yerel polinom regresyon yaklaşımı ile RapidMiner programında gerçekleştirilen bu süreçte mevcut deneysel verilerin %80'i eğitim, %20'si test amaçlı kullanılmıştır. Sayısal tahmin için kullanılan bir teknik olan regresyon, bir bağımlı

değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin gücünü belirlemeye çalışan istatistiksel bir ölçüdür. Bir başka ifadeyle bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişki bulunmaya çalışılır. Burada kullanılan yerel polinom regresyonda veri alanındaki bir noktanın yerel komşusu aranarak komşuluk belirlenir. Daha sonra veri noktaları, ağırlıklı en küçük kareler optimizasyonu kullanılarak istenilen derecedeki bir polinomun fit edilmesi için kullanılır. Böylelikle değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklayabilecek en uygun polinom fonksiyon aranır.

Yukarıda bahsi geçen yaklaşımın deneysel verilere uygulanması ile elde edilen tahmin sonuçları aşağıda çizelgeler halinde verilmiştir (Çizelge 4.8 - Çizelge 4.13). Ayrıca, sonuçların uyumunun değerlendirilmesi için, deneysel verilerin %20'sinden oluşan test verileri ve bunlara karşılık gelen tahminlerin yer aldığı karşılaştırmalar grafikler ile görselleştirilerek sunulmuştur (Şekil 4.25 - Şekil 4.30). Görsel değerlendirmelerin daha sağlıklı yapılabilmesi açısından, grafiklerde deneysel verilerin tamamına ait desenlere de yer verilmiştir.

Çizelge 4.8. $E_{LAB}=145$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açılarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
14,0	1086,65942	1088,47233
19,0	192,04887	129,33412
28,0	6,71144	5,97654
33,0	1,12465	1,46026
37,0	0,53278	0,65140
39,0	0,27807	0,23971
40,0	0,57987	0,32921
41,0	0,53309	0,42748
56,0	0,05300	0,03980
65,3	0,02373	0,02541
66,0	0,01983	0,02105
69,6	0,01556	0,01411
78,0	0,00356	0,00361
80,2	0,01238	0,01223
81,1	0,01428	0,01050
84,0	0,00955	0,01074
89,3	0,01025	0,01020



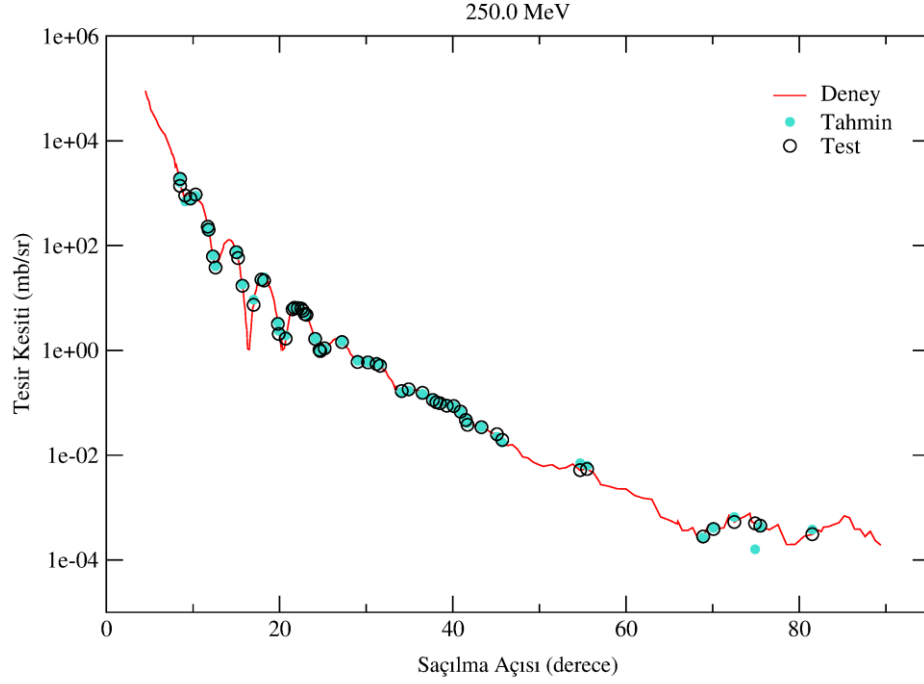
Şekil 4.25. $E_{LAB}=145$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması

Çizelge 4.9. $E_{LAB}=250$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açılara ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
8,5	1878,02813	1964,31872
8,5	1381,29003	1599,64896
9,1	903,60813	696,15940
9,7	790,10023	767,63166
10,3	945,09134	899,38483
11,7	230,29280	229,51076
11,8	201,49348	196,63315
12,3	62,06758	64,96259
12,6	38,17840	40,30827
15,0	74,99653	76,58091
15,2	57,70742	67,16119
15,7	17,11932	18,21550
17,0	7,41286	9,28849
17,9	22,44000	22,07098
18,2	21,55016	24,90320
19,8	3,20615	3,42915
19,9	2,06410	2,36569
20,7	1,67611	1,91710
21,5	6,07751	6,34552
21,7	6,49757	6,67249
22,1	6,39360	7,07167
22,5	6,28463	5,88014
22,7	5,71459	5,52150

Çizelge 4.9. $E_{LAB}=250$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açılarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri (devam)

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
22,9	4,94352	5,15742
23,1	4,77151	4,88801
24,1	1,66219	1,68067
24,6	1,02112	0,92197
24,7	0,96971	1,04365
25,2	1,09613	1,08384
27,2	1,44215	1,47318
29,0	0,60165	0,63094
30,2	0,58913	0,59566
31,2	0,55102	0,57238
31,6	0,50811	0,54091
34,1	0,16755	0,16177
34,9	0,18057	0,17110
36,5	0,15481	0,14836
37,7	0,11335	0,11541
38,1	0,10250	0,10168
38,5	0,09804	0,10153
39,3	0,08786	0,09625
40,1	0,08667	0,08546
40,9	0,06787	0,06762
41,5	0,04704	0,05009
41,7	0,03795	0,04052
43,3	0,03422	0,03447
45,1	0,02519	0,02249
45,7	0,01963	0,01744
54,7	0,00519	0,00701
55,5	0,00545	0,00631
68,9	0,00028	0,00027
70,1	0,00039	0,00041
72,5	0,00053	0,00066
74,9	0,00050	0,00016
75,5	0,00045	0,00044
81,5	0,00031	0,00038



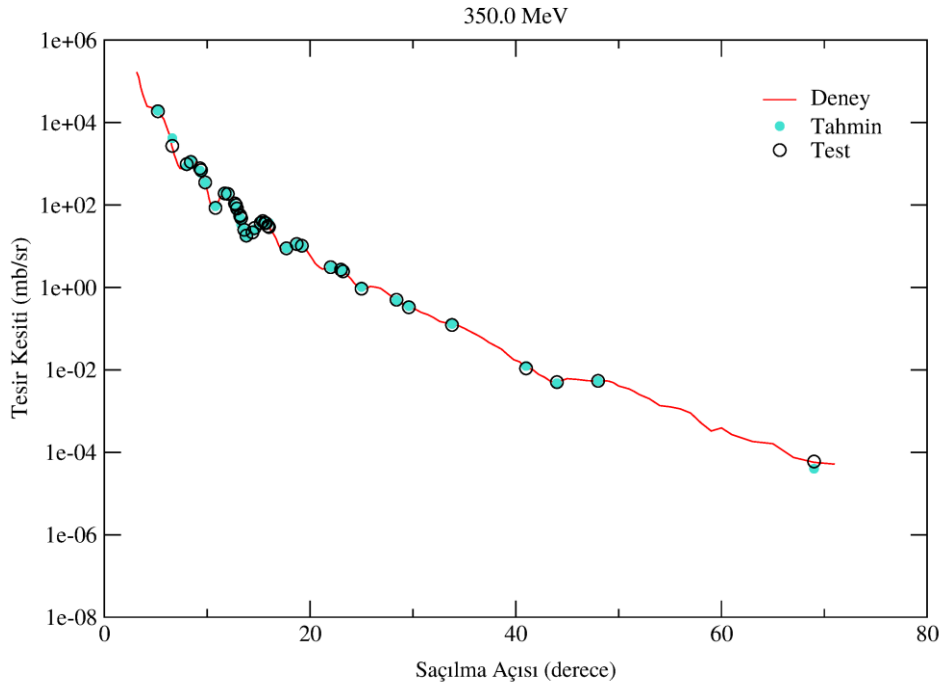
Şekil 4.26. $E_{LAB}=250$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir kesiti tahminleri ile karşılaştırması

