Nükleer Astrofizikteki Anahtar Reaksiyon ve Çekirdek Yapılarının Teorik Olarak İncelenmesi

Program Kodu: 1002

Proje No: 117R015

Proje Yürütücüsü:

Doç. Dr. Asım SOYLU

Bursiyer:

Fahrettin KOYUNCU

TEMMUZ 2018

NİĞDE

ÖNSÖZ

Nükleer reaksiyonlar yıldızların motorları gibidir. Bu nedenle elementler arasındaki nükleer reaksiyonların mekanizmalarını anlamak, yıldızların yaşam süreçlerini ve ne tür çekirdeklerin sentezlendiğinin bilgisini elde etmek için gereklidir. Nükleer fizik, reaksiyon mekanizmalarının açıklanmasında, astrofizik ise elementlerin sentezlendiği fiziksel ortamın şartlarının belirlenmesinde bize yol gösterir. İşte bu noktada nükleer astrofizik, fizik biliminin stratejik bir kolu haline gelmiştir. Evrende birçok mekanizma nükleer astrofizik için bir laboratuvar olabilir. Bu sistemler arasında, ağır kütleli yıldızlarda meydana gelen elementlerin sentezinin incelenmesi yıllardır süre gelen mühim bir çalışma sahası olmuştur. Karbon, oksijen ve silikon yanma aşamaları ağır kütleli yıldızların yaşam süreçleri için önem arz etmektedir. Bu proje kapsamında farklı metodlar ile $^{12}C+^{12}C$, $^{12}C+^{16}O$, $^{16}O+^{16}O$ ve $\alpha+^{40}Ca$, $\alpha+^{36}Ar$, $\alpha+^{32}S$ ve $\alpha+^{28}Si$ reaksiyonları incelenmiştir, ayrıca ^{32}S çekirdeğinin α-bozunumu üzerine de çalışmalarda bulunulmuştur.

Ayrıca elektron perdeleme etkisi ve çekirdeklerin deformasyon durumlarının etkisi, nükleer astrofizikte oldukça ilgi çeken yukarıda sıralanan reaksiyonlar için çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalar ile ağır yıldızlarda anahtar rol oynayan birçok tepkime ve çekirdek incelenmiştir. Her bir reaksiyonun özel şartlar altında incelenmesi ve incelenen reaksiyonların çokluğu bakımından yapılan çalışmanın yıldızların işleyiş mekanizmasını açıklamada öncül bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

TÜBİTAK'ın 117R015 kodu ile desteklediği bu proje ile aşağıdaki listede verilen akademik çalışmalar gerçekleştirilmiştir:

Yayınlanan SCI Makaleler

1. Koyuncu F. and Soylu A. "Screening Effects on $^{12}C+^{12}C$ Fusion Reaction" Chinese Physics C, Vol. 42, No. 5, 054106, 2018.

2. Koyuncu F and Soylu A., "Investigations of Sub-Coulomb Barrier Fusion Reaction of $\alpha+^{40}Ca$ in Different Models", International Journal of Modern Physics E Vol. 26 No. 12, 1750086, 2017.

Bildiri ve Teze Dönüştürülen Çalışmalar

3. Koyuncu F., Soylu A., 2017." Investigation of $^{12}C+^{16}O$ Fusion Reaction With Screening Effects",International Conference on Nuclear Structure Properties", Karabük, 20-22 Eylül 2017, özet kitabında basıldı.

4. Danışman Asım Soylu, Fahrettin Koyuncu, 2018."Ağır Yıldızların Karbon, Oksijen ve Silikon Yanma Fazlarındaki Nükleer Reaksiyonların Teorik Modeller İle İncelenmesi", Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı, Haziran 2018, Doktora Tez çalışması, tamamlandı.

“Nükleer Astrofizikteki Anahtar Reaksiyon ve Çekirdek Yapılarının Teorik Olarak İncelenmesi” başlıklı proje Doç. Dr. Asım SOYLU koordinatörlüğünde 2017-2018 yılları arasında, 12 ay süre ile Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi bünyesinde yürütülmüş ve 117R015 kodu ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Projenin yürütülmesinde hem idari hem de mali olarak verdikleri destekten dolayı **TÜBİTAK**’a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i

İÇİNDEKİLER iii

ŞEKİLLER iv

TABLOLAR v

ÖZET vi

ABSTRACT vii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 2

3. GEREÇ ve YÖNTEM 4

3.1 Kümelenme Modeli 4

3.2 Füzyon Tesir Kesiti 5

3.2.1 WKB yöntemi ile füzyon tesir kesitlerinin, bozunum genişliklerinin ve yarılanma süresi hesabı 5

3.2.2 Çiftlenmiş kanallar formalizmi ile tesir kesitlerinin elde edilmesi 7

3.2.3 Hauser-Feshbach teoremi ile tesir kesitlerinin elde edilmesi 7

3.3 Astrofiziksel S-Faktör ve Reaksiyon Hız Hesabı 8

3.4 Hesaplamalarda Kullanılan Nükleer Potansiyeller 8

3.5 Elektron Perdeleme Etkisi, MGECSC Potansiyeli ve Zayıf Perdeleme Şartı 11

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 13

4.1 $\alpha + {}^{40}Ca$ Reaksiyonu İçin Elde Edilen Sonuçlar 13

4.2 $\alpha + {}^{36}Ar$, $\alpha + {}^{32}S$ ve $\alpha + {}^{28}Si$ Reaksiyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar 16

4.3 ${}^{12}C+{}^{12}C$, ${}^{12}C+{}^{16}O$ ve ${}^{16}O+{}^{16}O$ Reaksiyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar 18

4.4 ${}^{32}S$ Çekirdeğinin Alfa Bozunum Genişliklerinin Hesaplanması 24

5. SONUÇLAR 27

KAYNAKLAR 30

ŞEKİLLER

Şekil 3.1 Ikeda diyagramı 4

Şekil 4.1 α +^{40}Ca için elde edilmiş füzyon tesir kesitleri 13

Şekil 4.2 α +^{40}Ca için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri Reaclib ve Rauscher vd. 2000 ile karşılaştırmaları 15

Şekil 4.3 ^{24}Mg çekirdeğinin normalize rezonant durum enerjileri, hesaplamalarda DFC potansiyel kullanılmıştır 19

Şekil 4.4 Coulomb bariyerinin MGECSC potansiyelinin farklı kullanımları ile perdelenmesi..20

Şekil 4.5 Proximity 77 ve DFC potansiyelleri için Saf Coulomb potansiyeli ve "b=c=0" modelinin ^{12}C+^{12}C deneysel verileri ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır ..21

Şekil 4.6 MGECSC potansiyelinin farklı durumlarının ^{12}C+^{12}C deneysel veriler ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır.....22

Şekil 4.7. MGECSC potansiyelinin farklı durumlarının ^{12}C+^{12}C deneysel veriler ile karşılaştırılması, hesaplamalarda CCFULL kodu kullanılmıştır 22

Şekil 4.8 MGECSC potansiyeli kullanılarak elde edilmiş perdeleme durumlarının ^{12}C+^{16}O reaksiyonu deney verileri ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır ..23

Şekil 4.9 Cosh ve Hybrid potansiyelleri ile elde edilmiş S-faktör sonuçlarının ^{16}O+^{16}O reaksiyonu deney verileri ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır ..23

TABLOLAR

Tablo 4.1 α +^{40}Ca için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri ile Reaclib ve Rauscher vd. (2000) ile karşılaştırmaları 14

Tablo 4.2 α +^{28}Si için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri ile Reaclib ve Rauscher vd. (2000) ile karşılaştırmaları, 0 ve 90 oryantasyon açısını temsil etmektedir. 16

Tablo 4.3 α +^{32}S için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri ile Reaclib ve Rauscher vd. (2000) ile karşılaştırmaları, 0 ve 90 oryantasyon açısını temsil etmektedir 17

Tablo 4.4 α +^{36}Ar için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri ile Reaclib ve Rauscher vd. (2000) ile karşılaştırmaları, 0 ve 90 oryantasyon açısını temsil etmektedir 17

Tablo 4.5 Hesaplamalarda kullanılan çekirdekler için nükleer madde yoğunlukları ve rms değerleri 19

Tablo 4.6 Elektron perdeleme etkisini araştırmak üzere kullanılan modeller 20

Tablo 4.7 WKB metodu ile hesaplanan ^{32}S çekirdeğinin alfa bozunum genişlikleri 24

ÖZET

Nükleer fizik, reaksiyon mekanizmalarının açıklanmasında, astrofizik ise elementlerin sentezlendiği fiziksel ortamın şartlarının belirlenmesinde bize yol gösterir. İşte bu noktada nükleer astrofizik, fizik biliminin stratejik bir kolu haline gelmiştir. Ağır kütleli yıldızlarda meydana gelen A≤60 elementlerin sentezinin incelenmesi yıllardır süre gelen mühim bir çalışma sahası olmuştur. Karbon, oksijen ve silikon yanma aşamaları ağır kütleli yıldızların yaşam süreçleri için önem arz etmektedir.

Bu projede, karbon ve oksijen yanma aşamalarındaki $^{12}C+^{12}C$, $^{12}C+^{16}O$, $^{16}O+^{16}O$ füzyon reaksiyonları ve silikon yanma aşamasındaki $\alpha+^{40}Ca$, $\alpha+^{36}Ar$, $\alpha+^{32}S$ ve $\alpha+^{28}Si$ reaksiyonları incelenmiş, ayrıca ^{32}S çekirdeğinin α-bozunumu üzerine çalışmalarda bulunulmuştur.

Bu çalışmaların yapılabilmesi için literatürde bilinen bazı metotlar kullanılmıştır. Bahsi geçen reaksiyonların gözlenirlerini elde etmede WKB (Wentzel- Kramers-Brilloouin), Çiftlenmiş Kanallar formalizmi ve İstatistiksel hesaplamalardan yararlanılmıştır. Ayrıca, $^{12}C+^{12}C$ ve $^{12}C+^{16}O$ füzyon reaksiyonları üzerinde elektron perdeleme etkisini araştırmak için MGECSC (More General Exponential Cosine Screened Coulomb) potansiyeli kullanılmıştır. Bariyer altı enerjilerde $\alpha+^{40}Ca$, $\alpha+^{36}Ar$, $\alpha+^{32}S$ ve $\alpha+^{28}Si$ reaksiyonlarının reaksiyon hız tahminleri için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Deformasyon etkilerini araştırmak maksadı ile ^{36}Ar, ^{32}S ve ^{28}Si deformasyon durumları hesaplara dâhil edilmiş ve reaksiyon gözlenirleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Son olarak da ^{32}S çekirdeğinin α-bozunumu üzerine çalışmalarda bulunulmuştur.

Yapılan bu çalışma ile ağır yıldızlarda anahtar rol oynayan birçok tepkime ve çekirdek incelenmiştir. Uluslararası alanda kaliteli bilimsel dergilerde yayın yapılarak Türkiye'ye bilimsel alanda saygınlık sağlanmıştır. Ekibimiz 1 proje yürütücüsü ve 1 doktora öğrencisinden oluşmaktadır. Projenin 12 ay içinde tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yıldızlar, Nükleosentez, Reaksiyon hızı, Füzyon reaksiyonları, MGECSC Potansiyeli, Astrofiziksel S-faktör.

ABSTRACT

Nuclear physics leads us to explain the reaction mechanisms, and astrophysics guides us in determining the conditions of the physical environment in which the elements are synthesized. At this point, nuclear astrophysics has become a strategic branch of physics. The study of the synthesis of A≤60 elements, which occur in the massive stars, has been an important field of study for many years. Carbon, oxygen and silicon combustion phases are important for the life processes of heavy mass stars.

In this project, fusion reactions of $^{12}C + ^{12}C$, $^{12}C + ^{16}O$, $^{16}O + ^{16}O$ in Carbon and Oxygen burning phases and reactions of $\alpha + ^{40}Ca$, $\alpha + ^{36}Ar$, $\alpha + ^{32}S$ and $\alpha + ^{28}Si$ in Silicon burning phase have been investigated and also α-decay of ^{32}S nucleus have been researched.

Some of the methods known in the literature have been used for these studies. WKB (Wentzel-Kramers-Brilloouin), Coupled Channels formalism and statistical calculations were used to obtain the observations of the mentioned reactions. In addition, to investigate the electron screening effect on $^{12}C+^{12}C$ ve $^{12}C+^{16}O$ fusion reactions MGECSC (More General Exponential Cosine Screened Coulomb) potential have been used. The calculations for reaction rate estimations of $\alpha + ^{40}Ca$, $\alpha + ^{36}Ar$, $\alpha + ^{32}S$ and $\alpha + ^{28}Si$ reactions at sub-barrier energies have been performed.

In order to investigate the deformation effects, ^{36}Ar, ^{32}S and ^{28}Si deformation cases have been included in the calculations and the influence of these on the reaction observations have been investigated. Finally, studies have been made on the α-decay of the ^{32}S core.

This study examines many reactions and nuclei that play a key role in heavy stars. Making quality publications in international scientific journals, scientific respectability of Turkey has been upgraded. Our team consists of 1 project manager and 1 doctoral student. The project was completed within 12 months.

Keywords: Stars, Nucleosynthesis, Reaction rate, Fusion reactions, MGECSC Potential, Astrophysical S-factor.

1.GİRİŞ

Ağır yıldızlarda ($M>11M_{\odot}$; $M_{\odot}$ Güneşin kütlesi) gerçekleşen füzyon reaksiyonları, uzun yıllardır nükleer astrofiziğin araştırma konusu olmuştur. İleri yanma fazları olarak adlandırılan karbon oksijen ve silikon yanma aşamalarında gerçekleşen reaksiyonlar yıldızın yaşam süresi ve ölümü üzerinde önemli etkilere sahiptir. Yıldızların enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar; nükleer fizikte önemli bir yer tutan α–bozunumunun kuantum tünelleme olayı ile açıklanmasından sonra hız kazanmıştır (Gamow, 1928; Condon ve Gourney, 1929). Yıldızlardaki parçacıkların enerjileri düşünüldüğünde vuku bulan reaksiyonların Coulomb bariyeri altında düşük enerjilerde gerçekleştiği görülür. Bu olgu ise α–bozunum mekanizmasının tersi olarak düşünülür. Dolayısıyla kuantum tünelleme etkisi yıldızlardaki enerji üretim mekanizmalarına uygulanmış ve füzyon reaksiyonlarının düşük enerjilerde nasıl gerçekleştiği incelenmiştir (Atkinson ve Houtermans, 1929).

