

T.C.  
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
Nükleer Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**GERÇEKÇİ İKİ NÜKLEON ETKİLEŞMESİNDEN  
SEYLER – BLANCHARD ETKİN ETKİLEŞMESİNİN ELDE  
EDİLMESİ**

Danışman:  
Prof. Dr. Kaan MANİSA

Hazırlayan:  
Mehmet ECER

Kütahya – 2025

## Kabul ve Onay

### KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Nükleer Fizik Anabilim dalında, 202285111017 öğrenci numaralı, Mehmet Ecer'in hazırlamış olduğu "Gerçekçi İki Nükleon Etkileşmesinden Seyler – Blanchard Etkin Etkileşmesinin Elde Edilmesi" başlıklı yüksek lisans/~~doğtora~~ tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

20/01/2025

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Ret
Prof. Dr. Kaan MANİSA (Danışman)		
Doç. Dr. Hasan BİRCAN		
Doç. Dr. Abdullah Engin ÇALIK		

Doç. Dr. Eray ACAR  
Enstitü Müdürü

## **Bilimsel Etik Bildirimi**

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım ‘‘Gerçekçi İki Nükleon Etkileşmesinden Seyler – Blanchard Etkin Etkileşmesinin Elde Edilmesi’’ adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

20/01/ 2025

Mehmet ECER

## **Özgeçmiş**

Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden 2014 yılında mezun oldu. 2022 yılında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde tezli yüksek lisans eğitimine başlamış olup halen aynı programda çalışmalarına devam etmektedir. Millî Eğitim Bakanlığı'na bağlı çeşitli devlet okullarında Fizik Öğretmeni ve eğitim kurumlarında yönetici olarak görev yapmıştır.



## ÖZET

### GERÇEKÇİ İKİ NÜKLEON ETKİLEŞMESİNDEN SEYLER – BLANCHARD ETKİN ETKİLEŞMESİNİN ELDE EDİLMESİ

ECER, Mehmet

Yüksek Lisans Tezi, Nükleer Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kaan MANİSA

Ocak 2025, 53 sayfa

Bu çalışmada, nükleer madde için Seyler-Blanchard etkin etkileşmesinin parametreleri, Urbana etkileşim potansiyeli ve Varyasyonel Monte Carlo yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen yeni parametreler kullanılarak nükleer maddenin nükleon başına düşen toplam enerjisinin yoğunlukla değişimi incelenmiştir. Nükleer maddenin doyma yoğunluğu  $\rho_0 = 0,16 \text{ fm}^{-3}$  bulunmuştur, buna karşılık gelen fermi momentumu da  $k_F = 1,33 \text{ fm}^{-1}$  dir. Nükleer maddenin bağlanma enerjisi  $E(\rho_0) = -15,975 \text{ MeV}$  olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, nükleer madde için literatürdeki çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlarla ve deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nükleer madde, Varyasyonel Monte Carlo, Seyler-Blanchard, Durum denklemi

**ABSTRACT****OBTAINING THE SEYLER – BLANCHARD EFFECTIVE INTERACTION  
FROM REALISTIC TWO-NUCLEON INTERACTION****ECER, Mehmet****Master's Thesis, Department of Nuclear Physics****Thesis Supervisor: Asst. Prof. Dr. Kaan MANİSA****January 2025, 53 pages**

In this study, the parameters of Seyler-Blanchard effective interaction for nuclear matter are obtained by using the Urbana interaction potential and Variational Monte Carlo method. Using the obtained new parameters, the variation of total energy per nucleon of nuclear matter with density is investigated. Saturation density of nuclear matter is found as  $\rho_0 = 0,16 \text{ fm}^{-3}$ , corresponding to Fermi momentum  $k_F = 1,33 \text{ fm}^{-1}$ . Binding energy of nuclear matter is obtained as  $E(\rho_0) = -15,975 \text{ MeV}$ . The results obtained in this study are compared with the results obtained by various researchers in the literature for nuclear matter and with experimental values.