Çizelge 4.10. $E_{LAB}=350$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
5,2	18770,11551	19434,77082
6,6	2715,99175	4185,55107
8,0	983,58468	873,29623
8,4	1108,97958	1211,74868
9,3	777,58258	683,80140
9,4	702,98411	598,92716
9,8	353,89190	352,15507
10,8	85,23830	93,32876
11,7	190,99750	197,77125
12,0	186,09815	187,78057
12,7	108,79982	99,17572
12,8	98,91997	83,24974
12,9	82,60009	68,43454
13,2	56,30029	48,91022
13,2	54,09028	48,32248
13,3	48,11032	33,63357
13,6	24,98027	24,48642
13,8	18,11025	17,77824
14,4	21,63049	23,03115
14,6	27,73071	25,66820
15,2	36,77126	38,38585
15,4	40,80154	37,38360
15,6	37,00147	37,16575
15,7	36,30149	36,34198

Çizelge 4.10. $E_{LAB}=350$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri (devam)

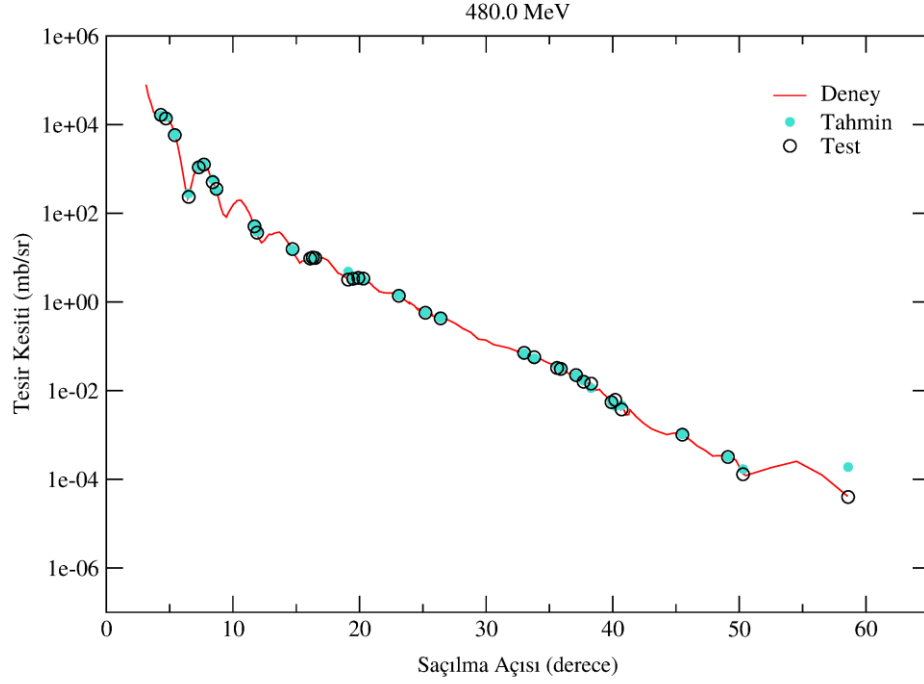
Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
15,9	30,80136	38,04337
16,0	29,22131	36,87222
17,7	8,92055	8,94573
18,7	11,30075	11,30020
19,2	10,30070	10,16624
22,0	3,10018	3,12539
23,0	2,71013	2,81013
23,2	2,45011	2,55447
25,0	0,93402	1,02350
28,4	0,50298	0,49442
29,6	0,33098	0,35047
33,8	0,12298	0,13024
41,0	0,01090	0,01248
44,0	0,00506	0,00477
48,0	0,00541	0,00540
69,0	0,00006	0,00004



Şekil 4.27. $E_{LAB}=350$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması

Çizelge 4.11. $E_{LAB}=480$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açılarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
4,3	16594,45520	16287,26656
4,7	13845,93367	14790,98389
5,4	5827,00412	5962,69019
6,5	235,28769	281,05724
7,3	1091,57056	1106,75042
7,7	1267,29092	1285,98179
8,4	505,76856	586,53665
8,7	355,92458	335,27183
11,7	51,07273	55,16356
11,9	36,69744	38,26744
14,7	15,64059	15,16605
16,1	9,60284	8,76031
16,3	10,09385	9,03363
16,5	9,85583	9,62340
19,1	3,19705	4,85387
19,5	3,34424	3,24807
19,9	3,51327	3,78314
20,3	3,36721	3,12903
23,1	1,38226	1,40569
25,2	0,57405	0,57290
26,4	0,42880	0,43513
33,0	0,07145	0,06937
33,8	0,05692	0,05373
35,6	0,03264	0,03593
35,9	0,03100	0,03164
37,1	0,02248	0,02235
37,7	0,01594	0,01692
38,3	0,01444	0,01152
39,9	0,00550	0,00572
40,2	0,00621	0,00449
40,7	0,00376	0,00468
45,5	0,00102	0,00104
49,1	0,00032	0,00032
50,3	0,00013	0,00017
58,6	0,00004	0,00019



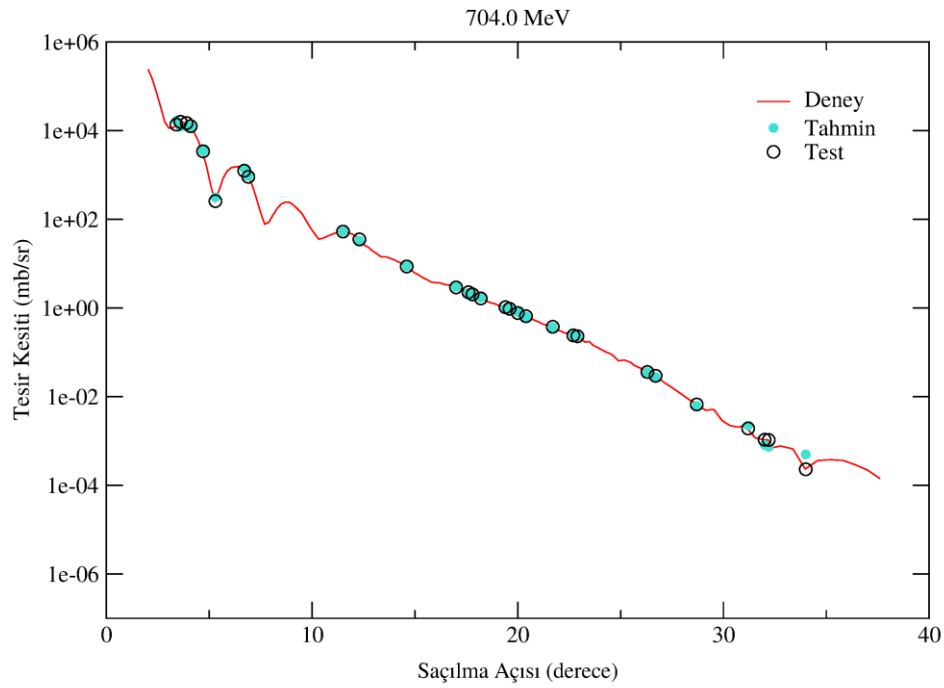
Şekil 4.28. $E_{LAB}=480$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması

Çizelge 4.12. $E_{LAB}=704$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
3,4	13694,96048	16594,50742
3,6	15867,45343	12412,46646
3,9	14849,95733	12236,36731
4,1	12622,46592	12468,63983
4,7	3438,04470	3498,79335
5,3	258,72011	314,41917
6,7	1252,35842	1410,67913
6,9	910,80698	942,31923
11,5	53,15825	53,61529
12,3	35,39290	33,49974
14,6	8,67349	8,76634
17,0	2,92539	2,98112
17,6	2,27255	2,22087
17,8	2,03495	2,01087
18,2	1,64610	1,70903
19,4	1,04221	0,98835
19,6	0,96026	0,95455
20,0	0,77327	0,80886
20,4	0,65447	0,63789
21,7	0,37662	0,36815
22,7	0,24199	0,25128
22,9	0,23132	0,23113
26,3	0,03604	0,03569
26,7	0,02964	0,02790