Böylece yıldızlarda gerçekleşen pp-zinciri ve CNO döngüleri üzerine yapılan çalışmalar ile nükleer astrofizikle ilgili çalışmalar hızlanmış oldu (Bethe ve Critchfield, 1938; Weizsäcker, 1938; Bethe, 1939). $M>11M_{\odot}$ kütleli bir yıldızda yanma aşamaları hafif bir yıldıza göre farklılıklar gösterir. Hidrojen ve helyum yanma aşamalarının yanı sıra ağır bir yıldızda karbon, neon, oksijen ve silikon yanma aşamaları da gerçekleşir. Bu projede karbon, oksijen yanma aşamalarında gerçekleştiği düşünülen $^{12}C+^{12}C$, $^{12}C+^{16}O$, $^{16}O+^{16}O$ füzyon reaksiyonları ve silikon yanma aşamasındaki ve $\alpha+^{40}Ca$, $\alpha+^{36}Ar$, $\alpha+^{32}S$ ve $\alpha+^{28}Si$ reaksiyonları incelenmiş, ayrıca ^{32}S çekirdeğinin α-bozunumu üzerine çalışmalarda bulunulmuştur.
Bununla birlikte füzyon reaksiyonlarının gerçekleştiği ortam şartları ve çekirdek yapıları da göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlamda yukarıda bahsi geçen ve bu projede kapsamında incelenmiş olan $^{12}C+^{12}C$ ve $^{12}C+^{16}O$ reaksiyonları üzerindeki elektron perdeleme etkisi araştırılmıştır. Bununla birlikte , $\alpha+^{36}Ar$, $\alpha+^{32}S$ ve $\alpha+^{28}Si$ reaksiyonları için α parçacığı ile etkileşime giren çekirdeklerin deformasyon durumları hesaplamalara dâhil edilmiş ve reaksiyon gözlenirleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu proje kapsamında incelenmiş reaksiyonların çeşitli olması reaksiyon gözlenirlerinin elde edilmesinde kullanılacak metodlarda da çeşitliliğe neden olmuştur. Böylece bahsi geçen reaksiyonları incelemek maksadı ile yarı-klasik WKB yaklaşımından, çiftlenmiş kanallar formalizminden ve istatistiksel hesaplamalardan yararlanılmıştır. Nükleer etkileşmeleri tanımlamak maksadı ile mikroskobik potansiyellerde yararlanıldığı gibi fenomenolojik potansiyellerden de istifade edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bilindiği üzere yıldızlarda meydana gelen termonükleer reaksiyonlar üzerine yapılan çalışmaların sayısı oldukça çoktur. Fred Hoyle yıldızlardaki nükleosentez teorisi ile ilgili çalışmalarda bulunmuştur ve üçlü alfa sürecini literatüre kazandırmıştır (Hoyle, 1953, 1954). Hoyle yıldızlardaki sıcaklığa bağlı nükleer reaksiyonların ^{56}Fe için pikler oluşturduğunu ve bunların gözlemlere uygun olduğunu göstermiştir. Diğer bir çalışmasında ise Hoyle (1954) karbondan nikele elementlerin ağır yıldızlarda nasıl sentezlendiğini ortaya koymuştur. Bu güne değin etkisini hala sürdüren diğer çalışma ise Burbidge vd. (1957) tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışma ile o zamana kadar bilinen nükleer fizik, yıldızların değişimi, elementlerin bolluk analizlerindeki parçalar halindeki teorik bilgiyi birleştirerek nükleer astrofiziğin temellerini oluşturan bir çalışma ortaya çıkarmışlardır (Burbidge vd., 1957). Burbidge vd. (1957) yaptıkları çalışmada bir yıldızdaki yanma aşamalarını Hidrojen yanması, Helyum yanması, alfa-süreci, e-süreci, s-süreci, r-süreci, p-süreci gibi başlıklar altında toplamışlardır. Yıldızlarda silikondan demir grubu elementlere ulaşan süreçte, silikon çekirdeklerinin yüksek enerjili gamalarla olan etkileşimi önemli bir mekanizma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bodansky vd. (1968a) (photodisintegration) fotoparçalanma ile açığa çıkan alfa grubu elementlerin ve bunların diğer ağır elementlerle yaptığı füzyon tepkimelerinden oluşan yarı-denge durumu olduğunu öne sürmüşlerdir (Bodansky vd., 1968, Arnett, 1996). Yakın geçmişte ise nükleer fiziğin astrofiziksel uygulaması olarak genellikle çalışılan füzyon tepkimeleri ^{12}C+^{12}C, ^{12}C+^{16}O, ^{16}O+^{16}O ve ^{12}C+α üzerine devam etmektedir (Kunz vd., 2002; Jiang vd., 2007; Esbensen, 2008; Kocak vd., 2010; Azni vd., 2015). Son yıllarda, Azni vd. (2015) çalışmalarında başta ^{12}C+^{12}C, ^{16}O+^{16}O,^{24}Mg+^{24}Mg, ^{28}Si+^{28}Si olmak üzere birçok reaksiyon için DFC (α-α double-folding cluster) potansiyeli ve farklı potansiyeller kullanılarak astrofiziksel S-faktör ve tesir kesiti hesabı yapmışlardır (Azni vd., 2015). Daha öncede buna benzer bir çalışma olarak Koçak vd. (2010) ^{16}O+^{16}O füzyonu için DFC (α-α double-folding cluster) potansiyeli kullanarak elastik saçılma analizi ve S-faktör hesabı yapmışlardır (Kocak vd., 2010). Kubono vd. (2013) kümelenme modelinin yıldızlardaki çekirdek sentezi ve yıldızların değişimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Kubono vd., 2013).

Literatürde alfa bozunum gözlenebilirlerini açıklamak için kullanılan birçok çalışma bulunmaktadır. Çekirdeklerin alfa bozunumu hesaplamalarında nükleer potansiyelin belirlenmesinde kullanılan fenomonolojik ve mikroskobik yaklaşımlar vardır. Fenomonolojik yaklaşımda potansiyelin şekli kare kuyu, Cosh fonksiyonu, Woods-Saxon vs. şeklinde seçilerek alfa bozunma yarı ömrünü en iyi açıklayan potansiyel parametreleri belirlenebilir. Mikroskobik yaklaşımda ise çekirdeklerin madde yoğunluk dağılımları kullanılarak çift katlı (double folding) potansiyel yöntemiyle nükleer potansiyel belirlenerek deneysel gözlenebilirler

(yarı ömür vs.) hesaplanabilir. Literatürdeki fenomonolojik ve mikroskobik yaklaşımlarla ilgili birçok çalışma vardır (Buck vd., 1991, 1993, 1995; Xu ve Ren, 2005). Bu çalışmalara ek olarak ^{16}O,^{20}Ne ve ^{44}Ti çekirdekleri alfa bozunum gözlenebilirleri TÜBİTAK 113F225 nolu projede deformasyon etkisi de göz önünde bulundurularak tarafımızca gerçekleştirilmiştir (Soylu vd., 2016). Bir önceki projemizde alfa-alfa kümelenme modeli potansiyeli elde edilmiş ve bu potansiyel çekirdeklerin gözlenebilirlerini elde etmede kullanılmıştır. Ayrıca 113F225 kodlu projede deneysel yapılan çalışmalara ön hesaplamalarda yapılmıştır.

Bozunma reaksiyonlarındaki gibi füzyon reaksiyonlarının teorik hesapları yapılırken göz önünde bulundurulabilecek etkenlerden birisi de reaksiyona giren çekirdeklerin deformasyon durumlarıdır (Denisov, 2006; Denisov ve Pilipenko, 2007a, 2007b, 2008, 2009, 2010). Denisov (2006) yaptığı çalışmada başta α+^{52}Fe, α+^{80}Sr olmak üzere alfa yakalama reaksiyonları için tesir kesiti hesaplarını yapmıştır (Denisov, 2006). Denisov ve Pilipenko (2010) yaptıkları çalışmada ^{12}C+^{12}C füzyonunu her iki çekirdeğinde deforme durumlarını ele alarak incelemiş ve sonuçların S-faktör üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Bir diğer çalışmalarında, alfa kız çekirdek arasındaki etkileşimi tanımlayan potansiyeli kullanarak alfa bozunma ve yakalama reaksiyonlarını incelemişlerdir (Denisov vd., 2015).

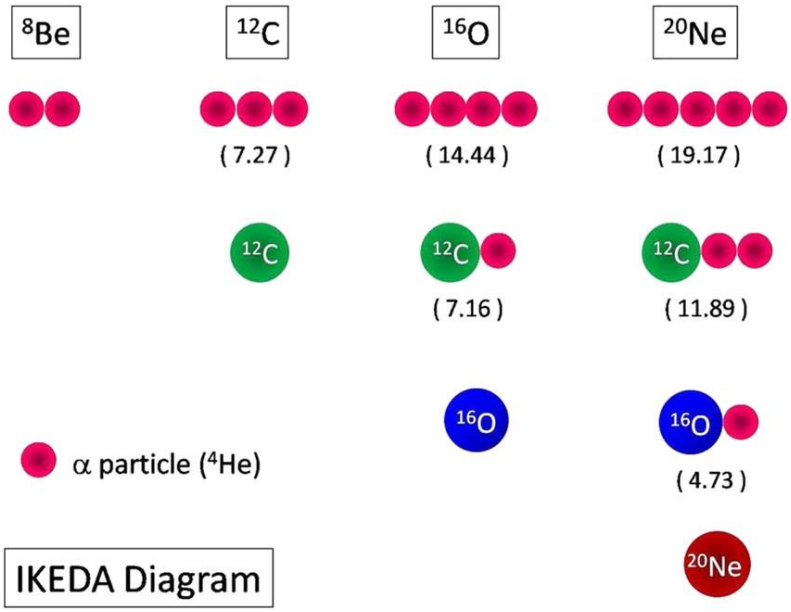
Yukarıda bilgisini verdiğimiz çekirdekler için tesir kesiti hesabı yapılırken genel kanı çekirdeklerin tamamen iyonize olduğu durumudur. Fakat bir diğer etki ise füzyona giren çekirdeklerin elektronlar tarafından perdelenmesi durumudur. Salpeter (1954) plazma içinde düşük enerjilerde yüklü parçacıkların füzyon reaksiyonlarının elektronlarının perdelenme etkisinden dolayı artış gösterdiğini dolayısıyla iki çekirdek arasındaki Coulomb etkileşimine ek terimler getirilmesi gerektiğini çalışmasında vermiştir. Elektron perdeleme etkisinin nükleer reaksiyonların tesir kesitlerini ve reaksiyon hızlarını artırıcı etkisi halen süre gelen popüler çalışma konularındandır (Potekhin ve Chabrier, 2012; Tumino vd., 2014; Wan vd., 2015). Bunlara ek olarak klasik perdeleme potansiyellerinden bazı ek terimler ile ayrılan MGECSC (more general exponential cosine screened Coulomb) potansiyeli 2012 yılında literatüre kazandırılmıştır. Bu potansiyel ile plazma içindeki hidrojen atomunun enerjileri iki farklı çalışma ile araştırılmıştır (Soylu, 2012; Bahar ve Soylu, 2014). Aynı zamanda çiftlenmiş kanalların füzyon reaksiyonları üzerindeki etkisi farklı yazarlar tarafından çalışılmıştır (Dasso vd., 1985, Beckerman, 1993). Cardenas vd. (2004) yaptıkları çalışmada, ^{4,6}He+^{238}U ve ^{4,6}He+^{239}Bi füzyon tesir kesitlerinin belirlenmesinde çiftlenmiş kanalların etkisini araştırmışlardır. Bunlara ilaveten ^{16}O+^{208}Pb ve^{12}C, ^{16}O, ^{28}Si ve ^{35}Cl atomlarının ^{92}Zr ile füzyon tesir kesitleri için sonuçlar türetilmiştir (Morton vd., 1999, Newton vd., 2001). Bu kısım hakkında daha detaylı bilgi proje öneri formunda bulunabilir.

3.GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Kümelenme Modeli

Atom çekirdeğinin keşfedilmesi ile beraber yapısının anlaşılması üzerine yapılan çalışmalar günümüze değin sürmektedir. Çekirdek içerisindeki nükleonların birbiri ile olan etkileşimlerini tanımlamak oldukça güç olup halen matematiksel bir ifadeye sahip değildir. Böylece çekirdeğin yapısını anlamak ve betimlemek maksadı ile kabuk, sıvı damlası ve kollektif model gibi farklı modeller öne sürülmüştür. Bu modellerden bir tanesi de kümelenme modelidir. Kümelenme modeli, çekirdek içerisinde nükleonların bazı alt gruplar oluşturduğu fikrini temel alan bir yaklaşımdır.

Hafif çift-çift çekirdeklerin, çift-çift olmayanlara göre yüksek bir bağlanma enerjisine sahip olması kümelenme modelini destekler niteliktedir. Böylelikle ilk olarak alfa kümelenme modeli ortaya atılmıştır (Wheeler, 1937). Ikeda vd. (1968) hafif çekirdeklerin özel kümelenme konfigürasyonlarını ve bozunum eşik enerjilerini veren bir çalışma yayınlamışlardır. Alfa parçacıkların çekirdeklerin yüzeyinde bulunabileceği önerisi ile beraber kümelenme modelinin daha özel bir hali olan ikili kümelenme modeli ortaya çıkmış oldu (Brink, 1966). Alfa kümelenme modeline göre geliştirilen İkeda Diyagramı Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1. İkeda diyagramı

İkili kümelenme modeline göre kor etrafında dolaşan bir alfa parçacığı düşünülerek sistem iki cisim problemine indirgenmiş oldu. Böylece iki cisim arasındaki etkileşimler tanımlanarak Schrödinger denkleminin çözülmesi ile sistemin incelenmesi sağlanmış oldu. Bu durumda tek bilinmeyen, alfa ve kor çekirdek arasındaki nükleer etkileşme potansiyel terimidir ve çalışmalar bunun ortaya çıkarılması yönünde yoğunlaşmıştır. Hafif çekirdeklere uygulanan bu

çalışmaların alanı genişletilerek ağır çekirdekler içinde alfa ve egzotik salınım bant yapıları, elektromanyetik bozulmalar gibi gözlenirler hesaplanabilir hale gelmiştir (Buck vd., 1994; Ohkubo vd., 1995; Buck vd., 1996; Buck vd., 1998).

3.2 Füzyon Tesir Kesiti

Bu proje kapsamında reaksiyon gözlenirlerini elde etmek maksadı ile yarı-klasik WKB yönteminden, çiftlenmiş kanallar formalizminden ve Hauser Feshbach teoreminden faydalanılmıştır. Bu teori ve yaklaşımlar ile tesir kesitlerinin elde edilmesinde kullanılan formalizmlerden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

3.2.1 WKB yöntemi ile füzyon tesir kesitlerin, bozunum genişliklerinin ve yarılanma süresi hesabı

WKB yöntemi radyoaktif bozunma ve füzyon reaksiyonları gibi nükleer reaksiyonların incelenmesinde kullanılan yarı-klasik bir yaklaşımdır (Haider vd., 1993; Denisov ve Pilipenko, 2010; Koyuncu ve Soylu; 2018). Tepkimeye giren çekirdekler arasındaki etkin potansiyel

$$V_{etk}(r) = V_L(r) + V_N(r) + V_C(r) \,, \tag{3.1}$$

ile verilir burada V_L merkezcil potansiyel, V_N nükleer potansiyel ve V_c Coulomb potansiyelidir.

Merkezcil potansiyel L=0 durumunda belirsizlikten kurtulmak için $L(L+1) \to (L+1/2)^2$ şeklinde Langer modifikasyonu yapılır (Langer, 1937) ve

$$V_L(r) = \frac{(L+1/2)^2 \hbar^2}{2\mu r^2} \,, \tag{3.2}$$

şeklinde yazılır. Burada L açısal momentum ve μ indirgenmiş kütledir. Coulomb potansiyeli ise

$$\begin{aligned} V_C(r) &= 1,43\left(\frac{Z_1 Z_2}{2R_C}\right)\left(3 - \frac{r^2}{R_C^2}\right), r \le R_C \\ &= 1,43\left(\frac{Z_1 Z_2}{2}\right), \qquad r > R_C \end{aligned} \tag{3.3}$$

şeklinde tanımlanır. Burada Z_i ve R_C sırasıyla çekirdeğinin yükü ve Coulomb yarıçapıdır. Coulomb yarıçapı $R_C = 1,2(A_\alpha^{1/3} + A_d^{1/3})$ fm. şeklinde alınır. Coulomb ve merkezcil potansiyelin tanımlanması ile etkin potansiyel içerisinde bilinmeyen tek terim olarak nükleer potansiyel kalır.

Nükleer kısmı tanımlamak için kullandığımız fenemenolojik ve mikroskobik potansiyeller müstakil bir başlık olarak bu bölümün ilerleyen kısmında verilmiştir.

Etkin potansiyel tanımlandıktan sonra geçiş katsayısı

$$T_l(E) = 4\left(2\theta + \frac{1}{2\theta}\right)^{-2} \tag{3.4}$$

Ile verilir, burada $\theta = \exp(\int_{r_1}^{r_2} K(r))$, $K^2(r) = \frac{2\mu}{\hbar^2}(V_{etk} - E) > 0$ şeklindedir. r_1 ve r_2 dönüm noktaları ve $k^2 = \frac{2\mu E}{\hbar^2}$ ve E kütle merkezi enerjisi olmak üzere tesir kesiti,

$$\sigma_f(E) = \frac{\pi}{k^2}\sum_l (2l+1)T_l(E), \tag{3.5}$$

şeklinde elde edilir (Haider, 1993).