**Keywords:** Nuclear matter, Variational Monte Carlo, Seyler-Blanchard, Equation of State.

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlığında bana rehberlik eden ve değerli katkılarıyla çalışmamızı şekillendiren çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Kaan MANİSA'ya en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Onun bilgi birikimi ve deneyimi, bu çalışmanın her aşamasında bana ilham verdi. Ayrıca, tezin hazırlık aşamasında desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Hasan BİRCAN ve literatür taramasındaki katkısından dolayı Dr. Sibel SARIAYDIN hocalarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Ailem, zorlu süreçlerde bana güç ve motivasyon sağladı. Eğitim hayatım boyunca gösterdikleri sabır, anlayış ve teşvik için minnettarım. Özellikle, bana her zaman inanan ve hayallerimi gerçekleştirmem için gerekli olan özgüveni aşıl原因an annem, babam ve kardeşlerim ile her anımda yanımda olarak bana destek olan, fikirleriyle ve cesaretlendirmeleriyle bu süreci daha anlamlı hale getiren sevgili Mine ARSLAN' a, yine desteğini her zaman yanımda hissettiğim Tolgahan ÇOBANOĞLU'na özel teşekkürlerimi sunuyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
ABSTRACT .....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR .....	xi
<b>BİRİNCİ BÖLÜM</b>	
GİRİŞ .....	1
<b>İKİNCİ BÖLÜM</b>	
NÜKLEER MADDE VE DENEYSEL ÖZELLİKLERİ .....	5
<b>ÜÇÜNCÜ BÖLÜM</b>	
SEYLER-BLANCHARD ETKİLEŞİMİ .....	8
<b>DÖRDÜNCÜ BÖLÜM</b>	
MONTE CARLO YÖNTEMİ.....	12
4.1. Varyasyonel Monte Carlo.....	14
4.2. Etkileşim Potansiyeli.....	15
<b>BEŞİNCİ BÖLÜM</b>	
ARAŞTIRMA SONUÇLARI .....	19
5.1. Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Sonuçlar .....	20
5.2. Seyler – Blanchard Parametrelerinin Elde Edilmesi.....	22
<b>ALTINCI BÖLÜM</b>	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	32
7. KAYNAKÇA .....	34
8. DİZİN .....	42

## TABLOLAR LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b> Myers ve Swiatecki'nin Yaptıkları Çalışmada Kullandıkları Etkileşim Parametreleri .....	10
<b>Tablo 4.1:</b> Urbana V14 Nükleon-Nükleon Etkileşim Potansiyelinin Parametreleri .....	17
<b>Tablo 5.1:</b> Varyasyonel Monte Carlo Yöntemiyle Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerji Değerleri .....	20
<b>Tablo 5.2:</b> Literatürdeki Araştırmacılar Tarafından Nükleer Madde İçin Elde Edilen Doyma Yoğunluğu, Fermi Momentumu, Bağlanma Enerjisi Değerleri ve VMC Sonuçları .....	21
<b>Tablo 5.3:</b> Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Seyler-Blanchard Parametreleri .....	23
<b>Tablo 5.4:</b> Bu Çalışmada Elde Edilen Yeni Seyler-Blanchard Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerji Değerleri .....	23
<b>Tablo 5.5:</b> Literatürdeki Araştırmacılar Tarafından Nükleer Madde İçin Elde Edilen Doyma Yoğunluğu, Fermi Momentumu, Bağlanma Enerjisi Değerleri ve Bu Çalışma .....	25
<b>Tablo 5.6:</b> Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerji Değerleri .....	27

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 5.1:</b> VMC'den Elde Edilen Toplam Enerjinin Yoğunlukla Değişimi .....	22
<b>Şekil 5.2:</b> Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunlukla Değişimi .....	24
<b>Şekil 5.3:</b> Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi. İçi Boş Daireler Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Değerleri, İçi Dolu Kareler İse Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri Göstermektedir.....	26
<b>Şekil 5.4:</b> Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi .....	28
<b>Şekil 5.5:</b> Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi. İçi Boş Daireler Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Değerleri, İçi Dolu Kareler ise Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri, İçi Boş Kareler İse Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri Göstermektedir.....	29
<b>Şekil 5.6:</b> 0.01 fm <sup>-3</sup> ile 0.20 fm <sup>-3</sup> Yoğunlukları Arası Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi. İçi Boş Daireler Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Değerleri, İçi Dolu Kareler İse Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri, İçi Boş Kareler İse Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri Göstermektedir.....	30

**KISALTMALAR**

<b>A</b>	Kütle Numarası
<b>Z</b>	Proton Sayısı
<b>N</b>	Nötron Sayısı
<b>NN</b>	Nükleon-Nükleon Etkileşimi
<b>VMC</b>	Varyasyonel Monte Carlo
<b>SB</b>	Seyler-Blanchard Etkileşimi
<b>MF</b>	Ortalama Alan
<b>DBHF</b>	Dirac-Brueckner-Hartree-Fock
<b>GFMC</b>	Green Fonksiyon Monte Carlo
<b>TF</b>	Thomas-Fermi
<b>V</b>	İki-Parçacık Etkileşim Potansiyeli
<b>C<sub>l</sub></b>	Özdeş Parçacık Etkileşim Şiddeti
<b>C<sub>u</sub></b>	Özdeş Olmayan Parçacık Etkileşim Şiddeti
<b>c</b>	Işık Hızı
<b>P</b>	Bağlı Momentum
<b>E/A</b>	Nükleon Başına Enerji
<b><math>\rho</math></b>	Yoğunluk
<b>MeV</b>	Mega Elektronvolt
<b>fm</b>	Femtometre