Çizelge 4.12. $E_{LAB}=704$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri (devam)

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
28,7	0,00669	0,00622
31,2	0,00192	0,00224
32,0	0,00107	0,00082
32,2	0,00106	0,00074
34,0	0,00023	0,00050



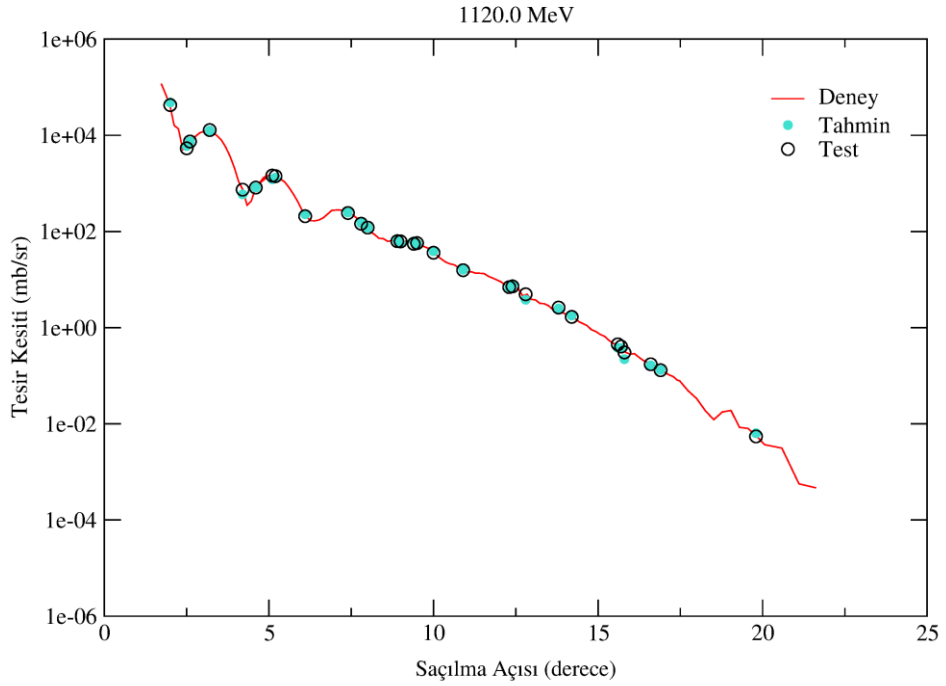
Şekil 4.29. $E_{LAB}=704$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması

Çizelge 4.13. $E_{LAB}=1120$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
2,0	42539,98672	48322,89603
2,5	5364,00167	5991,44737
2,6	7429,00386	7453,00387
3,2	12870,01901	12600,01861
4,2	739,40252	592,50781
4,6	818,80324	822,96571
5,1	1453,00642	1222,63397

Çizelge 4.13. $E_{LAB}=1120$ MeV gelme enerjisi için farklı saçılma açlarına ait deneysel tesir-kesiti verileri (test verileri) ile aynı açı değerleri için makine öğrenmesi yaklaşımıyla tahmin edilen tesir-kesiti değerleri (devam)

Saçılma Açısı (derece)	Tesir-Kesiti (Test) (mb/sr)	Tesir-Kesiti (Tahmin) (mb/sr)
5,2	1413,00636	1316,95064
6,1	207,80093	229,64146
7,4	242,50063	249,46765
7,8	145,30025	150,05549
8,0	120,50016	120,01461
8,9	62,72991	64,89190
9,0	62,02988	57,68294
9,4	55,40982	62,32149
9,5	57,33980	56,58660
10,0	36,13980	38,75969
10,9	15,65985	16,01728
12,3	6,96489	6,85492
12,4	7,22088	7,51037
12,8	4,94591	3,80383
13,8	2,61794	2,50519
14,2	1,67396	1,78790
15,6	0,45009	0,38107
15,7	0,40489	0,37839
15,8	0,30599	0,22111
16,6	0,17299	0,16495
16,9	0,13020	0,13223
19,8	0,00549	0,00640



Şekil 4.30. $E_{LAB}=1120$ MeV için $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik açısal dağılım ölçümlerinin, tesir-kesiti tahminleri ile karşılaştırması

Ele alınan enerjiler için yapılan tesir-kesiti tahminleriyle test verileri arasındaki uyum χ^2 hata hesabı ile değerlendirilerek Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14. Tesir-kesiti tahminleri ile test verileri arasındaki uyumu gösteren χ^2 değerleri

E_{LAB} (MeV)	χ^2
145	3,9
250	1,9
350	2,1
480	39,8
704	5,6
1120	1,2

$E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında her enerji değeri için mevcut deneysel verilerin %80'i ile eğitilen yapay öğrenme algoritmasının %20'lik test verilerine oldukça yakın tahminlerde bulunduğu çizelge ve grafiklerde net biçimde görülmektedir. Buna rağmen, çalıştırılan yerel polinom regresyon algoritması veriler arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bir formül üretememiştir. Burada herhangi bir formül elde edilememesinde veri miktarı, kullanılan algoritma, algoritmanın matematiksel yapısı vb. teknik sebepler etkili olabileceği gibi, doğadan gelen verilerin açıklanabilmesinin veya formüle edilmesinin bugünkü bilgiler ile mümkün olmaması da etkili olabilir.

Makine öğrenmesi, eğitim verilerinden hareketle sonuçlar üretir ve her ne kadar bazı durumlarda heyecan verici sonuçlar verse de fizik bilimi ile arasındaki etkileşim henüz emekleme aşamasındadır (Carleo vd., 2019). Ayrıca, tamamen doğal ve doğadan elde edilen verilerin, bilimsel olarak zaman zaman öngörülemez olması şaşırtıcı değildir. Neudecker vd. (2020) makine öğrenmesi ile nükleer veriler üzerine yaptıkları çalışmada, makine öğrenmesi tekniklerinin nükleer veri doğrulama analizinde yardımcı bir araç olarak kullanılabileceği önerisinde bulunmuşlardır. Buna paralel olarak, tez çalışmasının bu kısmında elde edilen sonuçların, deneysel ölçümlerde %20 civarında veri kayıplarının telafisi ve şüpheli verilerin değerlendirilmesinde faydalar sunabileceği söylenebilir. Gelecekte makine eğitiminde kullanılacak veri miktarının artışı ve tahmin algoritmalarının gelişimi ile birlikte daha fazla fayda sağlanacağı öngörülebilir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması optik model çerçevesinde ele alınmış, mevcut deneysel tesir-kesiti ölçümleriyle uyumlu sonuçları üreten fenomenolojik potansiyel yapısı araştırılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Çalışmada ilk olarak, hesaplamalarda tercih edilecek potansiyel formunun belirlenmesi adına, nükleer potansiyeli oluşturan derinlik ve geometri parametrelerinin serbest ve sabit olduğu durumlar ile ek-potansiyellerin etkisi incelenerek ön analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, optik modelin işleyişine uygun biçimde, deneysel verilerle uyumu artırmak için, ön analizler sonucu tercih edilen nükleer potansiyelin parametrelerine farklı optimizasyon algoritmaları ile optimizasyon işlemleri uygulanmıştır. Son adımda ise, makine öğrenmesi yardımıyla saçılma açısı ile tesir-kesiti verileri arasındaki ilişki ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Tüm çalışma boyunca $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının açısal dağılımları, $E_{LAB}=145, 250, 350, 480, 704$ ve 1120 MeV gelme enerjilerinde, optik model yaklaşımıyla fenomenolojik potansiyeller kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde, tesir-kesiti hesaplamaları Fresco bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Ön analizlerde, nükleer potansiyelin gerçel kısmı $WS2$, sanal kısmı ise WS ve $WS2$ şekline sahip olarak belirlenerek sabit ve serbest parametre durumları incelendiğinde, $WS2+iWS2$ formundaki V_1 potansiyelinin hesaplamalarda deneysel verilere daha yakın sonuçlar ürettiği saptanmıştır. Bu sonuçtan hareketle, ek-potansiyellerin etkisi incelenirken V_1 potansiyelinin sanal kısmına derin ve sığ yapıdaki potansiyeller ilave edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Sistematik olarak belirlenen farklı derinliklerle yapılan bu kapsamlı analizler sonucunda beklenen derecede iyileşme sağlanamamış, dolayısıyla artan parametre sayılarının hesaplamalara getirdiği yük sebebiyle ek-potansiyellerin sonraki analizlerde kullanılması tercih edilmemiştir. Böylece ön analizler neticesinde, çalışmanın sonraki aşamalarında deneyle en uyumlu sonuçları üreten V_1 potansiyelinin kullanılmasına karar verilmiştir.