Aynı zamanda WKB yöntemi kullanılarak bozunum genişlikleri ve yarılanma süreleri de elde edilebilir. WKB yaklaşımı kullanılarak bariyer delinebilirlik olasılığı,

$$P = \mathrm{e}^{-2\int_{r_2}^{r_3} k(r)dr}, \tag{3.6}$$

şeklinde verilir.

$$k(r) = \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2}(V_{etk} - (Q_\alpha - E_L^*))}, \tag{3.7}$$

olmak üzere burada Q_α taban durum geçişinin bozunma enerjisi ve E_L^* ise L. durumun uyarılma enerjisidir. r_2 ve r_3 klasik dönüm noktalarıdır ve $V_{etk} = Q_\alpha - E_L^*$ eşitliğinden elde edilir. Bariyerin delinebilirlik olasılığı P, merkezcil, nükleer ve Coulomb potansiyellerinin toplamıyla elde edilen bariyerin yüksekliğine, genişliğine ve uygun alfa bozunum enerjilerine ve Q_α değerlerine son derece duyarlıdır (Soylu vd., 2016).

Alfa-kız çekirdek potansiyelinin derinliği Bohr-Sommerfeld kuantumlanma şartıyla belirlenebilir. Bohr-Sommerfeld kuantumlanma koşulu şu şekilde verilir:

$$\int_{r_1}^{r_2}\sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2}(V_{etk} - (Q_\alpha - E_L^*))}dr = (2n+1)\frac{\pi}{2} = (G - L + 1)\frac{\pi}{2}, \tag{3.8}$$

şeklinde verilir. Burada G, global kuantum sayısıdır ve incelenen çekirdeğe göre belirlenir. Taban durumunda veya uyarılmış durumda bulunan ana çekirdek, alfa bozunumu sırasında kız çekirdeğin aynı taban veya uyarılmış durumuna bozunursa açısal momentum kuantum sayısı sıfır olur. Alfa bozunum genişliği ve yarı ömür,

$$\Gamma = \mathrm{P}_\alpha F\frac{\hbar^2}{4\mu}P, \tag{3.9}$$

şeklinde verilir (Ibrahim vd., 2010; Xu ve Ren, 2005, 2006).

3.2.2 Çiftlenmiş kanallar formalizmi ile tesir kesitlerinin elde edilmesi

Tesir kesitlerini hesaplamada kullanılan yöntemlerden biriside çiftlenmiş kanallar metodudur (Thompson vd., 1985; Balantekin ve Takigawa; 1998; Hagino vd., 1999). Etkileşen iki parçacık arasındaki çiftlenmenin etkileri

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2\mu}\frac{d^2}{dr^2}+\frac{L(L+1)\hbar^2}{2\mu r^2}+V_N(r)+\frac{Z_1Z_2e^2}{r}+\in_n-E_{cm}\right]\Psi_n(r)+\sum_m V_{nm}(r)\Psi_m(r)=0\,, \tag{3.10}$$

gibi tanımlanabilir ve Denklem 3.10 ikinici dereceden bir diferansiyel denklemdir. r, μ, E_{cm}, $\in_n$ ve V_{mn} sırasıyla radyal koordinat, indirgenmiş kütle, kütle merkezi cinsinden enerji, n. kanalın uyarılma enerjisi ve çiftlenmiş hamiltonyenin matris elemanlarıdır. Sonuçları etkilemeksizin Denklem 3.10 daki açısal momentum L toplam açısal momentum J ile değiştirilebilir.

n. kanal için dalga sayısı

$$k_n(r)=\sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2}\left[E-\in_n-\frac{J(J+1)}{2\mu r^2}-V_N(r)-\frac{Z_1Z_2e^2}{r}-V_{nn}(r)\right]}\,, \tag{3.11}$$

ile verilir. Sınır şartlarının koşulları belirlendikten sonra muhtemel tüm durumların toplamı ile geçirgenlik katsayısı

$$P_J(E)=\sum_n\frac{k_n(r_{\min})}{k_0}\left|T_n\right|^2, \tag{3.12}$$

şeklinde yazılır ve burada k_0 giriş kanalı dalga sayısıdır. Geçirgenlik katsayısı tesir kesitleri arasında

$$\sigma_f(E)=\sum_J\sigma_J(E)=\frac{\pi}{k_0^2}\sum_J(2J+1)P_J(E)\,, \tag{3.13}$$

gibi bir bağlantı mevcuttur (Hagino vd., 1999; Singh ve Kaharab., 2013).

3.2.3 Hauser-Feshbach teorisi ile tesir kesitlerinin elde edilmesi

Hauser-Feshbach teorisi Breit-Wigner formülizasyonun özel bir durumudur ve Breit-Wigner rezonansları üzerinden enerji ortalamalarını temel alır ve en genel hal ile tesir kesitleri

$$\langle\sigma_{er}(\alpha,\alpha')\rangle=\frac{\pi}{k_\alpha^2}\sum_{J\pi}\frac{2J+1}{(2I_1+1)(2I_2+1)}\frac{\left[\sum_{sl}\hat{T}_l(\alpha)\right]\left[\sum_{s'l'}\hat{T}_{l'}(\alpha')\right]}{\sum_{\alpha''}\sum_{s''l''}\hat{T}_{l''}(\alpha'')}, \tag{3.14}$$

şeklinde verilir (Iliadis, 2015). Burada I_1 ve I_2 hedef ve merminin spinleri $\hat{T}_l(\alpha)$ ise geçiş katsayısını temsil etmektedir. Hauser –Feshbach istatistiksel hesaplamala yöntemini kullanan paket kodlardan bir taneside Talysdir (Talys, 2018).

3.3 Astrofiziksel S-Faktör ve Reaksiyon Hız Hesabı

Tesir kesitlerinin elde edilmesi ile beraber reaksiyon hız hesabına geçiş yapılabilir. Daha önce yine düşük enerjilerde tahmini daha kolay olan bir başka eşitliği tanımlamak uygun olur. Bu eşitlik astrofiziksel s-faktör olarak bilinir ve tesir kesiti ile

$$S(E) = \sigma(E) E \exp\left(\sqrt{\frac{E_g}{E}}\right), \tag{3.15}$$

şeklinde bağlantılıdır. Burada $E_g = 0.9864\ MeV\ (\frac{\mu}{m_p}(Z_1 Z_2)^2)$ ile verilir ve Gamow enerjisi olarak adlandırılır. μ ve m_p sırasıyla indirgenmiş kütle ve protonun kütlesidir. Böylece reaksiyon hızı hem tesir kesiti hem de astrofiziksel S-faktör eşitlikleri üzerinden iki farklı şekilde şu şekilde yazılabilir

$$N_A\langle\sigma v\rangle = (\frac{8}{\pi\mu})^{1/2} \frac{N_A}{(kT)^{3/2}} \int_0^\infty \sigma(E) E\, \mathrm{e}^{-E/kT} dE\,,$$

$$N_A\langle\sigma v\rangle = (\frac{8}{\pi\mu})^{1/2} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \int_0^\infty e^{-2\pi\eta} S(E)\, \mathrm{e}^{-E/kT} dE\,, \tag{3.16}$$

burada $e^{-2\pi\eta}$ terim Denklem 3.15 ile verilen üstel ifade ile aynıdır, T kelvin cinsinden sıcaklık, k Boltzmann sabiti, N_A Avogadro sayısıdır ve bu eşitlikler cm^3mol/s birimindedir. Reaksiyon hızı için daha özelleştirilmiş iki ifade ise

$$N_A\langle\sigma v\rangle = \frac{3.7318x10^{10}}{(T_9)^{3/2}} \int_0^\infty E\sigma(E)\, \mathrm{e}^{-11.605/T_9} dE\,,$$

$$N_A\langle\sigma v\rangle = 7.83x10^9 \left(\frac{Z_1 Z_2}{\mu T_9^2}\right)^{1/3} S(E_0) \exp\left(-4.2487(Z_1^2 Z_2^2 \mu / T_9)\right)^{1/3}, \tag{3.17}$$

Burada $S(E_0)$, E_0 enerjsisindeki astrofiziksel S-faktördür ve $E_0 = 0.1220(Z_1^2 Z_2^2 \mu T_9^2)^{1/3}$ şeklindedir (Bertulani, 2013, Iliadis, 2015).

3.4 Hesaplamalarda Nükleer Kullanılan Potansiyeller

Astrofiziksel S-faktör ve reaksiyon hız hesaplarının geliştirilebilmesi ancak tesir kesitlerinin elde edilmesine bağlıdır. Bunun içinde Denklem 3.1 ile verilen etkin potansiyelin nükleer kısmının belirlenmesi gerekir. Bu çalışma esnasında kullanılmış mikroskobik ve fenomenolojik potansiyelleri şu şekilde sıralayabiliriz.

Woods-Saxon potansiyeli: Nükleer etkileşimleri tanımlamada cok sık kullanılan bir potansiyeldir ve

$$V_N(r) = -\frac{V_0}{1+\exp\left[\dfrac{r-R}{a}\right]}, \tag{3.18}$$

İle verilir ve V_0 (MeV) potansiyel derinliği, R (fm) nükleer yarıçap ve a (fm) difüzyon parametresidir (Woods-Saxon, 1954).

Modifiye Woods-Saxon potansiyeli: Woods-Saxon tipinde (Denklem 3.18) olan ve potansiyel parametleri

$$\begin{aligned} R_0 &= R_p + R_t - 1.37 \\ R_i &= 1.27 A_i^{1/3} \\ V_0 &= -44.16[1-0.40(I_p + I_t)](A_p^{1/3}A_t^{1/3} / A_p^{1/3} + A_t^{1/3}) \\ I_i &= (N_i - Z_i)/A_i \end{aligned} \tag{3.19}$$

İle verilen bir diğer fenomenolojik potansiyeldir (Saidi vd., 2015).

Cosh potansiyel: Hesaplamalarda kullanılan bir diğer potansiyel

$$V_N(r) = -V_0 \frac{1+\cosh(R/a)}{\cosh(r/a)+\cosh(R/a)}, \tag{3.20}$$

cosh potansiyelidir ve V_0 (MeV) potansiyel derinliği, R (fm) nükleer yarıçap ve a (fm) difüzyon parametresidir (Buck vd., 1994).

Hybrid potansiyel: Bu potansiyel

$$V_N(r) = -V_0 \left(\frac{x}{1+\exp\left(\dfrac{r-R}{a}\right)} + \frac{1-x}{\left(1+\exp\left(\dfrac{r-R}{a}\right)\right)^3} \right), \tag{3.21}$$

ile verilir ve V_0 (MeV) potansiyel derinliği, R (fm) nükleer yarıçap ve a (fm) difüzyon parametresidir, x, deneysel verileri en iyi açıklayacak şekilde seçilebilir (Buck vd., 1996).

Proximity potansiyel: Bu potansiyelin orjinal hali prozimity 77 olarak bilinir ve nükleer etkileşme şu şekilde

$$V_N(\zeta) = 4\pi\gamma b \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}\phi(\zeta), \tag{3.22}$$

ile verilir burada b = 1 fm yüzey genişliği, $\zeta = (r - C_1 - C_2)/b$ C_i ise yarı-orta-yoğunluk terimi evrensel fonksiyon

$$\begin{aligned} \phi(\zeta) &= -\frac{1}{2}(\zeta - \zeta_0)^2 - 0.0852(\zeta - \zeta_0)^3 \qquad \zeta \le \zeta_1 \\ &= -3.437\exp[-\zeta/0.75] \qquad \zeta > \zeta_1 \end{aligned} \tag{3.23}$$

$\zeta_0 = 2.54$, $\zeta_1 = 1.2511$ ve $\gamma = 0.9517(1 - 1.7826[(N-Z)/A]^2)$ MeV/fm^2 yüzey enerji katsayısı,

N, Z ve A bileşik sistemin nötron, proton ve kütle numarasıdır. C_i ise R ye

$$R_i = 1.28A_i^{1/3} - 0.76 + 0.8A_i^{-1/3} \tag{3.24}$$

şeklinde bağlıdır (Blocki, 1977).

AW95 potansiyeli: Bu potansiyele göre çekirdekler arası nükleer etkileşim

$$V_N(r) = -A\bar{R}\Phi(s) \tag{3.25}$$

ve $A = 16\pi\gamma a$, $\bar{R} = R_1R_2 / R_1 + R_2$, $\Phi(s = r - R_1 - R_2)$ ile verilir ve diğer parametreler ise

$$\gamma = 0.95\left(1 - 1.8\left(\frac{N_p - Z_p}{A_p}\right)\left(\frac{N_t - Z_t}{A_t}\right)\right)$$
$$\Phi(s) = [1 + \exp\left(\frac{s - 0.29}{0.63}\right)]^{-1} \tag{3.26}$$

İle verilir. N_i, Z_i ve A_i reaksiyona giren çekirdeklerin nötron, proton ve kütle numarasıdır (Dutt ve Puri, 2010).

α-nucleus potansiyel: α ile ağır bir çekirdek arasındaki etkileşimi tanımlamak için oluşturulmuştur, nükleer etkileşim

$$V_N(r, Q, \theta) = \frac{V(A, Z, Q)}{1 + \exp(\frac{r - r_m(\theta)}{d})}\ , \tag{3.27}$$

İle verilir ve burada

$$V(A, Z, Q) = -[30.275 - 0.45838Z / A^{1/3} + 58.270I - 0.24244Q]$$
$$r_m = 1.5268 + R$$
$$R = R_p(1 - 3.0909 / R_p^2) + 0.12430t \tag{3.28}$$
$$t = I - 0.4A / (A + 200)$$
$$d = 0.49290$$

şeklinde olup, $I = (A - 2Z) / A$ dır ve A, Z, R ve Q alfa ile etkileşime giren parçacığın kütle numarası, proton sayısı, yarıçap ve reaksiyonun Q değeridir (Denisov ve ikezoe, 2005).

Alfa kümelenme çift katlı potansiyel (DFC): Çekirdeklerin alfa dağılımları üzerinden birbirleri arasındaki etkileşimi tanımlayan potansiyeldir ve

$$V_{ACDF}(R) = \iint \rho_{M\alpha}(r_1)\rho_{H\alpha}(r_2)v_{\alpha\alpha}(r_{12})dr_1dr_2\ ,\ \vec{r_{12}} = \vec{R} - \vec{r_1} + \vec{r_2}\ , \tag{3.29}$$

ile verilir, ve burada $\rho_{M\alpha}$ ve $\rho_{H\alpha}$ sırasıyla mermi ve hedef çekirdeğin α -yoğunluklarıdır. Buradaki α-yoğunluk fonksiyonları,

$$\rho_M(r) = \int \rho_{M\alpha}(r')\rho_\alpha(|\vec{r} - \vec{r}'|)dr'$$

$$\rho_H(r) = \int \rho_{H\alpha}(r')\rho_\alpha(|\vec{r} - \vec{r}'|)dr' \quad , \tag{3.30}$$

denklemleri ile elde edilir. Burada ρ_α ise,

$$\rho_\alpha(r) = \rho_0 \exp(-\beta r^2) \quad , \tag{3.31}$$

şeklinde (Gausyen) olarak kullanılır.

Çift Katlı (DF) potansiyel: Her bir çekirdeğin nükleon dağılımlarını göz önüne alarak hesap yapan bu potansiyel için matematiksel ifade

$$U_F(R) = \int dr_1 \int dr_2 \rho_1(r)\rho_2(r)v(r_{12} = \left|\vec{R} + \vec{r}_2 - \vec{r}_1\right|) \quad , \tag{3.32}$$

burada ρ_i $i.$ çekirdeğin çekirdeğin temel seviyesinde nükleonların kütle merkezinin dağılımıdır. İntegrasyon iki yoğunluk üzerinden olduğu için double folding (çift katlı) olarak isimlendirilmiştir (Cook, 1982).