**BİRİNCİ BÖLÜM**  
**GİRİŞ**

Nükleer etkileşmeler, sonlu çekirdeklerin ve nükleer maddenin özelliklerini incelemekte kullanılan modellerin temelini oluşturur. Ağır iyon çarpışmaları (Bao-An Li vd., 2008; Danielewicz vd., 2002; Tsang vd., 2009) Tsang vd., 2009) gibi ultra yoğun olaylar ve nötron yıldızları ile süpernova patlamaları gibi astrofiziksel olaylar (Bethe, 1990; Burrows ve Lattimer, 1986; Hempel vd., 2012; Pons vd., 1999; Prakash vd., 1997; Strobel ve Weigel, 2001), teorik çalışmaları teşvik eden ve nükleer etkileşmelerin farklı yönlerini yansıtan olaylardır. Nükleon-nükleon saçılma verilerinden elde edilen gerçekçi nükleer etkileşmeler mikroskopik modellerde (Akmal vd., 1998; Baldo vd., 2001; Drischler vd., 2016; Fedoseew ve Lenske, 2015; Frick ve Müther, 2003; Friedman ve Pandharipande, 1981; Huber vd., 1998; Lagaris ve Pandharipande, 1981b; Wiringa vd., 1988) kullanılırken, fenomenolojik modeller (Bandyopadhyay vd., 1990; Basu, 2004; Chabanat vd., 1998; Moshfegh ve Mojarrad, 2011; Moustakidis, 2008; Müller ve Serot, 1996; Myers ve Swiatecki, 1996; Strobel vd., 1999; Xu vd., 2007) nükleer maddenin doyma özelliklerini ve deneysel nükleer taban durum denklemini elde etmek için parametreleri ayarlanmış ortalama alan (MF) yaklaşımını kullanılır.

Literatüre bakıldığında, nükleer maddenin özelliklerinin belirlenmesi üzerine birçok model ve çalışma vardır. Nükleer maddenin özellikleri hem non-relativistik modeller (Friedman ve Pandharipande, 1981; Lagaris ve Pandharipande, 1981b; Pandharipande ve Wiringa, 1979) hem de relativistik modeller (Lagaris ve Pandharipande, 1981a; Prakash ve Ainsworth, 1987; Shen vd., 1998) kullanılarak incelenmiştir. Literatürde bulunan nükleer madde hesaplamaları için çeşitli yaklaşımlar kullanmıştır. Bunları şöyle sınıflandırabiliriz: (i) non-relativistik ve kendinden tutarlı Dirac-Brueckner-Hartree-Fock (DBHF) şemaları (Brueckner vd., 1968; Day, 1978), (ii) varyasyonel yöntemler (Bircan, 2020; Friedman ve Pandharipande, 1981; Lagaris ve Pandharipande, 1981a; Manisa, 2012, 2016; Manisa, Atav, ve Sariaydın S., 2010; Manisa vd., 2005, 2015, 2017; Moshfegh ve Modarres, 2005), (iii) relativistik ortalama alan ve kiral sigma modelleri (Brian D. Serot ve John Dirk Walecka, 1986; Prakash ve Ainsworth, 1987), (iv) fenomenolojik Skyrme etkileşimi (Lattimer vd., 1985; Lattimer ve Ravenhall, 1978; Manisa, 2011) ve (v) Green Fonksiyon Monte Carlo (GFMC) (Weber ve Weigel, 1989).

Thomas-Fermi (TF) yaklaşımına uygun olarak, nükleer etkileşmelerin faz-uzayı yaklaşımı, yoğunluk bağımlı etkileşim terimlerini dikkate almayan en basit model ilk

olarak Seyler ve Blanchard (SB) tarafından tanıtılmıştır (Randrup ve de Lima Medeiros, 1991; Seyler ve Blanchard, 1961, 1963), bu durum "yeniden düzenleme etkileri" olarak adlandırılır. Bandyopadhyay ve Samaddar (Bandyopadhyay ve Samaddar, 1988; Müller ve Serot, 1996), nükleer maddenin termal özelliklerini incelemekte SB etkileşiminin yoğunluk bağımlı uzantısını önermişlerdir. Ayrıca, Myers ve Swiatecki (MS) (Myers ve Swiatecki, 1990, 1996, 1998), faz-uzayında ters-momentum bağımlılığını dahil ederek yoğunluk bağımlı SB etkileşiminin yeni bir versiyonunu formüle etmişlerdir, bu da sonlu çekirdeklerin ve nükleer maddenin özelliklerini tahmin etmek için kullanılmıştır. MS etkileşimi kullanılarak, nükleer maddenin termodinamiği üzerine farklı araştırmalar yapılmıştır. (Ghaemmaghami ve Mojarrad, 2022; Ghazanfari Mojarrad ve Mousavi Khoroshtomi, 2017; Moshfegh ve Mojarrad, 2011).