V_1 potansiyelinin gerçel ve sanal kısım parametrelerine optimizasyon işlemlerinin uygulandığı ikinci aşamada, hesaplanan tesir-kesiti değerleri ile deneysel veriler arasındaki uyum en üst düzeye çıkarılırken hata değerlerinin de minimize edilmesi amaçlanmıştır. Gri kurt optimizasyon algoritması, genetik algoritma, parçacık sürü

optimizasyonu algoritması ve tavlama benzetimi algoritması kullanılarak optimize edilen parametreler ile yapılan hesaplamalarda özellikle 480, 704 ve 1120 MeV enerjileri için fark edilir biçimde iyileşme sağlanmış, 145, 250 ve 350 MeV gelme enerjilerindeki analizlerde de iyileşme kaydedilmiştir. Sağladığı sonuçlar bakımından gri kurt optimizasyon algoritmasının öne çıktığı optimizasyon uygulamaları neticesinde deneysel verilerle daha uyumlu sonuçlar elde edilerek, incelenen enerji aralığında, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sistemi için optimum parametre setlerinden oluşan optik potansiyeller belirlenmiştir. Böylelikle, daha önce literatürde yer almayan, Fresco programının farklı optimizasyon algoritmaları ile entegre edilerek kullanımıyla $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılması için optik model analizleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Zaman zaman yeterli bilimsel ve teknolojik imkanların olmaması, deney zorlukları ve diğer bazı sebeplerle yapılamayan deneylerin olası sonuçları, kuramsal modeller, bilgisayarlı hesaplama, benzetim vb. teknikler ile öngörülelebilmektedir. Bu düşünceden hareketle son aşamada, makine öğrenmesi yaklaşımıyla hali hazırdaki deneysel ölçüm verileri kullanılarak, saçılma açısı ile tesir-kesiti verileri arasındaki ilişkiyi formüle etmek amaçlanmıştır. Literatürdeki deneysel verilerin %80'i kullanılarak eğitilen tahmin algoritması %20'lik test verilerine oldukça yakın tahminler üretmesine karşın, verilerden yola çıkarak bir formül üretmeyi başaramamıştır.

Tüm sonuçlar üzerinden genel bir değerlendirme yapıldığında, $E_{LAB}=145-1120$ MeV enerji aralığında $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ elastik saçılmasının optik model analizleri, ön analizler ve optimizasyon uygulamaları ile birlikte oldukça kapsamlı bir biçimde ele alınmış ve deneysel verilerle gayet uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Her bir gelme enerjisi için sistematik olarak çok sayıda hesaplama yapılmış, böylece optik potansiyelin parametreleri hassasiyetle belirlenmiştir. Ele alınan enerji aralığında maksimum ve minimumlar genel olarak doğru bir şekilde üretilmiş, optimizasyon uygulamaları ile birlikte, yer yer gözlenen faz dışılık sorunları bertaraf edilmiştir. Halen gelişmeye ve ilerlemeye devam eden makine öğrenmesi yaklaşımı ile tesir-kesiti verilerine farklı bir pencereden bakılarak ümit verici sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçların kullanılabilirliği üzerine tespitite bulunulmuştur.

Gelecekte farklı saçılma reaksiyonları için, optimizasyon uygulamaları ile optik model analizleri yapılabileceği gibi, $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ sisteminin inelastik saçılması da benzer yöntemlerle incelenebilir. Ayrıca, Fresco ve benzeri reaksiyon analiz programlarına optimizasyon algoritmalarının entegrasyonu sağlanarak bu tarz bilgisayar programları geliştirilebilir ve daha başarılı analizlerin elde edilmesinde hesaplama kolaylığı temin edilebilir.



KAYNAKLAR

- Alpaydın, E., 2018. Yapay Öğrenme. Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 486s, İstanbul.
- Aydın, A., 1997. $^{40}\text{Ar}(p,p)^{40}\text{Ar}$ Esnek Saçılmasının 22.6, 27.5, 30.0 ve 36.7 MeV Proton Enerjilerinde Optiksel Model Analizi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 136s, Samsun.
- Bartnitzky, G., Blazevic, A., Bohlen, H. G., Casandjian, J. M., Chartier, M., Clement, H., Gebauer, B., Gillibert, A., Kirchner, T., Khoa, D. T., Lepine-Szily, A., Mitting, W., von Oertzen, W., Ostrowski, A. N., Roussel-Chomaz, P., Siegler, J., Wilpert, M., Wilpert, T., 1996. Model-unrestricted nucleus-nucleus Scattering Potentials from Measurement and Analysis of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Scattering. *Physics Letters B*, 365, 23-28.
- Bohlen, H. G., Stiliaris, E., Gebauer, B., Von Oertzen, W., Wilpert, M., Wilpert, T., Ostrowski, A., Khoa, D. T., Demyanova, A. S., Ogloblin, A. A., 1993. Refractive Scattering and Reactions, Comparison of Two Systems: $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ and $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$. *Zeitschrift für Physik A-Hadrons and Nuclei*, 346(3), 189-200.
- Brandan, M. E., Satchler, G. R., 1991. Optical Potential Ambiguities and $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ at 350 MeV. *Physics Letters B*, 256(3-4), 311-315.
- Brandan, M. E., Satchler, G. R., 1997. The Interaction between Light Heavy-ions and What it Tell Us. *Physics Reports*, 285(4), 143-243.
- Burcham, W. E., 1979. *Elements of Nuclear Physics*. Longman Inc., 409p, New York.
- Carleo, G., Cirac, I., Cranmer, K., Daudet, L., Schuld, M., Tishby, N., Vogt-Maranto, L., Zdeborová, L., 2019. Machine Learning and the Physical Sciences. *Reviews of Modern Physics*, 91(4), 045002-1 – 045002-39.
- Carlson, B. V., 2001. Optical Model Calculations with the Code ECIS95. Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors: Physics, Design and Safety, 13 March-14 April 2000, Trieste (Italy), 61-104.
- Chen, Z., Zhang, Z., Xie, J., Guo, Q., Yu, T., Zhao, P., Liu, Z., Xie, C., 2021. Multi-objective Optimization Strategies for Radiation Shielding Design with Genetic Algorithm. *Computer Physics Communications*, 260, 107267.
- Cockcroft, J. D., Walton, E. T. S., 1930. Experiments with High Velocity Positive Ions. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 129(811), 477-489.
- Cockcroft, J. D., Walton, E. T. S., 1932. Experiments with High Velocity Positive Ions (I). Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 136(830), 619-630.
- Cockcroft, J. D., Walton, E. T. S., 1932. Experiments with High Velocity Positive Ions (II). The Disintegration of Elements by High Velocity Protons. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 137(831), 229-242.

- Cooper, S. G., Mackintosh, R. S., 1994. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Elastic Scattering at 350 MeV Studied by Inversion. Nuclear Physics A, 576, 308-316.
- Çavuşlu, M. A., Karakuzu, C., Şahin, S., 2010. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ile Yapay Sinir Ağı Eğitiminin FPGA Üzerinde Donanımsal Gerçeklenmesi. Politeknik Dergisi, 13(2), 83-92.
- Çerçioğlu, H., Özcan, U., Gökçen, H., Toklu, B., 2009. Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri için Bir Tavlama Benzetimi Yaklaşımı. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(2), 331-341.
- Çetin, N., 2002. Genetik Algoritma. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, İstanbul.
- Davidovskaya, O. I., Denisov, V. Y., 2010. Elastic $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Scattering and Nucleus-Nucleus Potential with a Repulsive Core. Ukrainian Journal of Physics, 55, 861-868.
- Dikmen, E., Öztürk, O., Cengiz, Y., 2015. Fitting Single Particle Energies in *sdgh* Major Shell. Communications in Theoretical Physics, 63(2), 222-228.
- Ekström, A., Forssén, C., Dimitrakakis, C., Dubhashi, D., Johansson, H. T., Muhammed, A. S., Salomonsson, H., Schliep, A., 2019. Bayesian Optimization in AB Initio Nuclear Physics. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 46(9), 095101-1 – 095101-30.
- Emel, G. G., Taşkın, Ç., 2002. Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları. Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 21(1), 129-152.
- EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data), Database Version of 2017-04-07. Brookhaven National Laboratory National Nuclear Data Center. Erişim Tarihi: 26.04.2017. <https://www.nndc.bnl.gov/exfor/>
- Feshbach, H., Porter, C. E., Weisskopf, V. F., 1954. Model for Nuclear Reactions with Neutrons. Physical Review, 96(2), 448-464.
- Furumoto, T., Sakuragi, Y., Yamamoto, Y., 2008. New Complex G-matrix Interactions Derived from Two and Three-Body Forces and Application to Proton-Nucleus Elastic Scattering. Physical Review C, 78(4), 044610-1 – 044610-12.
- Furumoto, T., Sakuragi, Y., Yamamoto, Y., 2009. Effects of Repulsive and Attractive Three-Body Forces on Nucleus-Nucleus Elastic Scattering. Physical Review C, 80(4), 044614-1 – 044614-18.
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 372s, Boston, MA, USA.