3.5 Elektron Perdeleme Etkisi, MGECSC Potansiyeli ve Zayıf Perdeleme Şartı

Hem astrofiziksel çalışmalarda hemde laboratuvar çalışmalarında önemli bir yeri olan elektron perdeleme etkisi tamamen iyonize olmuş çekirdeklerin birbirleri arasındaki etkileşimin elektronların perdeleme etkisi ile değişmesini içeren bir çalışmadır. Elektronlar tarafından sağlanan perdeleme

$$U_{tot}(r_{12}) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + U(r_{12}) \, , \tag{3.32}$$

gibi ifade edilir ve burada Z_i reaksiyona giren çekirdeklerin yükleri e elektronun yüküdür. $U_{tot}(r_{12})$ ise Coulomb potansiyeline getirilen ek terimdir. Literatürdeki perdeleme çalışmalarının büyük kısmında bu potansiyel Debye plazmasını temsil eden e^{-r/λ_D} ile

$$U_{tot}(r_{12}) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} e^{-r/\lambda_D} \quad , \tag{3.33}$$

şeklinde verilir. Bu çalışmada kullanılan potansiyel Denklem 3.33 ile verilen perdeleme potansiyelinden bazı ek terimler ile ayrılmaktadır ve

$$V_c(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}(1 + br)e^{-r/\lambda_D} \cos(cr/\lambda_D) \quad , \tag{3.34}$$

şeklinde verilir. Bu potansiyel MGECSC potansiyel olarak bilinir (Soylu 2012). Denklem 3.34'de

$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_o k_b T}{e^2 n_e}}$ şeklinde olup debye uzunluğu olarak adlandırılır, ε_o plazmanın dielektrik sabiti, k_b Boltzmann sabiti, T sıcaklık, e elektronun yükü, n_e elektron yoğunluğudur. MGECSC potansiyeli ile Debye ve kuantum plazma durumları tanımlanabilmektedir (Soylu, 2012).

Perdeleme etkisi sıcaklık yoğunluk gibi etkenlere bağlı olup zayıf, orta ve güçlü olmak üzere üç bölge ile temsil edilir. Bu bölgelerin belirlenmesi Coulomb enerjisinin (Ec) termal enerjiye (kT) oranlanması ile mümkün olur. E_c<kT zayıf, E_c>kT kuvvetli ve E_c~kT ise orta düzey perdeleme olarak bilinir. Debye uzunluğunun belirlenmesi için zayıf perdeleme şartından faydalanılmıştır. Zayıf perdeleme şartı

$$T >> 10^5 \rho^{1/3} \zeta^2 \tag{3.35}$$

gereğince sağlanır. Burada T kelvin cinsinden sıcaklık, ρ g/cm^3 cinsinden yoğunluktur ve

$$\zeta \equiv \sqrt{\sum \frac{(Z_i^2 + Z_i \theta_e) X_i}{A_i}} \quad , \tag{3.36}$$

ile verilir burada Z proton A kütle numarası, X kütle kesiridir ve Debye yarıçapı (uzunluğu)

$$R_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi e^2 \rho N_A \zeta^2}} = 2.812x10^{-7} \rho^{-1/2} T_9^{1/2} \zeta^{-1} \quad cm \quad , \tag{3.37}$$

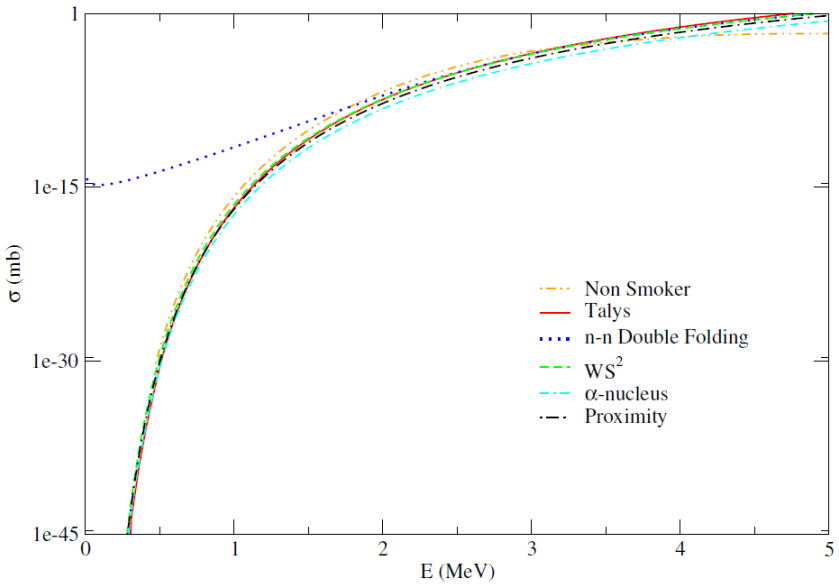
şeklindendir (Iliadis, 2015)**.** Metaryal ve Yöntemler hakkında daha detaylı bilgi proje öneri formunun yöntem kısmında bulunabilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Proje süresi içerisinde, proje iş çizelgesinde belirtilen görevler yerine getirilmiştir. Bu çalışma ile geliştirilen ve literatürde hali hazırda var olan bilgisayar yazılımları kullanılarak, ilgili reaksiyonların projede bahsi geçen metodlarla incelenmesi ile elde edilen sonuçlar aşağıda aşamalı olarak sıralanmıştır.

4.1 α +^{40}Ca Reaksiyonu İçin Elde Edilen Sonuçlar

Silikon yanma aşamasında gerçekleştiği düşünülen ve Coulomb bariyerinin altındaki enerjilerde hesaplamaları yapılan α +^{40}Ca reaksiyonu için n-n DF potansiyeli WKB yöntemi ile beraber kullanılmış ve tesir kesitleri elde edilmiştir. Aynı zamanda WKB yöntemi ile tesir kesitlerinin elde edilmesinde α-nucleus, proximity 77 potansiyeli ve n-n DF potansiyeline fit edilmiş WS2 tarzında bir potansiyelde kullanılmıştır. Yarı klasik WKB yaklaşımının yanı sıra Non-Smoker ve Talys paket kodlarından da faydalanılarak istatistiksel hesaplamalar ile de karşılaştırma yapılmıştır (Non-Smoker, 2018; Talys, 2018). Tesir kesitleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.1'de görülebilir.



Şekil 4.1. α +^{40}Ca için farklı modellerle elde edilmiş füzyon tesir kesitleri.

Şekil 4.1' e göre yaklaşık 2 MeV civarındaki enerjinin altında; n-n DF potansiyeli α+^{40}Ca için füzyon tesir kesitlerini açıklamakta başarısız olmuştur. Bunun üzerine n-n DF potansiyeli WS2 potansiyeline fit edilerek WS2 potansiyelinin parametreleri şu şekilde elde edilmiştir. Potansiyel derinliği V_0=270 MeV, difüzyon parametresi a=1,26 fm ve r_0=0,87 fm. WKB yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların n-n DF potansiyeli hariç olmak üzere Talys ve Non-Smoker

sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilir. Tesir kesitlerinin elde edilmesinin ardından nükleer astrofizik ile alakalı olan bu reaksiyonlar için reaksiyon hız hesabına geçilmiştir. Reaksiyon hız tahminlerinin türetilmesinde Denklem 3.17' den faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçları kıyaslamak maksadı ile Reaclib veri tabanından ve Rauscher vd. (2000) makalesinden faydalanılmıştır (Reaclib, 2018). Reaclib veri tabanı beş binden fazla çekirdek için sekiz bini aşkın reaksiyon hız verisi bulunduran bir veri tabanıdır ve bu veri tabanında T_9 Kelvin olmak üzere reaksiyon hızları

$$R.H. = \exp(a_0 + a_1 / T_9^{1/3} + a_2 / T_9^{1/3} + a_3 T_9^{1/3} + a_4 T_9^{1/3} + a_5 T_9^{1/3} + a_6 \log(T_9)) \quad (4.1)$$

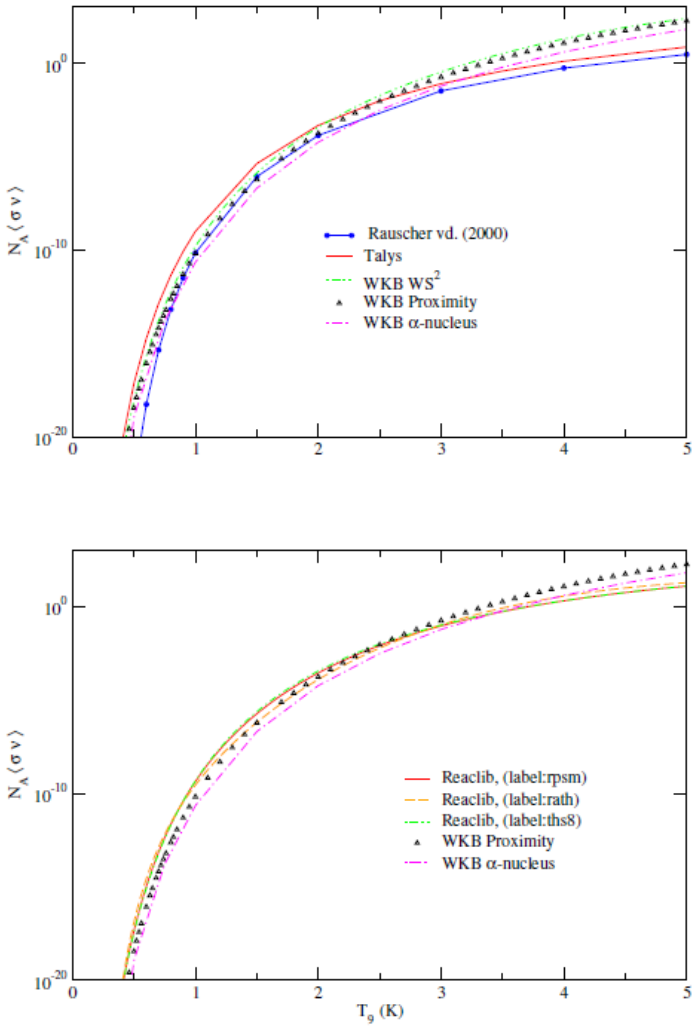
şeklinde 7 parametre üzerinden tanımlıdır ve her bir reaksiyon için farklı katsayılar veri tabanında mevcuttur. Bunun yanı sıra farklı kaynaklar tarafından elde edilmiş Deneysel ve teorik reaksiyon hızları icin rh10, rath, ve rpsm tarzında tanım satırları bulunmaktadır (Reaclib, 2018). Rauscher vd. (2000) makalesinde ise 6 farklı reaksiyon için reaksiyon hızları mevcuttur ve Tablolarda bulunan $\langle \sigma\upsilon \rangle_{\exp}$ $\langle \sigma\upsilon \rangle_{emp}$ $\langle \sigma\upsilon \rangle_{HF}$ reaksiyon hız verileri Rauscher vd. (2000)'den alınmıştır. Reaksiyon hız verilerinin verildiği tüm tablolarda geçerli olmak üzere sıcaklıklar Giga Kelvin cinsinden reaksiyon hızları ise cm^3/mol.s cinsindendir. Ayrıca Talys kullanılarak elde edilen hız verilerinde kullanılan yöntemin detayı için bakınız (Koning vd., 2004; Talys, 2018). Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1' de ve Şekil 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.1. α+^{40}Ca için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri ile Reaclib ve Rauscher vd. (2000) karşılaştırmaları.

T (GK)	rpsm	rath	ths8	chw0	rh10
0.01	4.307E-257	2.754E-257	1.582E-129	9.123E-130	1.239E-93
0.10	2.203E-54	7.201E-73	2.268E-47	1.341E-47	5.866E-47
1.00	4.299E-10	2.753E-10	4.599E-10	2.653E-10	3.045E-10
2.00	0.0002730	0.0001216	0.0003485	0.0001927	0.0002018
3.00	0.0887070	0.1021512	0.0980919	0.0530006	0.0507701
4.00	1.976161	3.532832	1.999978	1.0774708	1.0188763
5.00	12.08865	18.50552	12.265189	6.724245	6.5713192

$\langle \sigma v \rangle_{exp}$	$\langle \sigma v \rangle_{emp}$	$\langle \sigma v \rangle_{HF}$	WS2	Prox 77	α-nuc.	Talys
—	—	—	2.275E-129	8.239E-130	2.717E-130	—
—	—	1.63E-47	9.098E-48	3.396E-48	1.122E-48	—
6.87E-11	6.97E-11	5.02E-10	1.545E-10	6.566E-11	2.209E-11	9.890E-10
0.000133	0.000137	0.000363	0.0003576	0.0001681	0.0000571	0.0004599
0.0319	0.0386	0.0837	0.329153	0.172001	0.05806	0.07747
0.529	0.747	1.640	19.2452	11.5406	3.83635	1.23388
2.850	4.490	10.80	238.751	177.045	63.1148	7.07380

Kıstaslarımıza en yakın sonucun Talys kodu ile elde edilen sonuçların olduğu açıktır. Aynı zamanda WKB yöntemi ile elde edilen sonuçlar gözden geçirildiğinde α-nucleus potansiyelinin diğer potansiyel türlerine nazaran daha olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Tüm elde edilen sonuçlar ve sonuçların detaylı yorumları SCI makale olarak literatüre kazandırılmıştır. Bu konudaki detaylı bilgi için ilgili makalede bulunabilir (Koyuncu ve Soylu; 2017).



Şekil 4.2. α +^{40}Ca için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri ile Reaclib ve Rauscher vd. 2000 karşılaştırmaları.

4.2 α +^{36}Ar, α +^{32}S ve α +^{28}Si Reaksiyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar

α +^{40}Ca reaksiyonu için yapılan çalışmalardan kazanılan tecrübe α +^{36}Ar, α +^{32}S ve α +^{28}Si reaksiyonlarına aktarılmış bu reaksiyonlar içinde benzer yöntemler kullanılarak reaksiyon hız tahminleri geliştirilmiştir. α +^{40}Ca reaksiyonundan farklı olarak WKB hesaplamalarına ^{36}Ar, ^{32}S ve ^{28}Si çekirdeklerinin deformasyon durumları da dâhil edilmiştir. Deformasyon hesaplamaları için WKB hesaplamalarında yarıçap ifadesi

$$R(\theta) = r_0 A_p^{1/3} + A_t^{1/3}(1+\beta_2 Y_{20}(\theta)), \quad (4.2)$$

ile yeniden düzenlenmiştir. A_i, β_2, Y_{lm} ve θ sırasıyla parçacıkların kütlesi, kuadrupol deformasyon parametresi, küresel harmoniklerdir ve oryantasyon açısıdır. Deformasyon parametleri Möller vd. (2012)'den alınmıştır ve ^{28}Si, ^{32}S ve ^{36}Ar için (quadrupole β_2, hexadecapole β_4 ve hexacontatetrapole β_6) deformasyon parametreleri sırasıyla: β_2= -0,363 β_4= 0,187 β_6= -0,022, β_2= -0,221 β_4= -0,095 β_6= -0,020 ve β_2= -0,255 β_4= -0,109 β_6= -0,002' dir.

α-nuclues potansiyeli ile α+^{40}Ca reaksiyon hız tahminlerinde görece iyi sonuçlar edilmişti ayrıca sığ potansiyeller kullanılarak elde edilen sonuçlarında uygun olmasından dolayı α +^{36}Ar, α +^{32}S ve α +^{28}Si için reaksiyon hız tahminlerinin elde edilmesinde görece sığ potansiyeller kullanılmıştır. α-nuclues potansiyelinin (sadece α +^{36}Ar reaksiyonu için) yanı sıra mWS potansiyeli ve parametreleri keyfi olarak seçilmiş WS2 tarzında bir potansiyelde hesaplamalara dahil edilmiştir. Keyfi seçilen WS2 potansiyelinin parametreleri çekirdeklere göre şu şekildedir α+^{28}Si için: V_0=42 MeV, a=0,71 fm r=0,2 fm; α+^{32}S için: V_0=40 MeV, a=0,70 fm r=0,80 fm; ve α+^{36}Ar için: V_0=45 MeV, a=0,80 fm r=0,85 fm' dir. Diğer yandan mWS potansiyelinin parametrelerinde oynama yapılmadan potansiyelin şekli WS den WS2 çevrilmiştir. Elde edilen sonuçları kıyaslamak maksadı ile Reaclib veri tabanından ve Rauscher vd. (2000) makalesinden faydalanılmıştır. Sonuçlar; Tablo 4.2, 4.3 ve 4.4' te verilmiştir.