S. A. Ghaemmaghami ve ark. (Ghaemmaghami vd., 2023) 2023 yılında yaptıkları bir çalışmada, baryon-kuark faz geçişi (baryon-quark phase transition, PT) ve hibrit nötron yıldızı (hybrid neutron star, HNS) yapısındaki Seyler ve Blanchard temel etkileşiminin sonuçlarını, Myers ve Swiatecki tarafından önerilen yoğunluk bağımlı çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmıştır.

Nükleer madde özelliklerini incelemek için başka bir yaklaşım etkin (efektif) etkileşimleri kullanmaktır (J. Dabrowski, 1977; Khanna ve Barhai, 1975; M. Y. M. Hassan vd., 1978). Atom fiziğinde ortalama alan, ayarlanabilir parametreler olmadan elektrostatik kuvvetler kullanılarak üretilir. Nükleer fizikte ise durum farklıdır; nükleon-nükleon etkileşimi tek bir şekilde tanımlanmamıştır ve ayarlanabilir parametreler içerir. Bu, neden birçok etkili etkileşim ve yüzlerce parametrizasyon bulunduğunu açıklar. Myers ve Swiatecki (W. D. Myers ve W. J. Swiatecki, 1969), Thomas-Fermi (TF) yaklaşımı ile birlikte kullanıldığında doygunluğu sağlayan Seyler-Blanchard (SB) (Seyler ve Blanchard, 1963) potansiyelini nükleer madde çalışmalarında kullandılar. Hesaplamaların ek yaklaşımlar olmadan yapılabilmesine olanak tanıyan yeterince basit olduğunu buldular. Bandyopadhyay ve Samaddar (Bandyopadhyay ve Samaddar, 1988), üçlü cisim etkilerini simüle eden yoğunluk bağımlı bir terim içeren modifiye edilmiş SB potansiyelini önerdiler. Bu modifiye potansiyel, TF yaklaşımı kullanılarak simetrik nükleer madde özelliklerini ve nükleon-çekirdek optik potansiyelinin gerçek kısmını başarılı bir şekilde çoğalttı. Bandyopadhyay et al. (Bandyopadhyay vd., 1990), modifiye edilmiş SB potansiyellerini sonsuz ve sonlu nükleer sistemlerin termodinamik

özelliklerini incelemek için kullandılar. Etkili etkileşimin yoğunluk bağımlılığının, tek parçacık potansiyelinin enerji bağımlılığını doğru bir şekilde çoğaltmak için esas olduğunu buldular.

H. M. M. Mansour ve Kh. A. Ramadan (Mansour ve Ramadan, 1998) , modifiye edilmiş yoğunluğa bağlı bir Seyler-Blanchard potansiyeli kullanarak polarize nükleer maddenin bağlanma enerjisi, basınç gibi çeşitli özelliklerini elde etmişlerdir.

Bu tez çalışmanın ikinci bölümünde, nükleer madde tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde Seyler – Blanchard etkin etkilemesi sunulmuştur. Dördüncü bölümde Varyasyonel Monte Carlo yöntemi ve hesaplamalarımızda kullandığımız etkileşim potansiyeli, beşinci bölümde ise elde edilen araştırma sonuçları verilmiştir. Son bölümde bu çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve bundan sonra yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler getirilmiştir.