- Gonzalez, M. M., Brandan, M. E., 2001. The Dispersion Relation Applied to the Radial Shape and Energy Dependence of the ^{16}O - ^{16}O Potential at Intermediate Energies. *Nuclear Physics A*, 603-615.
- Gözüdeli, Y., Akcayol, M. A., 2010. XML Veritabanı için Tavlama Benzetimi ile Sorgu Optimizasyonu. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 21-30.
- Gridnev, K. A., Rodionova, E. E., 2008. The Role of Exchange Interaction in Elastic Scattering of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ and $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 5(4), 349-352.
- Gridnev, K. A., Rodionova, E. E., Fadeev, S. N., 2008. Description of Elastic Scattering in the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ and $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ Systems. *Physics of Atomic Nuclei*, 71(7), 1262-1266.
- Hamada, S., Burtebayev, N., Amangeldi, N., 2013. Detailed Study for ^{16}O Elastically Scattered from ^{16}O at Energies 20, 24 and 28 MeV. *International Journal of Modern Physics E*, 22(8), 1350058-1 – 1350058-8.
- Hamada, S., Burtebayev, N., Amangeldi, N., Gridnev, K. A., Rusek, K., Kerimkulov, Z., Maltsev, N., 2012. Phenomenological and Semi-microscopic Analysis for ^{16}O and ^{12}C Elastically Scattering on the Nucleus of ^{16}O and ^{12}C at Energies near the Coulomb Barrier. *Journal of Physics: Conference Series*, 381, 012130-1 – 012130-6.
- Hassanain, M. A., Al Sebiey, S. M. M., 2014. Analysis of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Elastic and Inelastic Scattering Using the Optical Model and the Coupled-Channels Mechanism. *Physical Review C*, 90(5), 054606-1 – 054606-7.
- Hassanain, M. A., Ibraheem, A. A., Al Sebiey, S. M. M., Mokhtar, S. R., Zaki, M. A., Mahmoud, Z. M. M., Behairy, K. O., Farid, M. E., 2013. Investigation of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Elastic Scattering Using the α -cluster Folding Model. *Physical Review C*, 87(6), 064606-1 – 064606-10.
- Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control and Artificial Intelligence*. The University of Michigan Press, 206p, USA.
- Kaplan, I., 1977. *Nuclear Physics*. Addison-Wesley Publishing Company, 770p, USA.
- Kennedy, J., Eberhart, R. , 1995. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks (C. 4, ss. 1942 - 1948)*. IEEE.
- Khoa, D. T., Bohlen, H. G., von Oertzen, W., Bartnitzky, G., Blazevic, A., Nuoffer, F., Gebauer, B., Mitting, W., Rousset-Chomaz, P., 2005. Study of Refractive Structure in the Inelastic $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Scattering at the Incident Energies of 250 to 1120 MeV. *Nuclear Physics A*, 759, 3-22.

- Khoa, D. T., von Oertzen, W., Bohlen, H. G., Bartnitzky, G., Clement, H., Sugiyama, Y., Gebauer, B., Ostrowski, A., Wilpert, T., Wilpert, M., Langner, C., 1995. Equation of State for Cold Nuclear Matter from Refractive $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Elastic Scattering. *Physical Review Letters*, 74(1), 34-37.
- Khoa, D. T., von Oertzen, W., Bohlen, H. G., 1994. Double-folding Model for Heavy-ion Optical Potential: Revised and Applied to Study ^{12}C and ^{16}O Elastic Scattering. *Physical Review C*, 49(3), 1652-1668.
- Khoa, D. T., von Oertzen, W., Bohlen, H. G., Nuoffer, F., 2000. Study of Diffractive and Refractive Structure in the Elastic $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Scattering at Incident Energies Ranging from 124 to 1120 MeV. *Nuclear Physics A*, 672, 387-416.
- Khoa, D. T., von Oertzen, W., Faessler, A., Ermer, M., Clement, H., 1991. Pauli Exchange Effects in the Elastic Scattering of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$. *Physics Letters B*, 260(3-4), 278-284.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P., 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220 (4598), 671-680.
- Koç, İ., Baykan, Ö. K., Babaoğlu, İ., 2018. Gri Kurt Optimizasyon Algoritmasına Dayanan Çok Seviyeli İmge Eşik Seçimi. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 841-847.
- Koçak, G., Karakoç, M., Boztosun, İ., Balantekin, A. B., 2010. Effects of α -cluster Potentials for $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Fusion Reaction and S Factor. *Physical Review C*, 81(2), 024615-1 - 024615-7.
- Kondo, Y., Michel, F., Reidemeister, G., 1990. A Unique Deep Potential for the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ System. *Physics Letters B*, 242(3-4), 340-344.
- Kondo, Y., Robson, B. A., Smith, R., 1989. A Deep Potential Description of the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ System. *Physics Letters B*, 227(3-4), 310-314.
- Kondo, Y., Sugiyama, Y., Tomita, Y., Yamanouchi, Y., Ikezoe, H., Ideno, K., Hamada, S., Sugimitsu, T., Hijiyama, M., Fujita, H., 1996. Airy Minimum Crossing $\theta_{\text{cm}}=90^\circ$ at $E_{\text{lab}}=124$ MeV for the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ System. *Physics Letters B*, 365, 17-22.
- Krane, K. S., 2001. Nükleer Fizik I. Cilt. Çev. (Ed.) Şarer, B., Palme Yayıncılık, 404s, Ankara.
- Krane, K. S., 2002. Nükleer Fizik II. Cilt. Çev. (Ed.) Şarer, B., Palme Yayıncılık, 461s, Ankara.
- Kürkçüoğlu, M. E., 2006. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Esnek Saçılmasının Fenomenolojik ve Mikroskobik Potansiyeller ile Optik Model Analizleri. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 227s, Zonguldak.