Tablo 4.2. α +^{28}Si için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri Reaclib ve Rauscher vd. (2000) ile karşılaştırmaları, 0 ve 90 oryantasyon açısını temsil etmektedir

T	rpsm	rath	ths8	$<\sigma\nu>_{exp}$	$<\sigma\nu>_{emp}$	$<\sigma\nu>_{HF}$
0.01	5.627E-169	4.578E-169	4.196E-98	—	—	—
0.10	1.535E-34	2.770E-35	3.275E-34	—	1.42E-36	2.20E-34
1.00	1.251E-5	1.114E-5	1.201E-5	6.80E-6	6.97E-6	1.30E-5
2.00	0.109006	0.101977	0.144543	0.04	0.0423	0.0984
3.00	3.117634	3.279431	4.473732	1.34	1.45	3.04
4.00	17.75892	19.23407	21.68269	9.39	11.6	19.0
5.00	53.21872	55.37828	49.52550	31.5	46.5	59.7

WS2	$WS2^0$	$WS2^{90}$	MWS2	$MWS2^0$	$MWS2^{90}$	Talys
1.514E-101	8.607E-102	4.063E-101	1.360E-100	6.803E-101	4.414E-100	—
5.799E-38	3.295E-38	1.555E-37	5.207E-37	2.604E-37	1.690E-36	—
8.265E-9	4.713E-9	2.225E-8	7.447E-8	3.725E-8	2.417E-7	9.89E-10
0.001115	0.000633	0.002991	0.010013	0.005008	0.032498	0.000459
0.332682	0.18902	0.892376	2.98671	1.49403	9.69378	0.077477
11.9273	6.77676	31.9936	107.08	53.564	347.543	1.23388
150.82	85.6916	404.556	1354.02	677.313	4394.65	7.07380

Tablo 4.3. α +^{32}S için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri Reaclib ve Rauscher vd. (2000) ile karşılaştırmaları, 0 ve 90 oryantasyon açısını temsil etmektedir.

T	rpsm	rath	ths8	$< \sigma\nu >_{exp}$	$< \sigma\nu >_{emp}$	$< \sigma\nu >_{HF}$
0.01	9.688E-199	5.637E-199	2.019E-109	—	—	—
0.10	5.518E-40	3.018E-45	4.707E-39	—	5.78E-40	3.70E-39
1.00	2.512E-7	1.650E-7	2.456E-7	6.19E-9	1.81E-6	2.70E-7
2.00	0.009225	0.006464	0.011337	0.00232	0.0222	0.00964
3.00	0.482966	0.568973	0.665805	0.153	0.644	0.456
4.00	3.614439	5.056999	4.762265	1.23	4.02	3.42
5.00	12.28652	14.96335	14.17129	4.34	12.6	12.3

WS2	$WS2^0$	$WS2^{90}$	MWS2	$MWS2^0$	$MWS2^{90}$	Talys
2.734E-112	4.518E-112	1.323E-112	1.403E-111	2.556E-111	5.823E-112	—
2.351E-42	3.886E-42	1.138E-42	1.207E-41	2.198E-41	5.008E-42	—
2.984E-10	4.932E-10	1.444E-10	1.532E-9	2.790E-9	6.356E-10	5.095E-7
0.000134	0.000223	0.000065	0.000693	0.0001262	0.000287	0.013267
0.0726438	0.120033	0.035152	0.372969	0.679217	0.154702	0.527682
3.78113	6.24773	1.82969	19.4132	35.3535	8.05229	3.38252
62.3529	103.029	30.1725	320.134	582.998	132.787	10.2427

Tablo 4.4. α +^{36}Ar için elde edilmiş reaksiyon hız verileri verileri Reaclib ve Rauscher vd. (2000) ile karşılaştırmaları, 0 ve 90 oryantasyon açısını temsil etmektedir.

T	rpsm	rath	ths8	$< \sigma\nu >_{exp}$	$< \sigma\nu >_{emp}$	$< \sigma\nu >_{HF}$
0.01	1.565E-223	8.403E-224	1.965E-119	—	—	—
0.10	1.493E-44	1.527E-50	3.652E-43	—	2.46E-42	2.07E-43
1.00	5.122E-9	3.176E-9	4.717E-9	1.10E-25	2.11E-8	6.07E-9
2.00	0.000219	0.000146	0.000449	5.07E-11	0.000501	0.000195
3.00	0.015339	0.018471	0.037560	3.72E-6	0.0193	0.0139
4.00	0.193338	0.283032	0.359657	0.000977	0.231	0.203
5.00	1.228257	1.535168	1.450676	0.027	1.35	1.41

WS2	$WS2^0$	$WS2^{90}$	MWS2	$MWS2^0$	$MWS2^{90}$
1.703E-122	2.245E-123	2.348E-122	4.121E-122	3.381E-123	6.079E-122
1.777E-46	2.344E-47	2.451E-46	3.530E-46	3.530E-47	6.345E-46
1.504E-11	1.983E-12	2.074E-11	3.640E-11	2.987E-12	5.370E-11
0.000021	2.867E-6	0.000029	0.000052	4.318E-6	0.000077
0.020596	0.002715	0.028400	0.049841	0.0040896	0.073514
1.53216	0.20202	2.11271	3.70774	0.304228	5.46877
32.5839	4.29627	44.9302	78.8511	6.46989	116.302

α-nuc.	α-nuc.^{0}	α-nuc.^{90}	Talys
1.842E-121	2.682E-122	2.493E-121	—
1.923E-45	2.800E-46	2.603E-45	—
1.627E-10	2.369E-11	2.202E-10	1.106E-8
0.000235	0.000034	0.000318	0.000241
0.222803	0.032442	0.301562	0.012359
16.5743	2.41341	22.4332	0.127991
352.48	51.325	477.078	0.655250

4.3 $^{12}C+^{12}C$, $^{12}C+^{16}O$ ve $^{16}O+^{16}O$ Reaksiyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar

$^{12}C+^{12}C$, $^{12}C+^{16}O$ reaksiyonları ağır bir yıldızın karbon yanma fazının son aşamasında gerçekleşen reaksiyonlardandır. Özellikle $^{12}C+^{12}C$ füzyon reaksiyonu literatürde oldukça sık çalışılmaktadır. $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonu ise müstakil bir yanma aşaması olan oksijen yanma aşamasında öne çıkan nükleer füzyon reaksiyonudur. Bu reaksiyonların tesir kesitlerini ölçmek üzere yapılan bir çok deneysel çalışma literatürde mevcuttur (Patterson vd., 1969; Mazarakis ve Stephens, 1973; High ve Cujec, 1977; Erb vd., 1980; Kettner vd., 1980; Becker vd., 1981; Dasmahapatra vd., 1982; Satkowiak, 1982; Barron-Palos vd., 2006; Spillane vd., 2007; Strieder, 2010; Fang vd., 2013; Santiago-Gonzales vd.,2016, Jiang vd., 2018, Patterson vd., 1971; Cujec ve Barnes,1976; Christensen vd., 1977; Spinka ve Winkler, 1974; Hulke vd., 1980; Wu ve Barnes, 1984; Thomas vd., 1985, Kuronen vd., 1987).

Bu proje kapsamında, $^{12}C+^{12}C$ füzyon reaksiyonunun Coulomb bariyeri altındaki enerjilerde deneysel verilerde mevcut olan salınımların nedeni araştırılmış ve bu salınımları açıklamak maksadı ile elektron perdeleme etkisinden faydalanılmıştır. Öncelikle $^{12}C+^{12}C$; ^{24}Mg çekirdeğinin yapı ve reaksiyon gözlenirlerini açıklayacak en iyi potansiyeli bulmak amacı ile iki farklı potansiyelden faydalanılmıştır. Bunlar Proximity 77 ve DFC potansiyelleridir.

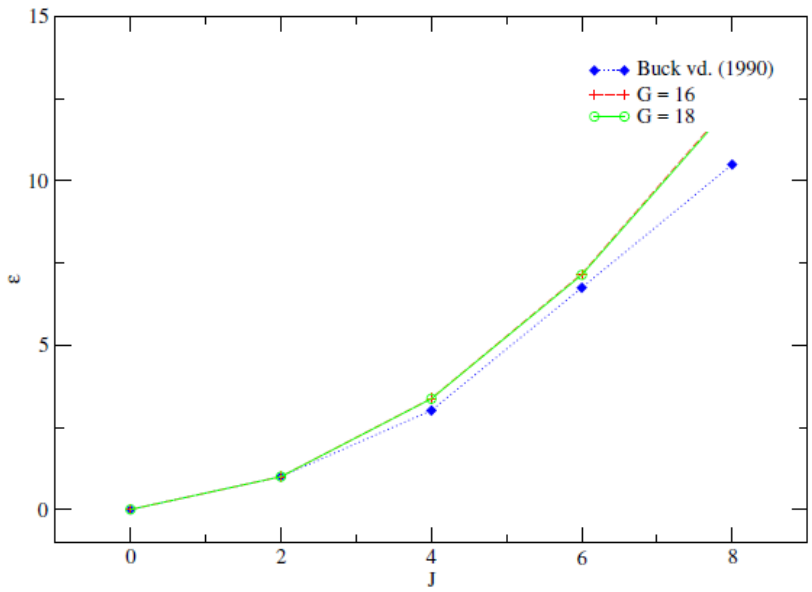
Tablo 4.5. Hesaplamalarda kullanılan çekirdekler için nükleer madde yoğunlukları ve rms değerleri.

Çekirdek	ρ_0 (fm^{-3})	ω (fm^{-2})	β (fm^{-2})	$\langle r^2\rangle^{1/2}$ (fm)
^{4}He	0.4229	0	0.7024	1.461
^{12}C	0.1644	0.4988	0.3741	2.407
^{16}O	0.1317	0.6457	0.3228	2.640

Her iki potansiyel ile ^{24}Mg çekirdeğinin kümelenme yapısı araştırılmıştır ve G=16, G=18 bantları için rezonant enerji durumları

$$\varepsilon = \frac{E(J^+) - E(0^+)}{E(2^+) - E(0^+)} \quad , \tag{4.3}$$

denklemi üzerinden hesaplanmıştır (Koçak vd., 2010). Elde edilen sonuçlar Buck vd. (1990) ile karşılaştırmalı sonuçları Şekil 4.3' de verilmiştir.

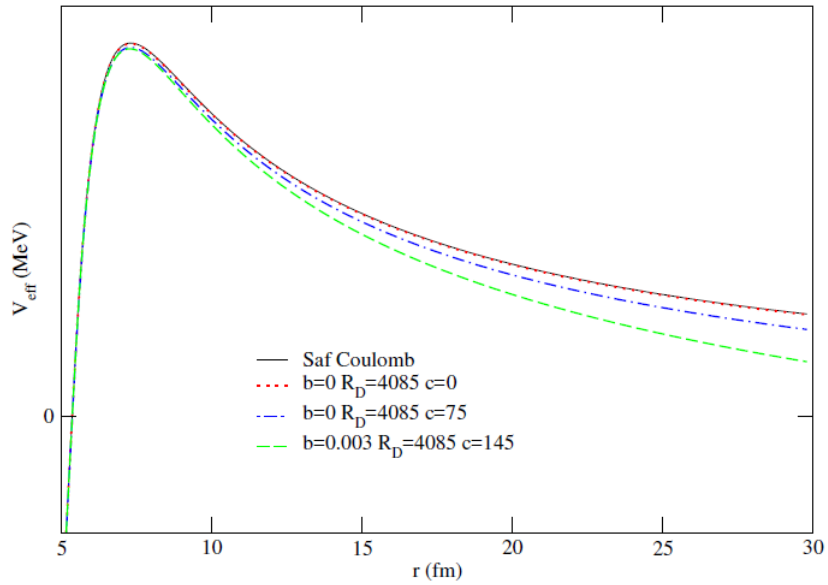


Şekil 4.3. ^{24}Mg çekirdeğinin normalize rezonant durum enerjileri, hesaplamalarda DFC potansiyel kullanılmıştır.

DFC potansiyel ile elde edilen yapı gözlenirleri Proximity 77 potansiyeli ile de tekrarlanmak istenmiştir fakat Proximity 77 ile olumlu sonuçlar elde edilememiştir, hesaplamalarda Gamow kodu kullanılmıştır (Vertse vd., 1982). Yapı gözlenirlerinin hesaplanmasının ardından ^{12}C+^{12}C reaksiyon gözlenirlerine geçilmiştir.

Reaksiyon gözlenirleri hesaplanırken elektron perdeleme etkisi de hesaplara dahil edilmiştir. Bunun için öncelikle Debye uzunluğu hesaplanmıştır. Debye uzunluğunun hesaplanması için karbon yanma aşamasındaki bir yıldızın hidrostatik yanma koşulları kullanılmıştır. T=0.9 GK,

ρ =10^5 g/cm^3 ve kütle kesirleri $X^0_{^{12}C}$ = 0.25, $X^0_{^{16}O}$ = 0.73, $X^0_{^{20}Ne}$ = 0.01 ve $X^0_{^{22}Ne}$ = 0.01 (Iliadis, 2015). Bu şartlar altında Denklem 3.35 ile verilen zayıf perdelenme şartı sağlanır. Debye uzunluğu 4085 fm olarak hesaplanır ve bu sonuçlardan düzeltme faktörü f_s=1.17784 olarak bulunur sonuç Iliadis (2015)'te verilen ile uyumludur (Iliadis (2015), fs ~1.2). Bizim amacımız düzeltme faktörünü hesaplamaktan ziyade deneysel verileri açıklamak maksadı ile elde edilen Debye uzunluğunu kullanmaktır. Böylece MGECSC potansiyelinin farklı formları kullanılarak perdeleme etksisi araştırılmıştır. Coloumb bariyerinin MGECSC potansiyel ile değişimi Şekil 4.4 'te verilmiştir. Hem $b \neq 0$ ve $c \neq 0$ için Coulomb bariyerindeki azalmanın maksimum olduğu görülemektedir. DFC ve Proximity 77 nükleer potansiyelleri ve MGECSC Coulomb potansiyeli kullanılarak elde oluşturulmuş farklı modellemeler Tablo 4.6'da verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken yarı-klasik WKB ve çiftlenmiş kanallar metodu CCfull kodu kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Coulomb bariyerinin MGECSC potansiyelinin farklı kullanımları ile perdelenmesi.

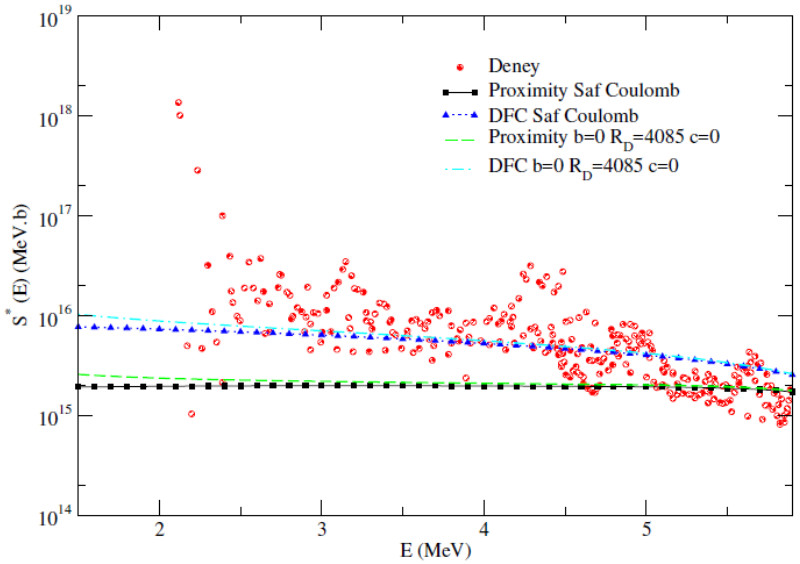
Tablo 4.6. Elektron perdeleme etkisini araştırmak üzere kullanılan modeller.