**İKİNCİ BÖLÜM**  
**NÜKLEER MADDE VE DENEYSEL ÖZELLİKLERİ**

Bir atomik çekirdeğin kütle numarası  $A$ , proton sayısı  $Z$  ve nötron sayısı  $N$ 'nin toplamı olarak ifade edilir. Protonlar ve nötronlar, kuarklar ve gluonların en düşük enerji bağlı halleridir. Bu parçacıkları bir araya getirdiğimizde, etkileşir, saçılır ve bazen güçlü etkileşimler sayesinde bağlı haller oluşturabilirler. Evren,  $A$  kütle numaraları 250'ye kadar çıkan çok çeşitli atomik çekirdekler içermektedir. Bu çekirdekleri birbirinden ayıran birçok ilginç özellik ve detay bulunmasına rağmen, çekirdeklerin temel yapısını anlamak için önemli ve faydalı birçok nükleer model ve teori vardır. Bilindiği üzere hiçbir nükleer model ya da teori çekirdeğin tüm özelliklerini doğru bir şekilde açıklayamamaktadır. Her model çekirdeğin belli özelliklerini açıklarken diğer özellikleri konusunda zayıf kalmaktadır. Çekirdeğin özellikleri, bir nükleonun diğer birçok nükleon ile etkileşerek oluşturduğu ortalama alan yaklaşımıyla belirlenebilir. Hartree-Fock Ortalama alan teorisi, düşük korelasyonlara sahip sistemlerle başa çıkmak için ana teorik araçtır. Bunun ötesinde, nükleon-nükleon korelasyonları Bethe-Goldstone denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemler, birçok parçacığın aynı kuantum durumunu işgal edemeyeceği Pauli dışarlama etkilerini hesaba kattığı için serbest uzay Schrödinger denkleminde farklıdır. Bu teorik araçlar, Coulomb etkileşmelerinin ihmal edildiği, eşit sayıda proton ve nötron bulunan nükleer madde örneğinde en iyi şekilde gösterilmektedir.

Nükleon ve nükleonların uyarılmış durumları nükleer madde içerisindeki etkileşen parçacıklardır. Nükleer madde tanımı, çok parçacık sistemlerinin özelliklerini incelemek ve inceleme yaparken hesaplamaları kolaylaştırmak için yapılmıştır. Bethe'nin tanımına göre nükleonlardan oluşan nükleer madde, protonlar arasındaki Coulomb kuvvetlerinin ihmal edildiği, proton ve nötron oranlarına göre ele alınan sonsuz bir çekirdektir (Bethe, 1971). Başka bir deyişle, nükleer madde teorisi sonlu çekirdeklerin davranışını incelemek için, çekirdek büyüklüğü sonsuza yaklaştığında ( $A \rightarrow \infty$  limitinde), proton ve nötronların oranının eşit olduğu bir durumu kabul eder.

Nükleer maddenin içindeki nötron ve proton sayısına göre şu tanımlamaları yapabiliriz: (i) nötron sayısı proton sayısına eşit ise simetrik nükleer madde, (ii) nötron sayısı proton sayısından farklıysa asimetric nükleer madde, (iii) çok parçacık sistemi sadece nötronlardan oluşuyorsa nötron maddesi denir. Kaan MANİSA ve arkadaşları simetrik nükleer madde, asimetric nükleer madde ve nötron maddesi üzerine birçok çalışma yapmıştır, detaylı bilgiye bu çalışmalardan ulaşılabilir (Bircan, 2020; Manisa, 2011, 2012, 2016; Manisa vd., 2005, 2010, 2015, 2017).

Nükleonlardan oluşan nükleer madde bir çok-parçacık sistemidir ve bir çok-cisim problemi olarak ele alınabilir. Nükleer madde gibi çok parçacıktan oluşmuş sistemlerin özelliklerini belirlemek yani çok-cisim problemini çözmek matematiksel olarak birçok zorluğu karşımıza çıkartır. Bu gibi durumlarda bazı mikroskobik yaklaşımlar nükleer fiziğin karmaşık doğası nedeniyle problemin çözümünü anlaşılabilir hale getirebilir. Bu sebeple böyle bir problemi çözmek ve sistemin özelliklerini belirlemek için nükleer madde teorisi çekirdek fiziğinin temel özelliklerini anlamak için daha uygun olabilir. Nükleer madde gibi bu tür modeller, nükleon-nükleon etkileşimlerinin genel yapısını ve etkileşim potansiyellerini dikkate alarak, çekirdeklerin özelliklerini açıklamakta daha etkili olabilir. Hatta sonsuz nükleer madde modelinden elde edilen sonuçlar sonlu çekirdeklerde de kullanılacak önemli bilgiler verir. Sonuç olarak nükleer madde teorisi ya da nükleer madde modelinin sağladığı bilgiler, nükleer fiziğin daha karmaşık yapılarının anlaşılmasına yardımcı olur ve bu tür modeller, deneysel verilerle karşılaştırıldığında güçlü bir çerçeve çizer (Manisa, 2003).