- Kürkçüoğlu, M. E., Aytekin, H., Boztosun, İ., 2006a. Optical Model Analysis of the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Nuclear Scattering Reaction around $E_{\text{LAB}}=5$ MeV/Nucleon. Gazi University Journal of Science, 19(2), 105-112.
- Kürkçüoğlu, M. E., Aytekin, H., Boztosun, İ., 2006b. An Investigation of the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Elastic Scattering by using Alpha-Alpha Double Folding Potential in Optical Model Formalism. Modern Physics Letters A, 21(29), 2217-2232.
- Kürkçüoğlu, M. E., Cof, G., Aytekin, H., Boztosun, İ., 2013. Introducing a Global Optical Model Approach for Analysing $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Elastic Scattering at 5-10 MeV/nucleon Region. SDU Journal of Science, 8(1), 71-81.
- Kürkçüoğlu, M. E., Tülüler, M., 2015. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Esnek Saçılmasının 5 MeV/n Civarında Sığ Ek-Potansiyeller Kullanılarak Tek-Kanal Optik Model Analizleri. SDU Journal of Science, 10(1), 85-94.
- Lilley, J. S., 2018. Nükleer Fizik İlkeler ve Uygulamalar. Çev. (Ed.) Aydın, A., Sarpün, İ. H., Tel, E., Kaplan, A., Nobel Akademik Yayıncılık, 396s, Ankara.
- Macfarlane, M. H., Pieper, S. C., 1978. Ptolemy: A Program for Heavy-ion Direct-Reaction Calculations. Argonne National Laboratory Report No. ANL-76-11 (Rev. 1) (unpublished).
- Mierswa, I., Klinkenberg, R., Fischer, S., Ritthoff, O., 2003. A flexible platform for knowledge discovery experiments: Yale—yet another learning environment. In: LLWA 03-Tagungsband der GI-Workshop-Woche Lernen-Lehren-Wissen-Adaptivität.
- Minomo, K., Kohno, M., Kazuyuki, O., 2016. Microscopic Coupled-Channels Calculations of Nucleus-Nucleus Scattering Including Chiral Three-Nucleon-Force Effects. Physical Review C, 93(1), 014607-1 – 014607-6.
- Neudecker, D., Grosskopf, M., Herman, M., Haeck, W., Grechanuk, P., Vander Wiel, S., Rising, M. E., Kahler, A. C., Sly, N., Talou, P., 2020. Enhancing Nuclear Data Validation Analysis by using Machine Learning. Nuclear Data Sheets, 167, 36-60.
- Nicoli, M. P., Haas, F., Freeman, R. M., Aissaoui, N., Beck, C., Elanique, A., Nouicer, R., Morsad, A., Szilner, S., Basrak, Z., Brandan, M. E., Satchler, G. R., 1999. Elastic Scattering of $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ at Energies E/A between 5 and 8 MeV. Physical Review C, 60(6), 064608-1 – 064608-10.
- Nicoli, M. P., Haas, F., Freeman, R. M., Aissaoui, N., Beck, C., Elanique, A., Nouicer, R., Morsad, A., Szilner, S., Basrak, Z., Brandan, M. E., 1999. Refractive Effects in the Elastic Scattering of Light Heavy Ions between 5 and 10 MeV/n: the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Reaction. Nuclear Physics A, 654, 882c-887c.
- Norouzi, A., Aghaie, M., Mohamadi Fard, A. R., Zolfaghari, A., Minucmehr, A., 2013. Nuclear Reactor Core Optimization with Parallel Integer Coded Genetic Algorithm. Annals of Nuclear Energy, 60, 308-315.

- Nuoffer, F., Bartnitzky, G., Clement, H., Blazevic, A., Bohlen, H. G., Gebauer, B., Von Oertzen, W., Wilpert, M., Wilpert, T., Lepine-Szily, A., Mittig, W., Ostrowski, A. N., Roussel-Chomaz, P., 1998. The Equation of State for Cold Nuclear Matter as seen in Nucleus-Nucleus Scattering. II *Nuovo Cimento A*, 111(8), 971-975.
- Özdoğan, H., Üncü, Y. A., Karaman, O., Şekerci, M., Kaplan, A., 2021a. Estimations of Giant Dipole Resonance Parameters using Artificial Neural Network. *Applied Radiation and Isotopes*, 169, 109581.
- Özdoğan, H., Üncü, Y. A., Şekerci, M., Kaplan, A., 2021b. Estimations of Level Density Parameters by using Artificial Neural Network for Phenomenological Level Density Models. *Applied Radiation and Isotopes*, 169, 109583.
- Özsağlam, M. Y., Çunkaş, M., 2008. Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması. *Politeknik Dergisi*, 11(4), 299-305.
- Öztürk, O., 2010. *sdgh* Ana Kabuğundaki Tek Parçacık Enerjilerinin Fitlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 52s, Isparta.
- Öztürk, O., Kürkçüoğlu, M. E., Tülüler, M., 2019. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Saçılması için $E_{\text{LAB}}=145-1120$ MeV Aralığında Tek-Kanal Optik Model Potansiyel Formları ile Diferansiyel Tesir-Kesiti Hesaplamaları. *Yalvaç Akademi Dergisi*, 4(1), 1-8.
- Rahmat, M., Modarres, M., 2018. Folding Model Analyses of $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ and $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Elastic Scattering Using the Density-Dependent LOCV-Averaged Effective Interaction. *Physical Review C*, 97(3), 034611-1 – 034611-13.
- Sacco, F. W., de Oliveria, C. R. E., Pereira, C. M. N. A., 2006. Two Stochastic Optimization Algorithms Applied to Nuclear Reactor Core Desing. *Progress in Nuclear Energy*, 48(6), 525-539.
- Satchler, G. R., 1980. *Introduction to Nuclear Reactions*. Macmillan Education Ltd., 318p, London.
- Satchler, G. R., 1983. *Direct Nuclear Reactions*. Oxford University Press, 833p, New York.
- Sosonkina, M., Sharda, A., Negoita, A., Vary, J. P., 2008. Integration of AB Initio Nuclear Physics Calculations with Optimization Techniques. Bubak, M. (Ed.), *Computational Science - ICCS 2008* (833-842). Springer Berlin Heidelberg, 1058s, Berlin.
- Stiliaris, E., Bohlen, H. G., Fröbrich, P., Gebauer, B., Kolbert, D., Von Oertzen, W., Wilpert, M., Wilpert, T., 1989. Nuclear Rainbow Structures in the Elastic Scattering of ^{16}O on ^{16}O at $E_{\text{L}}=250$ MeV. *Physics Letters B*, 223(3,4), 291-295.

- Sugiyama, Y., Tomita, Y., Ikezoe, H., Yamanouchi, Y., Ideno, K., Hamada, S., Sugimitsu, T., Hijiya, M., Kondo, Y., 1993. Observation of Airy Oscillation for the $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ System at $E_{\text{lab}}=145$ MeV. *Physics Letters B*, 312, 35-39.
- Şahin, R., 2008. Dinamik Tesis Düzenleme Problemi için Bir Tavlama Benzetimi Sezgiseli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4), 863-870.
- Şenel, F. A., 2019. İki Boyutlu Düzensiz Şekilleri Yerleştirme Optimizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 148s, Isparta.
- Şenel, F. A., Yüksel, A. S., Gökçe, F., Yiğit, T., 2018. Gri Kurt Optimizasyon Algoritması ile İki Boyutlu Dizilim Yazılımının Geliştirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 293-306.
- Thompson, I. J., 1988. Coupled Channels Methods for Nuclear Physics, *Computer Physics Reports*, 7, 167-212.
- Thompson, I. J., 1997. FRESCO, a Coupled-Channels Code, (unpublished), England.
- Tülüler, M., 2015. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Saçılmasının $E_{\text{LAB}}=145-1120$ MeV Enerji Aralığında Optik Model Analizleri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55s, Isparta.
- Williams, W. S. C., 2014. Nükleer ve Parçacık Fiziği. Çev. (Ed.) Dumanoğlu, İ., Ertürk, S., Nobel Akademik Yayıncılık, 386s, Ankara.
- Woods, R. D., Saxon, D.S., 1954. Diffuse Surface Optical Model for Nucleon-Nuclei Scattering. *Physical Review*, 95(2), 577-578.

EKLER

EK A. Optimizasyon Algoritmalarının Kaynak Kodları

Genetik Algoritma

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
namespace kodlar
{
public class GA
{
private Random rnd;
private int PS, iter, D;
private double r_c, r_m, r_ch;
private double g_best; //Optimum solution obtained by GA algorithm
private double[] g_best_pos; //Parameters of the optimum solution
private byte[,] population;
private int[] bits;
private int sumOfbits;
private List<double[]> rang;
private bool minmax;
private byte[] resolution;
public GA(int D, int PS, double r_c, double r_m, double r_ch, int iter,
List<double[]> rang, bool minmax, byte[] resolution)
{
this.PS = PS;
this.iter = iter;
this.D = D;
this.r_c = r_c;
this.r_m = r_m;
this.r_ch = r_ch;
this.rang = rang;
}
```

```

this.minmax = minmax;
this.resolution = resolution;
bits = new int[D];
g_best_pos = new double[D];
g_best = double.PositiveInfinity;
rnd = new Random();
}
private int numberOfbits(int rng)
{
int i = 0;
while (true)
{
if (rng < Math.Pow(2, i))
break;
else
i++;
}
return i;
}
public double[] SOLVER()
{
int i, j, chng;
int[] inds;
double[] param = new double[D + 1];
double[,] pop_temp;
double[] fitness = new double[PS];
initial();
pop_temp = new double[population.GetLength(0), D];
for (int it = 0; it < iter; it++)
{
for (i = 0; i < PS; i++)
{
for (j = 0; j < D; j++)
{

```