Potansiyel Türü	b	c	R_D	Metot
$Prox77$	0.00	0	4085	WKB
$Prox77$	0.00	75	4085	WKB
$Prox77$	0.003	145	4085	WKB
DFC	0.00	0	4085	WKB
DFC	0.00	45	4085	WKB
DFC	0.01	160	4085	WKB
DFC	0.00	0	4085	CC
DFC	0.00	45	4085	CC
DFC	0.01	160	4085	CC
DFC	0.002	95	4085	CC

Tesir kesitlerinin hesaplanmasından ziyade bariyer altı salınımların daha iyi gözlendiği astrofiziksel S-faktörlerin hesaplanmasına önem verilmiştir ve Denklem 3.15'ten farklı olmak üzere

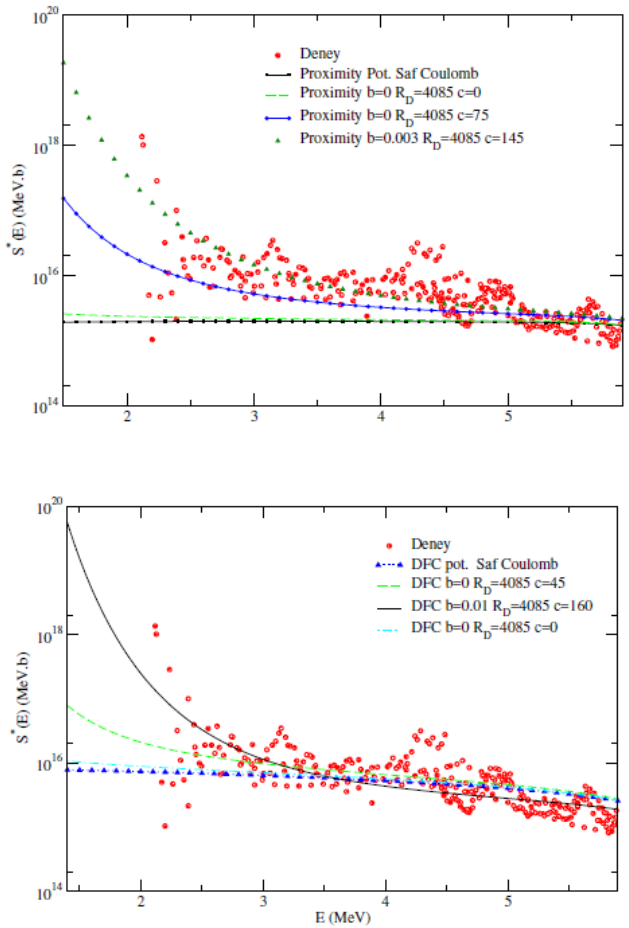
$$S^{*}(E) = \sigma_{f}(E) E \exp\left(\sqrt{\frac{E_{g}}{E}} + gE\right), \tag{4.4}$$

Denklemi kullanılmıştır. Bu eşitlik modifiye astrofiziksel S-faktördür ve $g = 0.46$ MeV^{-1} dir. Perdelemenin olmadığı ve "b=c=0, RD=4085" durumu için astrofiziksel S-faktör sonuçları elde edilmiştir, sonuçlar Şekil 4.5'de bulunabilir. b=c=0 ın perdeleme potansiyeli olarak seçilmesi S-faktör verisinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Şekil 4.4 incelendiğinde b=c=0 durumunun bariyeri çok fazla etkilemediği görülebilir, S-faktör verisindeki değişimde buna bağlı olarak azdır. Böylece Tablo 4.6 ile verilen MGECSC potansiyelinin farklı kullanımları hem Proximity 77 potansiyeli hem de DFC potansiyeli incelenmiştir (Koyuncu ve Soylu, 2018). b ve c parametrelerinin kullanılması ile perdeleme etkisi her iki nükleer potansiyel içinde daha etkin hale getirilmiştir. Bu parametrelerin kullanımı zayıf perdeleme şartını ortadan kaldırmaksınızın perdeleme imkânı tanımıştır ve sonuçları olumlu yönde etkilemiştir. Elde edilen sonuçlar Şekiller 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. $^{12}C+^{12}C$ reaksiyonu için elde edilen sonuçlar ve bunun detaylı yorumları Chinese Physics C dergisinde makale olarak yayınlanmıştır (Koyuncu ve Soylu, 2018). Bu dergi impact faktörü yüksek olan kaliteli bir SCI dergidir. Bu tarzda gerçekleştirilmiş olan MGECSC potansiyelinin ilk kez $^{12}C+^{12}C$ reaksiyonuna uygulandığı ilk çalışmadır. Bu anlamda ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacağı kanaatindeyiz.

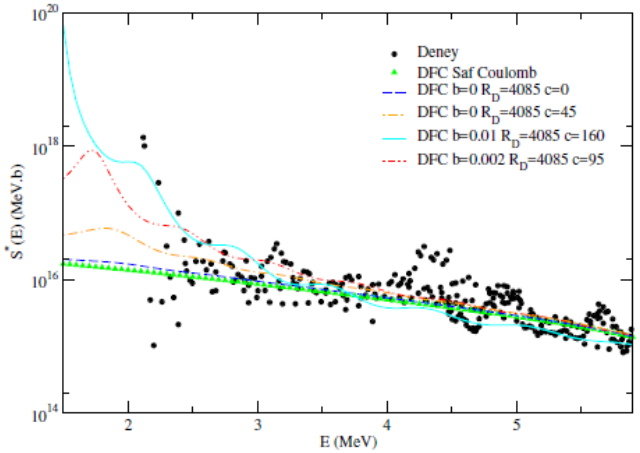


Şekil 4.5. Proximity 77 ve DFC potansiyelleri için Saf Coulomb potansiyeli ve "b=c=0" modelinin $^{12}C+^{12}C$ deneysel verileri ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır.

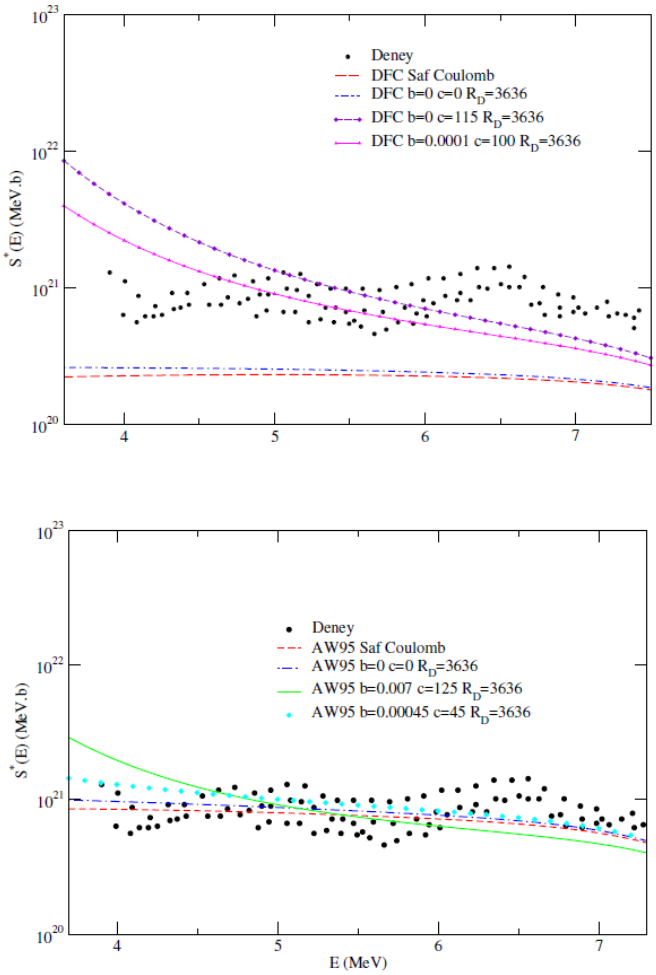
$^{12}C+^{12}C$ deneysel veriler için bakınız (Patterson vd., 1969; Mazarakis ve Stephens, 1973; High ve Cujec, 1977; Erb vd., 1980; Kettner vd., 1980; Becker vd., 1981; Dasmahapatra vd., 1982; Satkowiak, 1982; Barron-Palos vd., 2006; Spillane vd., 2007; Denisov ve Pilipenko, 2010). $^{12}C+^{12}C$ reaksiyonu için elde edilen olumlu sonuçların ardından benzer hesaplamalar $^{12}C+^{16}O$ içinde geliştirilmiş ve zayıf perdelenme şartı bu reaksiyon içinde tatbik edilmiştir. Sıcaklık ve yoğunluk değerleri sırasıyla 1.1 GK ve $1.5*10^5$ g/cm^3 şeklinde seçilmiştir ve kütle kesirleri $X^0_{^{12}C} = 0.150, X^0_{^{16}O} = 0.661, X^0_{^{20}Ne} = 0.143, X^0_{^{22}Ne} = 0.008, X^0_{^{23}Na} = 0.011$ ve $X^0_{^{24}Mg} = 0.007$ şeklinde seçilmiştir (Woosley vd., 2002; Arnett, 1996). Bu şartlar altında Denklem 3.35 0.0233025 olarak elde edilir ve bu 1.1 GK değerinden küçüktür yani zayıf perdelenme şartının sağlandığı kabuledilebilir. Debye uzunluğu ise 3636 olarak hesaplanır. Elde edilen debye uzunluğu ile $^{12}C+^{12}C$ reaksiyonuna benzer şekilde MGECSC potansiyeli kullanılarak perdeleme çalışmaları yapılmış ve Şekil 4.8' de verilmiştir. Bu kısımda elde edilen sonuçlar, Karabük' deki nükleer yapı konferansı' nda bildiri olarak sunulmuş ve özet bildiri kitabında yayınlanmıştır. İlgili çalışma projenin çıktısı olarak sisteme girilmiştir.



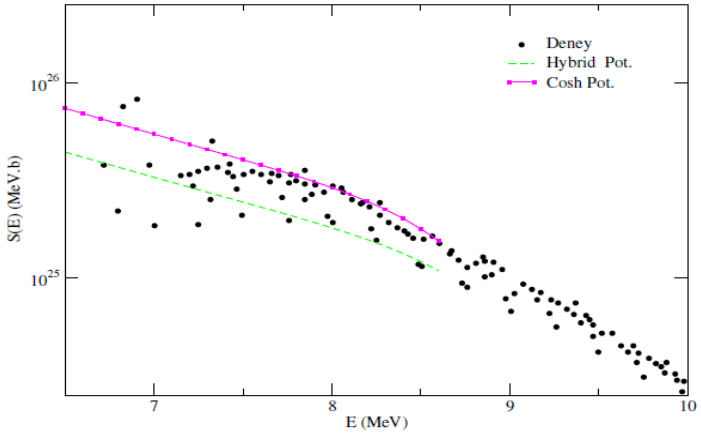
Şekil 4.6. MGECSC potansiyelinin farklı durumlarının $^{12}C+^{12}C$ deneysel veriler ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır.



Şekil 4.7. MGECSC potansiyelinin farklı durumlarının $^{12}C+^{12}C$ deneysel veriler ile karşılaştırılması, hesaplamalarda CCfull kodu kullanılmıştır.



Şekil 4.8. MGECSC potansiyeli kullanılarak elde edilmiş perdeleme durumlarının $^{12}C+^{16}O$ reaksiyonu deneysel verileri ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Cosh ve Hybrid potansiyelleri ile elde edilmiş S-faktör sonuçlarının $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonu deneysel verileri ile karşılaştırılması, hesaplamalarda WKB metodu kullanılmıştır

$^{12}C+^{12}C$ ve $^{12}C+^{16}O$ reaksiyonlarının incelenmesinin ardından $^{16}O+^{16}O$ füzyon reaksiyonu içinde elektron perdeleme çalışmaları tatbik edilmek istenmiş fakat müstakil bir yanma aşaması olan oksijen yanma aşamasında yoğunluk ve sıcaklık değerlerinin zayıf perdeleme şartının dışına çıkmasından dolayı elektron perdeleme çalışmaları bu reaksiyon için gerçekleştirilememiştir. Böylelikle $^{16}O+^{16}O$ reaksiyonu iki farklı nükleer potansiyel ile incelenmiş ve S-faktör verilerini en iyi açıklayacak nükleer potansiyel araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.9' da verilmiştir. Cosh potansiyeli için potansiyel parametreleri V_0=120 MeV, a=0.95 fm ve r_0=0.99 fm dir. Hybrid potansiyeli için bu değerler V_0=300 MeV, a=0.85 fm ve r_0=0.95 fm şeklindedir.

$^{12}C+^{16}O$ ve $^{16}O+^{16}O$ füzyon reaksiyonlarının deneysel verileri için bakınız (Patterson vd., 1971; Cujec ve Barnes, 1976; Christensen vd., 1977; Spinka ve Winkler, 1974; Hulke vd., 1980; Wu ve Barnes, 1984; Thomas vd., 1985, Kuronen vd., 1987; Jiang, 2007).

4.4 ^{32}S çekirdeğinin Alfa Bozunum Genişliklerinin Hesaplanması

^{32}S çekirdeğinin alfa bozunum genişlikleri WKB metodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Woods-Saxon Kare (WS2) potansiyeli kullanılmış ve potansiyel parametreleri V_0=95 MeV, a_v=1.42 fm ve r_0=1.25 fm olarak seçilmiştir. Denklem 3.6 ile verilen bozunum genişlikleri farklı durumlar için hesaplanmış ve Tablo 4.7'de verilmiştir. ^{32}S çekideği için evrensel kuantum numarası pozitif pariteli bandlar için 8, negatif pariteli bandlar için 9 olarak kullanılmıştır.

Tablo 4.7. WKB metodu ile hesaplanan ^{32}S çekirdeğinin alfa bozunum genişlikleri

l	E_{exc}	Γ (MeV) [Lönnorth vd., 2010]	Γ_{alp}/Γ (MeV) [Lönnorth vd., 2010]	Γ_{alp} (MeV) [Lönnorth vd., 2010]	Γ_{alp} (MeV)
0	10.25	0.04	0.40	0.016	0.016

0	10.38	0.03	0.20	0.006	0.025
0	10.46	0.03	0.40	0.012	----
0	10.88	0.02	0.40	0.008	----
0	11.05	0.02	1.00	0.020	----
1	10.53	0.02	0.15	0.003	----
1	-				
1	-				
1	-				
2	10.78	0.02	0.20	0.004	0.010
2	10.95	0.20	0.10	0.020	----
2	11.41	0.50	0.11	0.055	0.119
2	11.94	0.02	0.10	0.002	----
3	11.25	0.02	0.02	0.0004	----
3	11.38	0.02	0.05	0.001	----
3	12.88	0.03	0.19	0.0057	----
3	13.11	0.06	0.32	0.0192	----
4	13.83	0.07	0.70	0.049	----
4	14.16	0.05	0.65	0.0325	----
4	14.73	0.08	0.90	0.072	----
4	14.81	0.06	0.78	0.0468	----
5	14.11	0.05	0.37	0.0185	----
5	15.14	0.05	0.30	0.015	----
5	15.38	0.05	0.26	0.013	----
5	16.06	0.08	0.78	0.0624	----
6	15.96	0.05	0.45	0.0225	----
6	16.65	0.05	0.20	0.010	----
6	16.78	0.13	0.66	0.0858	----
6	16.87	0.05	0.48	0.024	----
7	17.35	0.07	0.05	0.0035	----
7	17.69	0.08	0.28	0.0224	----
7	18.47	0.10	0.44	0.044	----
7	18.66	0.08	0.36	0.0288	----
8	19.32	0.07	0.18	0.0126	----
8	19.61	0.09	0.11	0.0099	----
8	19.69	0.07	0.57	0.0399	----
8	20.41	0.08	0.42	0.0336	----
9	21.28	0.07	0.15	0.0105	----

9	21.59	0.07	0.19	0.0133	----
9	22.24	0.10	0.13	0.013	----
9	22.81	0.10	0.16	0.016	----

WKB yöntemi ile hesaplanan ^{32}S çekirdeğinin alfa bozunum genişliklerinde sadece birkaç durum için olumlu sonuç elde edilebilmiştir. Bunun en önemli nedenlerinden bir tanesi, deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada ilgili durumların alfa bozunumu yanında nötron bozunumu yapmasının da mümkün olmasıdır. Alfa bozunumu hesaplamaları WKB ile yapılabilir iken nötron bozunumu gibi çalışmalar için R-Matrix metodu gibi bir hesaplamayla ancak yapılabilir. Bu ise bu proje konusunun ötesinde bir çalışmadır. ^{32}S için hesaplamaların olumlu sonuç vermemesinin nedeni bu olabilir. Bu proje kapsamında elde edilen tüm sonuçlar bursiyer olarak bu projede çalışan Doktora öğrencisi Fahrettin Koyuncu' nun tez çalışmasını oluşturmuştur. İlgili tez çalışması bu proje sayesinde tamamlanmış ve projenin en önemli çıktısı olarak sisteme girilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bir yıllık proje kapsamında nükleer astrofizikle yakından alakalı olan ve farklı karbon, oksijen ve silikon yanma aşamalarında gerçekleştiği düşülen $^{12}C+^{12}C$, $^{12}C+^{16}O$, $^{16}O+^{16}O$, $\alpha+^{28}Si$, $\alpha+^{32}S$, $\alpha+^{36}Ar$, $\alpha+^{40}Ca$ reaksiyonları incelenmiştir. Bu hesaplamaların yanı sıra ^{32}S çekirdeğininde alfa bozunum genişlikleri üzerine de hesaplamalar yapılmıştır.