Nükleer maddenin deneysel özelliklerini doyma yoğunluğu, bağlanma enerjisi ve sıkıştırılmazlık olarak sıralayabiliriz. Bağlanma enerjisi ve denge yoğunluğu simetrik nükleer maddenin temel karakteristik özellikleridir. Sonlu çekirdeklerin ekstrapolasyonu ile nükleer maddenin deneysel olarak doyma noktası elde edilir. Nükleer maddenin denge yoğunluğu yada doyma yoğunluğu değeri  $\rho=0,16 \text{ fm}^{-3}$  olarak ağır iyonlar ile yapılan elektron saçılma deneylerinden elde edilmiştir. Aynı deney sonuçlarına göre bu doyma yoğunluğu değerine karşılık gelen fermi momentumu  $k_F$ 'nin 1,29 ile 1,44  $\text{fm}^{-1}$  değerleri arasında, bağlanma enerjisi ise  $-15$  ile  $-17$  MeV arasındadır. (Manisa, 2003)

Nükleer maddenin bir diğer önemli özelliği de sıkıştırılmazlıktır. Nükleer maddenin sıkıştırılmazlığı bazı karmaşık kütle formüllerinden kesin bir şekilde belirlenmemektedir. Literatürdeki belirtilen değerler 240 ile 300 MeV arasında değişmekte olup,  $\pm 50$  MeV hata tahminleriyle birlikte verilmektedir (Manisa vd., 2010).



**ÜÇÜNCÜ BÖLÜM**  
**SEYLER-BLANCHARD ETKİLEŞİMİ**

Nükleer maddenin durum denklemini ve dolayısıyla deneysel özelliklerini teorik olarak doğru bir şekilde elde etmek için ilk adım, etkin ve doğru bir nükleon-nükleon etkileşim potansiyeline sahip olmaktır. Seyler-Blanchard etkileşimi, nükleon-nükleon etkileşimleri açısından önemli bir etkileşme olup nükleer maddenin durum denkleminin elde edilmesinde kullanılan etkin nükleon-nükleon etkileşmelerinden birisidir.

Seyler-Blanchard etkileşim potansiyeli, nükleon-nükleon etkileşmelerinde önemli bir rol oynayan bir etkileşim potansiyelidir ve bu potansiyel belirli parametreler içerir. Bu parametreler, nükleer etkileşmelerin doğasını ve etkileşimlerin özelliklerini belirlemek için kritik öneme sahiptir. Seyler-Blanchard etkileşim potansiyelinden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak, etkileşim potansiyelinin içerdiği parametreler ayarlanabilir ve farklı nükleer durumların analizinde önemli bir araç olarak kullanılabilir.

Yukarıda kısaca nükleer etkileşmeler açısından öneminden bahsedilen, Seyler-Blanchard tarafından 1961 yılında tanımlanan ve kendi isimlerini taşıyan Seyler-Blanchard etkileşimi, ikinci dereceden momentuma bağlı bir terimle çarpılmış çekici bir Yukawa fonksiyonundan oluşur (Seyler ve Blanchard, 1961):

$$V(r, p) = -328,61 \frac{e^{(-r/a)}}{r/a} \left(1 - \frac{p^2}{b^2}\right) \quad (3.1)$$

Burada  $a=0,62567$  fm ve  $b=392,48$  MeV/c olarak veriliyor. Yukarıda tanımlanan bu etkileşme bizi bağlanma enerjisine yani nükleer maddenin durum denklemine (EOS) götürür (Mişicu, 2007):

$$\frac{E}{A}(\rho) = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{2/3} - \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) + \gamma \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{5/3} \quad (3.2)$$

Denklem (3.2) de,  $\rho^{(2/3)}$  ile orantılı birinci terim etkileşmeyen nükleonların kinetik enerjisini,  $\rho$  ile orantılı ikinci terim çekici Yukawa fonksiyonunun bağlanma enerjisini ve  $\rho^{(5/3)}$  ile orantılı üçüncü terim ise momentum bağımlılığından kaynaklanan kısa mesafelerdeki itmeyi temsil eder.

Myers ve Swiatecki yaptıkları bir çalışmada, Seyler-Blanchard etkileşimini, nükleonların artan bağıl momentumuyla birlikte şiddeti azalan ve "özdeş" ve "özdeş olmayan" nükleonlar arasında farklı büyüklükte olan bir Yukawa kuvvetinden oluştuğunu belirtmişler ve bu etkileşimi aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir (W. D. Myers ve W. J.