```

pop_temp[i, j] = Math.Round(rang[j][0] + ((bit2double(i, j) * (rang[j][1] -
rang[j][0])) / Math.Pow(2, bits[j])), resolution[j]);
}
fitness[i] = Calc_func_values(pop_temp, i);
}
inds = Enumerable.Range(0, fitness.Count()).ToArray();
Array.Sort(fitness, inds);
g_best = fitness[0];
for (j = 0; j < D; j++)
{
g_best_pos[j] = pop_temp[inds[0], j];
}
chng = Convert.ToInt32(PS * r_ch);
for (i = PS - chng; i < PS; i++)
{
for (j = 0; j < sumOfbits; j++)
{
population[inds[i], j] = population[inds[0], j];
}
}
double rand;
for (i = 0; i < PS; i++)
{
rand = rnd.NextDouble();
if (rand < r_m)
mutation(inds[i], rnd.Next(bits.Sum()));
else if (rand < r_c)
crossover(inds[i], inds[rnd.Next(PS)], rnd.Next(bits.Sum()));
}
Console.WriteLine ("Iteration => " + it.ToString () + ", Cost => " +
g_best.ToString() + "{" +g_best_pos[0]+", "+g_best_pos[1]+", "+g_best_pos[2]+",
"+g_best_pos[3]+", "+g_best_pos[4]+", "+g_best_pos[5]+"}");
}
for (i = 0; i < D; i++)

```

```

param[i] = g_best_pos[i];
param[D] = g_best;
return param;
}
private void crossover(int index1, int index2, int point)
{
byte gec;
for (int i = point; i < bits.Sum(); i++)
{
gec = population[index1, i];
population[index1, i] = population[index2, i];
population[index2, i] = gec;
}
}
private void mutation(int index, int point)
{
population[index, point] = (byte)(1 - population[index, point]);
}
private double bit2double(int index, int dimen)
{
int i, start = 0, top = 0;
for (i = 0; i < dimen; i++)
{
start = start + bits[i];
}
for (i = start; i < start + bits[dimen]; i++)
{
top = top + Convert.ToInt32(population[index, i] * Math.Pow(2, i - start));
}
return top;
}
private void initial()
{
int i, j;

```

```

for (i = 0; i < D; i++)
{
bits[i] = numberOfbits(Convert.ToInt32((rang[i][1] - rang[i][0]) * Math.Pow(10,
resolution[i]))));
}
sumOfbits = bits.Sum();
population = new byte[PS, sumOfbits];
for (i = 0; i < PS; i++)
{
for (j = 0; j < sumOfbits; j++)
{
population[i, j] = (byte)rnd.Next(2);
}
}
}
private double Calc_func_values(double[,] sol, int index)
{
double[] tt = new double[D];
for (int i = 0; i < D; i++)
tt [i] = sol [index, i];
Maliyet mal = new Maliyet(tt, minmax);
return mal.cost();
}
}
}

```

Gri Kurt Optimizasyon Algoritması

```

using System;
using System.Threading.Tasks;
using System.Collections.Generic;
namespace kodlar
{
public class GWO

```

```

{
private Random rnd;
private int PS, iter, D;
private double[] Alpha_pos, Beta_pos, Delta_pos;
private double Alpha_score, Beta_score, Delta_score;
private double[,] Positions;
private List<double[]> rang;
private bool minmax;
private byte[] resolution;
public GWO(int D, int PS, int iter, List<double[]> rang, bool minmax, byte[]
resolution)
{
this.PS = PS;
this.iter = iter;
this.D = D;
this.rang = rang;
this.minmax = minmax;
this.resolution = resolution;
Alpha_pos = new double[D];
Beta_pos = new double[D];
Delta_pos = new double[D];
if (minmax)
Alpha_score = Beta_score = Delta_score = double.MinValue;
else
Alpha_score = Beta_score = Delta_score = double.MaxValue;
rnd = new Random();
}
private void initial()
{
Positions = new double[PS, D];
Parallel.For(0, PS, new ParallelOptions { MaxDegreeOfParallelism =
Environment.ProcessorCount }, jj =>
{
for (int j = 0; j < D; j++)

```

```

{
Positions[jj, j] = Math.Round(rnd.NextDouble() * (rang[j][1] - rang[j][0]) +
rang[j][0], resolution[j]);
}
});
}
public double[] SOLVER()
{
int i, it;
double[] param = new double[D + 1];
double fitness, a, r1, r2;
double A1, A2, A3, C1, C2, C3, X1, X2, X3, D_alpha, D_beta, D_delta;
initial();
for (it = 0; it < iter; it++)
{
for (i = 0; i < PS; i++)
{
for (int j = 0; j < D; j++)
{
if (Positions[i, j] < rang[j][0])
Positions[i, j] = rang[j][0];
if (Positions[i, j] > rang[j][1])
Positions[i, j] = rang[j][1];
}
fitness = Calc_func_values(Positions, i);
if (fitness < Alpha_score)
{
Alpha_score = fitness;
Parallel.For(0, D, new ParallelOptions { MaxDegreeOfParallelism =
Environment.ProcessorCount }, j =>
{
Alpha_pos[j] = Positions[i, j];
});
}
}
}
}

```

```

if (fitness > Alpha_score && fitness < Beta_score)
{
Beta_score = fitness;
Parallel.For(0, D, new ParallelOptions { MaxDegreeOfParallelism =
Environment.ProcessorCount }, j =>
{
Beta_pos[j] = Positions[i, j];
});
}
if (fitness > Alpha_score && fitness > Beta_score && fitness < Delta_score)
{
Delta_score = fitness;
Parallel.For(0, D, new ParallelOptions { MaxDegreeOfParallelism =
Environment.ProcessorCount }, j =>
{
Delta_pos[j] = Positions[i, j];
});
}
}
a = 2.0 - it * (2.0 / iter);
for (i = 0; i < PS; i++)
{
for (int j = 0; j < D; j++)
{
r1 = rnd.NextDouble();
r2 = rnd.NextDouble();
A1 = 2.0 * a * r1 - a;
C1 = 2.0 * r2;
D_alpha = Math.Abs(C1 * Alpha_pos[j] - Positions[i, j]);
X1 = Alpha_pos[j] - A1 * D_alpha;
r1 = rnd.NextDouble();
r2 = rnd.NextDouble();
A2 = 2.0 * a * r1 - a;
C2 = 2.0 * r2;

```

```

D_beta = Math.Abs(C2 * Beta_pos[j] - Positions[i, j]);
X2 = Beta_pos[j] - A2 * D_beta;
r1 = rnd.NextDouble();
r2 = rnd.NextDouble();
A3 = 2.0 * a * r1 - a;
C3 = 2.0 * r2;
D_delta = Math.Abs(C3 * Delta_pos[j] - Positions[i, j]);
X3 = Delta_pos[j] - A3 * D_delta;
Positions[i, j] = Math.Round((X1 + X2 + X3) / 3.0, resolution[j]);
}
}
Console.WriteLine ("Iteration => " + it.ToString () + ", Cost => " +
Alpha_score.ToString() + "{" +Alpha_pos[0]+", "+Alpha_pos[1]+",
"+Alpha_pos[2]+", "+Alpha_pos[3]+", "+Alpha_pos[4]+", "+Alpha_pos[5]+"}");
}
for (i = 0; i < D; i++)
param[i] = Alpha_pos[i];
param[D] = Alpha_score;
return param;
}
private double Calc_func_values(double[,] sol, int index)
{
double[] tt = new double[D];
for (int i = 0; i < D; i++)
tt [i] = sol [index, i];
Maliyet mal = new Maliyet(tt, minmax);
return mal.cost();
}
}
}

```

Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

```
using System;
using System.Collections.Generic;
namespace kodlar
{
public class PSO
{
private Random rnd;
private int D, numParticles, epochs;
private List<double[]> rang;
private bool minmax;
private byte[] resolution;
public PSO(int D, int numParticles, int epochs, double target, List<double[]> rang,
bool minmax, byte[] resolution)
{
this.D = D;
this.numParticles = numParticles;
this.epochs = epochs;
this.rang = rang;
this.minmax = minmax;
this.resolution = resolution;
}
private class Particle
{
public double[] position;
public double error;
public double[] velocity;
public double[] bestPosition;
public double bestError;
public Particle(double[] pos, double err, double[] vel, double[] bestPos, double
bestErr)
{
this.position = new double[pos.Length];
```