$\alpha+^{40}Ca$ hesaplamaları yapılırken Koyuncu vd. (2017) çalışmasının sonuçlarından hareket edilmiş ve bu çalışmada elastik saçılma verilerini açıklamakta kullanılmış olan n-n DF potansiyeli kullanılmıştır. Koyuncu vd. (2017) çalışmasında n-n DF potansiyelinin bozunum gözlenirlerini açıklamakta başarısız olduğu sonucu elde edilmiştir. Alfa bozunumu bariyer altında gerçekleşen bir olaydır. Yine bu proje kapsamında bariyer altındaki enerjilerde incelenen $\alpha+^{40}Ca$ reaksiyonu için bu çalışmada da n-n DF potansiyelinden faydalanılmıştır. ^{44}Ti çekirdeğinin bozunum gözlenirlerini açıklamakta başarısız olan n-n DF potansiyeli $\alpha+^{40}Ca$ reaksiyonun tesir kesitlerini açıklamaktada başarısız olmuş ve yaklaşık 2 MeV civarında diğer hesaplamalardan farklı sonuçlar üretmiştir. $\alpha+^{40}Ca$ reaksiyonunun tesir kesitleri ve astrofiziksel S-faktörleri üretildikten sonra reaksiyon hız tahminlerine geçilmiştir. Koyuncu vd. (2017) çalışmasına benzer şekilde n-n DF potansiyeli WS2 potansiyeline fit edilerek potansiyel parametreleri belirlenmiş buna ilaveten Proximity 77 ve α-nucleus potansiyellerinden de faydalanılarak astrofiziksel reaksiyonlarda bolluk miktarlarını belirlemede önemli rol oynayan reaksiyon hız tahminleri geliştirilmiştir. Proximity 77 ve α-nuclues potansiyelleri diğer fenemenolojik potansiyellerden farklı olarak belli başlangıç parametrelerine bağlı olmakla beraber n-n Df potansiyeline nazaran sığ potansiyellerdir. Reaksiyon hız verilerinin elde edilmesinde sığ olan potansiyellerin daha başarılı olduğu ve kıstaslarımıza daha yakın sonuçlar türettiği görülmüştür.

$\alpha+^{40}Ca$ reaksiyonundan elde edilen bilgi birikimi ile $\alpha+^{28}Si$, $\alpha+^{32}S$ ve $\alpha+^{36}Ar$ reaksiyonları içinde benzer hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmalara ilave olarak ^{28}Si, ^{32}S ve ^{36}Ar çekirdeklerinin deformasyon durumları da WKB hesaplamalarına dâhil edilmiş ve reaksiyon gözlenirleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deformasyon ile oryantasyon açısı da (0^o ve 90^o) hesaba katılarak yönelimin etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki β_2 deformasyon parametresine bağlı olarak çekirdekler arasındaki etkileşme doğrudan etkilenmiş ve yönelim tesir kesitlerinde artışa ve azalışa neden olmuştur. Dolayısıyla reaksiyon hız tahminlerinde önemli değişiklikler kaydedilmiş ve ölçütlerimizden uzak veya yakın veriler üretilebilmiştir. Tüm sonuçlar gözden geçirildiğinde Talys kodu ile elde edilen sonuçların kıstaslarımıza daha yakın olduğu söylenebilir. Ölçüt aldığımız sonuçlarının birçoğunun istatistiksel hesaplar sonucu

türetildiği unutulmamalıdır. Yarı klasik yöntem ile reaksiyonun çıkış kanalını tayin etmek mümkün olmadığı için elde edilen sonuçların farklılık göstermesi beklenen bir durumdur.

Diğer taraftan $^{12}C+^{12}C$ reaksiyonu için füzyon tesir tesir kesiti hesaplamaları ve astrofiziksel S-faktör hesaplamaları yapılmıştır. Reaksiyon gözlenirlerini hesaplamak için iki farklı potansiyelden faydalanılmıştır. Her iki potansiyel ile öncelikle ^{24}Mg çekirdeğinin kümelenme yapı gözlenirleri olan uyarılma enerjileri hesaplanmıştır. DFC potansiyeli ile yapı gözlenirleri başarılı bir şekilde açıklanırken, Proximity 77 potansiyeli ile olumlu sonuçlar elde edilememiştir. Kümelenme temelini baz alan DFC potansiyelinin yapı gözlenirlerini iyi bir şekilde açıklaması ^{24}Mg çekirdeğinin $^{12}C+^{12}C$ gibi 2 küme yapısında olduğunu destekler niteliktedir. Aynı zamanda füzyon gözlenirleride her iki potansiyel ile hesaplanmış yine DFC potansiyelinin Proximity 77 potansiyeline nazaran deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar türettiği sonucuna ulaşılmıştır. Fakat her iki potansiyel ile elde edilen sonuçlar bariyer altı enerjilerde $^{12}C+^{12}C$ için var olan salınımları açıklamakta yetersiz kaldığı söylenebilir.

Buradan hareketle var olan bu salınımları açıklamak maksadı ile hesaplamalara literatürden farklı olmak üzere MGECSC potansiyeli ile elektron perdeleme etkisi dâhil edilmiştir. Bu potansiyel klasik Debye perdeleme potansiyelinden bazı ek terimler içermesi hasebiyle ayrılmaktadır. Kısaca bu potansiyel ile hem debye plazma hemde kuantum plazma durumları tasvir edilebilmektedir. Debye uzunluğu belirlenirken zayıf perdeleme şartından faydalanılmış ve karbon yanma fazındaki yoğunluk, sıcaklık ve kütle kesirleri değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki $c \neq 0$ perdeleme durumunda perdeleme etkisi oldukça kuvvetli olup gözlenirleri etkileyen en önemli faktörlerden birisi olarak görülmüştür. Dolayısıyla $c \neq 0$ ve $b \neq 0$ perdeleme etkisinin sonuçları olumlu bir şekilde etkilediği söylenebilir. Cosinüs terimi içeren böyle bir MGECSC potansiyeli $^{12}C+^{12}C$ füzyon verilerini açıklamada daha başarılı olmuştur. Yarı-klasik yaklaşım ile elde edilen sonuçlara ilaveten çiftlenmiş kanallar etkisi ile de perdeleme etkisi araştırılmış yine deneysel verilere uygun sonuçlar elde edilmiştir.

$^{12}C+^{16}O$ reaksiyonu yine karbon yanma aşaması içinde ilerleyen safhalarında gerçekleştiği düşünülen olasılık yönünden zayıf bir reaksiyondur. Fakat bu reaksiyon için olasılık düşükte olsa gerçekleşme ihtimalinden dolayı literatürede çalışılmaktadır. $^{12}C+^{12}C$ reaksiyonu için yapılan benzer hesaplamalar tekrar edilmiş ve zayıf perdeleme şartı kullanılarak Debye uzunluğu hesaplanmıştır. $^{12}C+^{16}O$ reaksiyonu içinde DFC potansiyelinden faydalanılmış bu potansiyelin yanı sıra AW95 potansiyeli ile de gözlenirler hesaplanmış ve elde edilen sonuçlara göre AW95 potansiyeli ile elde edilen sonuçların deneysel verileri açıklamakta oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Diğer yandan $^{16}O+^{16}O$ füzyon reaksiyonu içinde elektron perdeleme çalışmaları tekrarlanmak istenmiştir. Fakat bu reaksiyon müstakil bir yanma fazı olan oksijen yanma aşamasında gerçekleştiği için özellikle yoğunluk değerinin zayıf perdeleme şartını sağlamamasından dolayı elektron perdeleme çalışmaları gerçekleştirilememiştir. Böylelikle iki farklı nükleer potansiyel (cosh ve hybrid) ile deneysel veriler açıklanmaya çalışılmış ve sığ olan cosh potansiyeli ile deneysel verilere uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu proje kapsamında son olarak ^{32}S çekirdeğinin alfa bozunum genişlikleri hesaplanmıştır. WKB yöntemi kullanılan hesaplamalarda elde edilen sonuçlara sadece birkaç durum için deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Diğer durumlarda elde edilen sonuçlar toplam bozunum genişliklerinden (Tablo 4.7 üçüncü sütun) daha büyük çıkmıştır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada ilgili uyarılmış durumların alfa bozunumunun yanı sıra nötron bozunumu yapmasının da mümkün olmasıdır. Nötron bozunumu gibi çalışmalar için R-Matrix metodu gibi bir hesaplamayla ancak yapılabilir. Hem alfa hem de nötron bozunumları için R-matrix metodu kullanılarak hesaplamalar yapılabilirse o zaman hangi bozunma modunun daha baskın olabileceği hakkında yorum yapılabilir. Bu ise bu haliyle bu proje konusunun ötesinde bir çalışmadır.

Sonuç olarak, bu proje kapsamında, teorik nükleer reaksiyonlar ve yapı bilgisi ile nükleer astrofizikte önemli problemlerden olan yanma aşamaları detaylı olarak incelenmiştir. Bu anlamda literatürde bilinen yöntemler ile nükleer astrofizikteki aşamaların gözlenebilirleri üzerine tahmin de bulunulmuştur. Bunun yanında nükleer moleküller için çok önemli olan karbon yanma fazındaki $^{12}C+^{12}C$ ve diğer önemli reaksiyonları verilerini açıklamak için daha derin perdeleme etkilerini göz önüne alabilen MGESCS potansiyeli kullanılmış ve verileri açıklamada diğer modellere göre son derece başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla bu anlamda bilime yenilik getirilmiştir. Tüm bunlar ışığında bir senelik bu hızlı destek projesinin amaçlarına ve hedeflerine ulaştığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

Arnett, D. 1996. Supernovae and nucleosynthesis: an investigation of the history of matter, from the big bang to the present (1. Basım). New Jersey: By Princeton University Press.

Atkinson, R.d'E. and Houtermans, F. G. 1929. "Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen", Zeitschrift für Physik, 54(9-10), 656-665.

Azni, A. A., Norhasliza, Y., Firihu, M. Z. and Kassim, H. A. 2015." Reliability of the double-folding potential for fusion cross sections of light systems", Phy. Rev. C 91, 015811.

Bahar, M. K., and Soylu, A. 2014. "The hydrogen atom in plasmas with an external electric field", Physics of Plasmas, (1994-present), 21(9), 092703.

Balantekin, A. B. and Takigawa, N. 1998. "Quantum tunneling in nuclear fusion", Reviews of Modern Physics 70(1), 77-100.

Barron-Palos, L., Aguilera, E. F., Aspiazu, J., Huerta, A., Martinez-Quiroz, E.,Monroy, R., ... and Varela, A. 2006. "Absolute cross sections measurement for the 12C+12C system at astrophysically relevant energies", Nuclear Physics A, 779,318-332.

Becker, H. W., Kettner, K. U., Rolfs, C. and Trautvetter, H. P. 1981. "The 12C+12C reaction at subcoulomb energies (II)", Zeitschrift fur Physik A Atoms and Nuclei, 303(4), 305-312.

Beckerman, M. 1993. "Sub-barrier fusion of two nuclei ", Rep. Prog. Phys. 51, 281.

Bethe, H. A. 1939. "Energy production in stars", Physical Review, 55(5), 434-456.

Bethe, H. A. and Critchfield, C. L. 1938. "The Formation of Deuterons by Proton Combination", Physical Review, 54, 248-254.

Bertulani, C. A. 2013. Nuclei in the Cosmos (1. Basım). Singapore:World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Błocki, J., Randrup, J., Światecki, W. J. and Tsang C. F. 1977. "Proximity forces", Annals of Physics, 105(2), 427-462.

Buck, B., Hopkins, P. D. B. and Merchant, A. C. 1990. "A 12C+12C cluster model of 24Mg", Nuclear Physics A 513(1), 75-114, 1990.

Buck, B., Merchant, A. C. and Perez S. M. 1994. "Alpha-Cluster Structure in 212Po", Physical Review Letters 72(9), 1326-1328.

Buck B. et al. 1991. "Ground state to ground state alpha decays of heavy even-even nuclei", J. Phys. G Nucl. Part. Phys., 17, 1223.

Buck B. et al. 1993. "Half-lives of favored alpha decays from nuclear ground states", Atomic Data Nucl. Data Tables 53-54.

Buck, B., Johnston, J. C., Merchant, A. C. and Perez, S. M. 1995. " Unified treatment of scattering and cluster structure in α+closed shell nuclei: ^{20}Ne and ^{44}Ti", Phys. Rev. C 52, 1840.

Buck, B., Johnston, J. C., Merchant, A. C. and Perez S. M. 1996. "Cluster model of alpha decay and 212Po", Physical Review Letters 53(6), 2841-2848.

Buck, B., Merchant, A. C. and Perez, S. M. 1996. "Exotic cluster states in actinide nuclei", Physical Review Letters 76(3), 380-383.

Buck, B., Merchant, A. C. and Perez S. M. 1998. "Systematic study of exotic clustering in even-even actinide nuclei", Physical Review C, 58(4), 2049-2060.

Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler W. A. and Hoyle, F. 1957. ” Synthesis of the Elements in Stars”, Reviews of Modern Physics, 29, 547.

Bodansky, D., Clayton, D. D., Fowler, W. A. 1968. ” Nucleosynthesis During Silicon Burning”, Phys. Rev. Lett., Vol 20, 4.

Bodansky, D., Clayton, D. D., Fowler, W. A. 1968.” Nuclear Quasi-Equilibrium during Silicon Burning”, The Astrophysical Journal Supp. Ser., Vol 16, 148.

Cardenas, W. H. Z. et al. 2004. “Schematic Coupled-Channel Calculations for NuclearReactions with Unstable Beams”, Brazilian Journal Of Physics, vol. 34, no. 3B.

Christensen, P. R., Switkowskiw, Z. E. and Dayras, R. A. 1977. "Sub-barrier fusion measurements for 12C+16O", Nuclear Physics A, 280(1), 189-204.

Cook, J. 1982. "DFPOT-a program for the calculation of double folded potentials", Computer Physics Communications, 25(2), 125-139.

Condon, E. U. and Gourney, R. W. 1929. "Quantum mechanics and radioactive disintegration", Physical Review, 33(2), 127-140.

Cujec, B. and Barnes, C. A. 1976. "Total reaction cross section for 12C+16O below the Coulomb barrier", Nuclear Physics A, 266(2), 461-493.

Dasmahapatra, B., Cujec, B. and Lahlou, F. 1982. "Fusion cross sections for 12C+12C, 12C+13C and 13C+13C at low energies", Nuclear Physics A, 384(1-2), 257-272.