Swiatecki, 1969):

$$V(r, p) = -C_{l,u} \frac{e^{-(r/a)}}{r/a} [1 - (p / b)^2] \quad (3.3)$$

Burada:

V: iki-parçacık etkileşim potansiyeli

$C_{l,u}$ : etkileşmenin şiddeti (benzer nükleon çiftleri: nötron-nötron, proton-proton ve farklı nükleon çiftleri için: nötron-proton)

r : parçacıklar arasındaki mesafe

a: Yukawa kuvvetin menzili

p: parçacıkların bağıl momentumunun büyüklüğü

b: çekici kuvvetin ihmal edildiği ve kuvvetin itici hale geldiği bağıl momentumun kritik değeri

### Tablo 3.1: Myers ve Swiatecki'nin Yaptıkları Çalışmada Kullandıkları Etkileşim Parametreleri

(W. D. Myers ve W. J. Swiatecki, 1969)

Değeri	Özelliği
-15,677 MeV	E/A ( $\rho_0$ ), Bağlanma enerjisi
1,20249 fm	$r_0$ , nükleer yarıçap sabiti
367,56 MeV	$C_l$ , özdeş parçacık etkileşim şiddeti
289,66 MeV	$C_u$ , özdeş olmayan parçacık etkileşim şiddeti
0,62567 fm	a, etkileşim menzili
392,48 MeV/c	b, etkileşmenin kritik momentum değeri

Myers ve Swiatecki özel olarak, Tablo 1'deki değerleri kullanarak denklem (3.2) de verilen durum denklemindeki sabitleri  $\alpha = 19,88$  MeV,  $\beta = 69,02$  MeV ve  $\gamma = 33,46$  MeV olarak elde etmişlerdir. Nükleer maddenin sıkıştırılmazlığını ise  $K = 294,8$  MeV olarak elde etmişlerdir (W. D. Myers ve W. J. Swiatecki, 1969).

Bizde bu tez çalışmasında dikkatimizi denklem (3.2) üzerinde toplayarak, ilk olarak denklem (3.2)'in sol tarafındaki yoğunluğa bağlı nükleon başına bağlanma enerji değerlerini çeşitli yoğunluklar için Varyasyonel Monte Carlo (VMC) hesaplamalarından

elde ettik. Daha sonra VMC den elde ettiğimiz bu değerleri ve doyma yoğunluğunu denklem (3.2) de verilen bağlanma enerjisine fit ederek Blanchard parametreleri olarak adlandırılan  $\alpha$ ,  $\beta$ , ve  $\gamma$  şeklindeki üç parametreyi bulduk. Daha sonra VMC hesaplamalarımızdan bulduğumuz bu üç yeni Blanchard parametresini denklem (3.2) de nükleer maddenin durum denkleminde kullanarak nükleer maddenin bağlanma enerjisini ve doyma yoğunluğunu elde ettik.

Varyasyonel Monte Carlo yöntemi, VMC hesaplamaları ve hesaplamalardan elde edilen sonuçlar bir sonraki bölüm olan 4.bölümde verilmektedir.





**DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**  
**MONTE CARLO YÖNTEMİ**

Kuantum Monte Carlo yöntemleri, kuantum çok-cisim sistemlerin özelliklerini hesaplamak için geliştirilmiştir. Motivasyon temel olarak klasik sistemlerle aynıdır. Özellikle sistemler daha karmaşık hale geldikçe, klasik çok-cisim sistemlerinde doğrudan simülasyonlar çok-cisim etkileri hakkında tamamen güvenilir bilgi edinmenin tek yolu olmuştur. Kuantum sistemleri, belirli sınır koşullarında (örneğin yüksek sıcaklıklarda) klasik sistemlere indirgenir, dolayısıyla klasik sistemler için simülasyona ihtiyaç varsa, kuantum sistemlerinin özelliklerini hesaplamak için de simülasyona ihtiyaç vardır. Kuantum simülasyonları, çok boyutlu bir uzayı örnekleme sorunlarının yanı sıra, örneklenecek fonksiyon için analitik bir ifade bulunmaması nedeniyle klasik simülasyonlardan daha zordur. Simülasyon, her iki görevi de başarmalıdır (David M. Ceperley ve Lubos Mitas, 1996).

Kuantum Monte Carlo'nun çok-cisim kuantum sistemlerinin özellikleri üzerinde kesin sonuçlar veya en azından kesin kısıtlamalar sağlama konusunda faydalı olacağı beklentisi vardır. Ancak, birkaç durum dışında, bu beklenti günümüzde tam olarak gerçekleşmemektedir. Fermiyon istatistikleri, simülasyon teknikleri uygulayıcıları için bir zorluk olmaya devam etmektedir. Yine de elde edilen sonuçlar, kuantum sistemleri için kullanılan diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlarla rekabet edebilir ve kuantum sistemlerinin özelliklerinin kökenine dair bilgiler sunmaktadır (David M. Ceperley ve Lubos Mitas, 1996).