```

pos.CopyTo(this.position, 0);
this.error = err;
this.velocity = new double[vel.Length];
vel.CopyTo(this.velocity, 0);
this.bestPosition = new double[bestPos.Length];
bestPos.CopyTo(this.bestPosition, 0);
this.bestError = bestErr;
}
}
public double[] SOLVER()
{
rnd = new Random();
Particle[] swarm = new Particle[numParticles];
double[] bestGlobalPosition = new double[D];
double bestGlobalError = double.MaxValue;
for (int i = 0; i < swarm.Length; ++i)
{
double[] randomPosition = new double[D];
for (int j = 0; j < randomPosition.Length; ++j)
{
randomPosition[j] = Math.Round(rnd.NextDouble() * (rang[j][1] - rang[j][0]) +
rang[j][0], resolution[j]);
}
double error = Calc_func_values(randomPosition);
double[] randomVelocity = new double[D];
for (int j = 0; j < randomVelocity.Length; ++j)
{
double lo = rang[j][0] * 0.1;
double hi = rang[j][1] * 0.1;
randomVelocity[j] = (hi - lo) * rnd.NextDouble() + lo;
}
swarm[i] = new Particle(randomPosition, error,
randomVelocity, randomPosition, error);
if (swarm[i].error < bestGlobalError)

```

```

{
bestGlobalError = swarm[i].error;
swarm[i].position.CopyTo(bestGlobalPosition, 0);
}
}
double w = 0.729; // inertia weight
double c1 = 1.49445; // cognitive weight
double c2 = 1.49445; // social weight
double r1, r2; // cognitive and social randomizations
double probDeath = 0.01;
int epoch = 0;
double[] newVelocity = new double[D];
double[] newPosition = new double[D];
double newError;
while (epoch < epochs)
{
for (int i = 0; i < swarm.Length; ++i)
{
Particle currP = swarm[i];
for (int j = 0; j < currP.velocity.Length; ++j)
{
r1 = rnd.NextDouble();
r2 = rnd.NextDouble();
newVelocity[j] = Math.Round((w * currP.velocity[j] +
(c1 * r1 * (currP.bestPosition[j] - currP.position[j])) +
(c2 * r2 * (bestGlobalPosition[j] - currP.position[j])), resolution[j]);
}
newVelocity.CopyTo(currP.velocity, 0);
for (int j = 0; j < currP.position.Length; ++j)
{
newPosition[j] = Math.Round(currP.position[j] + newVelocity[j], resolution[j]);
if (newPosition[j] < rang[j][0])
newPosition[j] = (int)rang[j][0];
else if (newPosition[j] > rang[j][1])

```

```

newPosition[j] = (int)rang[j][1];
}
newPosition.CopyTo(currP.position, 0);
newError = Calc_func_values(newPosition);
currP.error = newError;
if (newError != -1)
{
if (newError < currP.bestError)
{
newPosition.CopyTo(currP.bestPosition, 0);
currP.bestError = newError;
}
if (newError < bestGlobalError)
{
newPosition.CopyTo(bestGlobalPosition, 0);
bestGlobalError = newError;
}
double die = rnd.NextDouble();
if (die < probDeath)
{
for (int j = 0; j < currP.position.Length; ++j)
{
currP.position[j] = Math.Round(rnd.NextDouble() * (rang[j][1] - rang[j][0]) +
rang[j][0], resolution[j]);
}
currP.error = Calc_func_values(currP.position);
currP.position.CopyTo(currP.bestPosition, 0);
currP.bestError = currP.error;
if (currP.error < bestGlobalError)
{
bestGlobalError = currP.error;
currP.position.CopyTo(bestGlobalPosition, 0);
}
}
}
}

```

```

}
}
++epoch;
Console.WriteLine ("Iteration => " + epoch.ToString () + ", Cost => " +
bestGlobalError.ToString() + "{"+bestGlobalPosition[0]+",
"+bestGlobalPosition[1]+", "+bestGlobalPosition[2]+", "+bestGlobalPosition[3]+",
"+bestGlobalPosition[4]+", "+bestGlobalPosition[5]+"}");
}
double[] result = new double[D + 1];
bestGlobalPosition.CopyTo(result, 0);
result[D] = (minmax) ? -bestGlobalError : bestGlobalError;
return result;
}
private double Calc_func_values(double[] sol)
{
double[] tt = new double[D];
for (int i = 0; i < D; i++)
tt [i] = sol [i];
Maliyet mal = new Maliyet(tt, minmax);
return mal.cost();
}
}
}
}

```

Tavlama Benzetimi Algoritması

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Drawing;
namespace Polygon
{
class SA

```

```

{
private double temperature, epsilon;
private int iteration, D;
private List<double[]> rang;
List<PointF> TempPolygon;
private List<List<PointF>> Polygons;
private List<PointF> material;
private bool minmax;
private byte[] resolution;
private int dir, angle;
private int X_Eksenmin, X_Eksenmax, Y_Eksenmin, Y_Eksenmax;
Random rnd = new Random();
equal zero; problem is integer else fractional number</param>
public SA(int D, double temperature, int iteration, double epsilon, List<double[]>
rang, bool minmax, byte[] resolution)
{
this.D = D;
this.temperature = temperature;
this.epsilon = epsilon;
this.iteration = iteration;
this.rang = rang;
this.minmax = minmax;
this.resolution = resolution;
}
public SA(int D, double temperature, int iteration, double epsilon, List<double[]>
rang, bool minmax, byte[] resolution, List<PointF> TempPolygon,
List<List<PointF>> Polygons, List<PointF> material, int dir, int angle, int
X_Eksenmin, int X_Eksenmax, int Y_Eksenmin, int Y_Eksenmax)
{
this.D = D;
this.temperature = temperature;
this.epsilon = epsilon;
this.iteration = iteration;
this.rang = rang;

```

```

this.minmax = minmax;
this.resolution = resolution;
this.TempPolygon = TempPolygon;
this.Polygons = Polygons;
this.material = material;
this.dir = dir;
this.angle = angle;
this.X_Eksenmin = X_Eksenmin;
this.X_Eksenmax = X_Eksenmax;
this.Y_Eksenmin = Y_Eksenmin;
this.Y_Eksenmax = Y_Eksenmax;
}
public double[] SOLVER()
{
double[] param = new double[D + 1];
int i, j, k;
double T, mu, fx, f0, fx1, df;
double[] dx = new double[D];
double[] x = new double[D];
double[] x1 = new double[D];
for (i = 0; i < D; i++)
{
x[i] = Math.Round(rang[i][0] + (rang[i][1] - rang[i][0]) * rnd.NextDouble(),
resolution[i]);
}
fx = Calc_func_values(x);
f0 = fx;
for (i = 0; i < temperature; i++)
{
T = i / temperature;
mu = Math.Pow(10, T * 100);
for (j = 0; j < iteration; j++)
{
for (k = 0; k < D; k++)

```

```

{
    dx[k] = mu_inv(2 * rnd.NextDouble() - 1, mu) * (rang[k][1] - 1.0);
    x1[k] = Math.Round(x[k] + dx[k], resolution[k]);
    if (x1[k] < rang[k][0])
    x1[k] = rang[k][0];
    else if (x1[k] > rang[k][1])
    x1[k] = rang[k][1];
}
fx1 = Calc_func_values(x1);
df = fx1 - fx;
if (df < 0 || rnd.NextDouble() < Math.Exp(-T * df / (Math.Abs(fx) + (2.2204 *
Math.Pow(10, -16)))) / epsilon))
{
    for (k = 0; k < D; k++)
    {
        x[k] = x1[k];
    }
    fx = fx1;
}
if (fx1 < f0)
{
    for (k = 0; k < D; k++)
    {
        param[k] = x1[k];
    }
    param[D] = fx1;
}
}
}
return param;
}
private double mu_inv(double p, double mu)
{
    return ((Math.Pow(1.0 + mu, Math.Abs(p)) - 1.0) / mu) * Math.Sign(p);
}

```

```
}  
private double Calc_func_values(double[] sol)  
{  
Maliyet mal = new Maliyet(new double[] { sol[0], sol[1], sol[2] }, minmax,  
TempPolygon, Polygons, material, dir, angle, X_Eksenmin, X_Eksenmax,  
Y_Eksenmin, Y_Eksenmax);  
return mal.cost();  
/*if (!minmax)  
return top;  
else  
return -top;*/  
}  
}  
}
```