Dasso, C. H. , Landowne, S. and Winther, A. 1985. “Barrier penetration in the presence of coupling to intrinsic degrees of freedom “, A. Nucl. Phys. A, 432, 495.

Denisov, V. Yu. 2006. ” Nuclear reactions in hot stellar matter and nuclear surface deformations”, Phys. Rev. C, 74, 055804.

Denisov, V. Yu. and Pilipenko, N. A. 2007. ” Interaction of two deformed, arbitrarily oriented nuclei”, Phys. Rev. C, 76, p. 014602.

Denisov, V. Yu. and Pilipenko, N. A. 2007. ” Interactıon potentıal between two axıally symmetrıc nuclei”, J. Nucl. Phys. Energ., 4(22), p. 49-55.

Denisov, V. Yu. and Pilipenko, N. A. 2008. ” Interaction between Two Axially Symmetric Nuclei”, Ukrainian Journal of Physics 53, p. 845-851.

Denisov, V. Yu. and Pilipenko, N. A. 2009. ” Fusıon of deformed nuclei”, J. Nucl. Phys. Energ. 10, p. 55-60.

Denisov, V. Yu. and Pilipenko, N. A. 2010.” Fusion of deformed nuclei: $^{12}C+^{12}C$”, Phys. Rev. C 81, 025805.

Denisov, V. Yu. and Ikezoe, H. 2005. ” α-nucleus potential for α-decay and sub-barrier fusion“, Phys. Rev. C 72, 064613.

Denisov, V. Y., Davidovskaya, O. I. and Sedykh, I. Y. 2015. "Improved parametrization of the unified model for α decay and α capture", Physical Review C 92(1), 014602.

Dutt, I. and Puri, R. K. 2010. "Comparison of different proximity potentials for asymmetric colliding nuclei", Physical Review C 81(6), 064609.

Esbensen, H. 2008.” Coupled-channels calculations of $^{16}O+^{16}O$ fusion”, Phys. Rev. C 77, 054608.

Fang, X., Bucher, B., Almaraz-Calderon, S., Alongi, A., Ayangeakaa, A. D., Best, A., ... and Fujita, H. 2013. "Experimental investigation of the 12C+ 12C fusion at very low energies by direct and indirect methods", Journal of Physics: Conference Series 420(1), 012151.

Gamow, G. 1928. "Zur quantentheorie des atomkernes", Zeitschrift für Physik, 51, 204-212.

Hagino, K., Rowley, N. and Kruppa, A. T. 1999. "A program for coupled-channel calculations with all order couplings for heavy-ion fusion reactions", Computer Physics Communications 123, 143-152.

Haider, Q., Shapiro, J. Y. and Sharma, A. 1993 "WKB approximation to subbarrier fusion", Il Nuovo Cimento A 106.3, 343-354.

High, M. D. and Cujec, B. 1977. "The 12C+12C sub-coulomb fusion cross section", Nuclear Physics A 282(1), 181-188.

Hoyle, F., Dunbar, D. N. F., Wenzel, W. A. and Whaling, W. 1953. "A state in C-12 predicted from astrophysical evidence", Physical Review, 92(4), 1095.

Hoyle, F. 1954. ” On Nuclear Reactions Occuring in Very Hot Stars.I. The Synthesis of Elements from Carbon to Nickel”, Astrophys. J. Suppl. 1, 121-146.

Hulke, G., Rolfs, C. and Trautvetter, H. P. 1980. "Comparison of the fusion reactions 12C+20Ne and 16O+16O near the Coulomb barrier" Zeitschrift fur Physik A Atoms and Nuclei, 297(2), 161-183.

Ibrahim, T. T., Perez, S. M. and Wyngaardt, S. M. 2010. "Hybrid potential model of the α-cluster structure of 212Po", Physical Review C 82(3), 034302.

Ikeda, K., Tagikawa, N. and Horiuchi H. 1968. "The systematic structure-change into the molecule-like structures in the self-conjugate 4n nuclei", Progress of Theoretical Physics Supplement, 68, 464-475.

Iliadis, C. 2105. Nuclear Physics of Stars (2. Basım), Weinheim:John Wiley and Sons.

Jiang, C. L., Rehm, K. E., Back, B. B. and Janssens, R. V. F. 2007. "Expectations for 12C and 16O induced fusion cross sections at energies of astrophysical interest", Physical Review C, 75, 015803.

Jiang, C. L., Santiago-Gonzalez, D., Almaraz-Calderon, S., Rehm, K. E., Back, B. B., Auranen, K., ... and Dickerson, C. 2018. "Reaction rate for carbon burning in massive stars", Physical Review C 97, 012801(R).

Kettner, K. U., Lorenz-Wirzba, H. and Rolfs, C. 1980. "The12C+ 12C reaction at subcoulomb energies (I)", Zeitschrift fur Physik A Atoms and Nuclei 298(1), 65-75.

Kocak, G., Karakoc, M., Boztosun, I., and Balantekin, A. B. 2010. ”Effects of α-cluster potentials for the O16+O16 fusion reaction and S factor”, Phys. Rev. C 81, 024615.

Koyuncu F., Soylu, A. and Bayrak, O. 2017. "Binary cluster model calculations for 20Ne and 44Ti nuclei", Modern Physics Letters A, 32.09, 1750050.

Koyuncu, F. and Soylu, A. 2018 "Screening effects on 12C+12C fusion reaction", Chinese Physics C, 42(5), 054106.

Koyuncu, F. and Soylu, A. 2017. "Investigation of Sub-Coulomb barrier fusion reaction of α+40Ca in different models", International Journal of Modern Physics E, 26(12), 1750086.

Koning, A. J., Hilaire, S. and Duijvestijn, M. C. 2004. "TALYS: a nuclear reaction program", NRG-report 21297/04.62741/P, also available at http://www.talys.eu.

Kubono, S. et al. 2013. ” Role Of Clusters İn Nuclear Astrophysics With Cluster Nucleosynthesis Dİdiagram(CND) ”, Journel of Physics Conference Series 436, 012071.

Kunz, R. et al. 2002. “Astrophysical Reaction Rate of ^{12}C (α,γ) ^{16}O”, The Astrophysical Journal 567, Number 1.

Kuronen, A., Keinonen, J. and Tikkanen, P. 1987. "Cross section of O16+16O near the Coulomb barrier", Physical Review C 35(2), 591.

Langer, R. E. 1937. "On the connection formulas and the solutions of the wave equation", Physical Review 51, 669-676.

Lönnroth, T., Norrby, M., Goldberg, V. Z., Rogachev, G. V., Golovkov, M. S., Källman, K. M., ... and Tiourin, G. P. 2010. “Highly excited alpha-cluster states in 32 S studied with the thick-target inverse kinematics method”, The European Physical Journal A, 46(1), 5-16.

Mazarakis, M. G. and Stephens, W. E. 1973. "Experimental Measurements of the C12+C12 Nuclear Reactions at Low Energies", Physical Review C 7(4), 1280.

Möller, P., Sierk, A. J., Ichikawa, T. and Sagawa, H. 2012. "Nuclear ground-state masses and deformations: FRDM (2012)", Atomic Data and Nuclear Data Tables, 109, 1-204.

Morton, C. R. et al. 1999. “Coupled-channels analysis of the 16O+208Pb fusion barrier distribution”, Physıcal Revıew C volume 60, 044608.

Newton, J. O., Morton, C. R., Dasgupta, M., Leigh, J. R., Mein, J. C., Hinde, D. J., ... & Hagino, K. (2001). Experimental barrier distributions for the fusion of 12 C, 16 O, 28 Si, and 35 Cl with 92 Zr and coupled-channels analyses. Physical Review C, 64(6), 064608.

Non-Smoker, 2018. "https://nucastro.org/websmoker.html".

Ohkubo, S. 1995. "Alpha Clustering and Structure of 94Mo and 212Po", Physical Review Letters 74, 2176.

Patterson, J. R., Winkler, H., & Zaidins, C. S., 1969. "Experimental Investigation of the Stellar Nuclear Reaction 12C+12C at Low Energies", The Astrophysical Journal, 157, 367.

Patterson, J. R., Nagorcka, B. N., Symons, G. D. and Zuk, W. M. 1971. "Experimental investigation of 16O+ 12C nuclear burning at stellar energies", Nuclear Physics A 165(3), 545-559.

Potekhin, A. Y. and Chabrier, G. 2012. ” Thermonuclear fusion in dense stars electron screening, conductive cooling, and magnetic field effects”, Astronomy & Astrophysics 538, A115, p. 9.

Rauscher, T., Thielemann, F. K., Görres, J. and Wiescher, M. 2000. "Capture of α particles by isospin-symmetric nuclei", Nuclear Physics A, 675(3-4), 695-721.

Reaclib, 2018. "https://groups.nscl.msu.edu/jina/reaclib/db/index.php".

Saidi, F., Oudih, M. R., Fellah, M. and Allal, N. H. 2015. "Cluster decay investigation within a modified Woods-Saxon potential", Modern Physics Letters A 30(30), 1550150.

Salpeter, E. E. 1954. ” Electrons Screening and Thermonuclear Reactions”, Australian Journal of Physics Vol 7, p 373.

Santiago-Gonzalez, D., Jiang, C. L., Rehm, K. E., Alcorta, M., Almaraz-Calderon, S., Avila, M. L., ... and Carpenter, M. P. 2016 "Fusion measurements of 12C+ 12C at energies of astrophysical interest", EPJ Web of Conferences,117, 09011.

Satkowiak, L. J., DeYoung, P. A., Kolata, J. J. and Xapsos, M. A. 1982. "Gamma-ray studies of the C12+C12 system", Physical Review C, 26(5), 2027.

Strieder, F. 2010. "Carbon burning in stars-Prospects for underground measurements of the 12C+12C fusion reactions", Journal of Physics: Conference Series 202(1), 012025.

Soylu, A. 2012. “Plasma screening effects on the energies of hydrogen atom”, Physics of Plasmas (1994-present), 19(7), 072701.

Soylu, A., Bayrak, O., Koyuncu, F., Dağtaş R. and Yavuz, F. 2016. "Hafif, orta ve ağır çekirdeklerin nükleer yapı ve reaksiyon gözlenirlerinin kümelenme modeli kullanılarak teorik olarak incelenmesi", Tübitak 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Pr. 113F225.

Singh, M. and Kharab, R. 2013, "Analysis of fusion excitation functions of various systems using modified Woods-Saxon potential", Nuclear Physics A, 897, 179-197.

Spillane, T., Raiola, F., Rolfs, C., Schurmann, D., Strieder, F., Zeng, S., ... and Schweitzer, J. 2007. "12C+12C Fusion Reactions near the Gamow Energy", Physical Review Letters, 98(12), 122501.

Spinka, H. and Winkler, H. 1974. "Experimental determination of the total reaction cross section of the stellar nuclear reaction 16O+16O", Nuclear Physics A, 233(2), 456-494.

Talys, 2018. "http://www.talys.eu/".

Tumino, A. et al. 2014. “New determınatıon of the 2h(d,p)3h and 2h(d,n)3he reactıon rates at astrophysıcal energıes”, The Astrophysical Journal, 785: 96, 17.

Thomas, J., Chen, Y. T., Hinds, S., Langanke, K., Meredith, D., Olson, M. and Barnes, C. A. 1985. "Sub-barrier fusion of 16O with 16, 18O", Physical Review C, 31(5), 1980.

Thompson, I. J. 1998. "Coupled reaction channels calculations in nuclear physics", Computer Physics Reports 7(4), 167-212.

Vertse, T., Pal, K. F. and Balogh, Z. 1982. "GAMOW, a program for calculating the resonant state solution of the Radial Schrodinger Equation in an arbitrary optical potential", Computer Physics Communications 27, 309-322.

Wan, N., Xu, C. and Ren, Z. 2015. ” Effects of electron screening on *α*-decay half-lives in different external environments”, Physical Revıew C, 92, 024301.

Weizsäcker, C. F. 1938 "Über Elementumwandlungen im Inneren der Sterne. II", Physikal Z., 39, 633.

Wheeler, J. A. 1937. ”Molecular Viewpoints in Nuclear Structure”, Phys. Rev. 52, 1083-1106.

Woods R. D. and Saxon D. S. 1954. "Diffuse surface optical model for nucleon-nuclei scattering", Physical Review, 95(2), 577-578.

Woosley, S. E., Heger, A. and Weaver, T. A. 2002. "The evolution and explosion of massive stars", Reviews of Modern Physics 74(4), 1015-1071.

Wu, S. C. and Barnes, C. A. 1984. "Fusion and elastic scattering cross sections for the 16O+16O reactions near the Coulomb barrier", Nuclear Physics A 422(2),373-396.

Xu, C. and Ren, Z. 2005. ” Systematical calculation of *α* decay half-lives by density-dependent cluster model”, Nuclear Physics A 753, 174-185.

Xu, C. and Ren, Z. 2006. “New deformed model of α-decay half-lives with a microscopic potential”, Phys. Rev. C. 73, 041301.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ASIM SOYLU
Proje No:	117R015
Proje Başlığı:	Nükleer Astrofizikteki Anahtar Reaksiyon Ve Çekirdek Yapılarının Teorik Olarak İncelenmesi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR Ü. FEN EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/08/2017 - 01/08/2018
Onaylanan Bütçe:	30000.0
Harcanan Bütçe:	25833.33
Öz:	Nükleer fizik, reaksiyon mekanizmalarının açıklanmasında, astrofizik ise elementlerin sentezlendiği fiziksel ortamın şartlarının belirlenmesinde bize yol gösterir. İşte bu noktada nükleer astrofizik, fizik biliminin stratejik bir kolu haline gelmiştir. Ağır kütleli yıldızlarda meydana gelen A?60 elementlerin sentezinin incelenmesi yıllardır süre gelen mühim bir çalışma sahası olmuştur. Karbon, oksijen ve silikon yanma aşamaları ağır kütleli yıldızların yaşam süreçleri için önem arz etmektedir. Bu projede, karbon ve oksijen yanma aşamalarındaki 12C+12C, 12C+16O, 16O+16O füzyon reaksiyonları ve silikon yanma aşamasındaki ?+40Ca, ?+36Ar, ?+32S ve ?+28Si reaksiyonları incelenmiş, ayrıca 32S çekirdeğinin ?-bozunumu üzerine çalışmalarda bulunulmuştur. Bu çalışmaların yapılabilmesi için literatürde bilinen bazı metotlar kullanılmıştır. Bahsi geçen reaksiyonların gözlenirlerini elde etmede WKB (Wentzel- Kramers-Brilloouin), Çiftlenmiş Kanallar formalizmi ve İstatistiksel hesaplamalardan yararlanılmıştır. Ayrıca, 12C+12C ve 12C+16O füzyon reaksiyonları üzerinde elektron perdeleme etkisini araştırmak için MGECSC (More General Exponential Cosine Screened Coulomb) potansiyeli kullanılmıştır. Bariyer altı enerjilerde ?+40Ca, ?+36Ar, ?+32S ve ?+28Si reaksiyonlarının reaksiyon hız tahminleri için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Deformasyon etkilerini araştırmak maksadı ile 36Ar, 32S ve 28Si deformasyon durumları hesaplara dâhil edilmiş ve reaksiyon gözlenirleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Son olarak da 32S çekirdeğinin ?-bozunumu üzerine çalışmalarda bulunulmuştur. Yapılan bu çalışma ile ağır yıldızlarda anahtar rol oynayan birçok tepkime ve çekirdek incelenmiştir. Uluslararası alanda kaliteli bilimsel dergilerde yayın yapılarak Türkiye?ye bilimsel alanda saygınlık sağlanmıştır. Ekibimiz 1 proje yürütücüsü ve 1 doktora öğrencisinden oluşmaktadır. Projenin 12 ay içinde tamamlanmıştır.
Anahtar Kelimeler:	Nükleosentez, Reaksiyon hızı, Füzyon reaksiyonları, MGECSC Potansiyeli, Astrofiziksel S-faktör.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Screening effects on C-12+C-12 fusion reaction (Makale - İndeksli Makale), 2- Investigation of Sub-Coulomb barrier fusion reaction of alpha+Ca-40 in different models (Makale - İndeksli Makale),

TÜBİTAK