Çok elektronlu sistemler, sıvı helyum ve çekirdekdeki protonlar ve nötronlar gibi kuantum çok parçacıklı sistemler için Schrödinger denklemini çözmek için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi Monte Carlo dur. Monte Carlo Yöntemi rastgele sayıların kullanımına dayalı bir tekniktir. Bu yöntem klasik çok parçacık sistemlerine uygulanabildiği gibi çok parçacıktan oluşan kuantum sistemlerine de uygulanabilir. Bir kuantum sisteminin taban durum enerjisinin beklenen değeri Monte Carlo teknikleriyle hesaplanabilir. Bu durum, değişken (varyasyonel) tipte bir yaklaşımda, bir deneme dalga fonksiyonu ayarlanarak bu beklenen değeri optimize etmek için kullanılır, bundan dolayı bu Monte Carlo yöntemine Varyasyonel Monte Carlo Yöntemi (Variational Monte Carlo Method, VMC) adı verilir. (Thijssen, 2007).

Klasik parçacık difüzyon sürecini simüle ederek, etkileşen kuantum mekaniksel parçacıklardan oluşan bir sistemin özelliklerini hesaplamak için Schrödinger denklemi ile difüzyon denklemi arasındaki benzerliğin kullanıldığı Monte Carlo yöntemine de

Difüzyon Monte Carlo (Diffusion Monte Carlo, DMC) adı verilir (Thijssen, 2007).

Diğer bir Monte Carlo yöntemi de, Dirac tarafından ileri sürülen fikirlere dayalı olarak Feynman tarafından geliştirilen bir formülasyon olan kuantum mekaniğinin yol-integral formalizmini kullanan Yol integral Monte Carlo yöntemi (Path-Integral Monte Carlo, PIMC) dir. (Thijssen, 2007)

#### 4.1. VARYASYONEL MONTE CARLO

Kuantum Monte Carlo yöntemlerinin ilki ve en basiti olan Varyasyonel Monte Carlo (VMC) yöntemidir. Varyasyonel Monte Carlo yöntemi ilk olarak McMillan (McMillan, 1965) tarafından sıvı Helyumun taban durum özelliklerini hesaplamak için kullanılmış ve ardından Ceperley ve diğerleri (Ceperley vd., 1977) tarafından fermiyon sistemlerine genelleştirilmiştir.

Nükleer maddenin özelliklerini elde etmek için yaptığımız varyasyonel Monte Carlo hesaplamamızda, periyodik sınır koşullarına sahip  $N$  nükleon içeren  $L$  kenarlı kübik bir kutu göz önünde bulundurduk. Bu tez çalışmasında kullanılan deneme dalga fonksiyonu Jastrow tipi bir dalga fonksiyonudur:

$$\psi_j(\vec{R}) = \prod_{i<j} f_j(r_{ij})\phi \quad (4.1)$$

burada  $\phi$  etkileşmeyen parçacıklar sistemi için çok parçacıklı dalga fonksiyonudur ve  $\vec{R}$  parçacıkların koordinatlarını temsil eden  $3N$  boyutlu bir vektördür,  $f_j$  ise iki parçacıklı korelasyon fonksiyonudur. Jastrow bu korelasyon fonksiyonunun genel olarak bir operatör fonksiyonu olacağını öne sürmektedir (Jastrow R., 1955). Ancak çoğu uygulamada  $f_j$ 'nin sadece parçacıklar arası mesafeye bağlı olduğu varsayılır,  $r_{ij} = |r_i - r_j|$ . Aslında nükleer madde için etkileşim potansiyeli operatöre bağlıdır ve korelasyon fonksiyonları da öyledir. Böyle bir operatöre bağlı korelasyon fonksiyonunun kullanılması, problemi hesaplama olanaklarımız dahilinde mümkün kılmayan aşırı bir sayısal çaba gerektirecektir. Bu nedenle korelasyon fonksiyonunun sadece parçacıklar arası mesafeye bağlı olduğunu varsaydık. Nükleer madde içindeki nükleonların tek parçacık dalga fonksiyonları için düzlem dalgalar  $\phi(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}$  kullanılabilir. Nükleonları  $L$  kenarlı kübik bir kutuyla sınırlandırılmış olarak düşündüğümüzden,  $\vec{k} = 2\pi\vec{n} / L$  ve  $\vec{n}$  bir tamsayı vektördür.

Nükleer kuvvetler kısa menzillidir ve çok hızlı bir şekilde doyuma ulaşır, bu nedenle radyal dağılım fonksiyonunun çok uzun menzilli korelasyonlara sahip olması beklenmez, bu nedenle denklem (4.1)'daki iki parçacık korelasyon fonksiyonu  $f_j$  için aşağıdaki formda bir fonksiyon kullanıyoruz

$$f_j(r) = \left[ \frac{1}{1+e^{(r_0-r)/a}} \right] \quad (4.2)$$

burada  $t$ ,  $r_0$  ve  $a$  varyasyonel parametrelerdir. Pratik nedenlerden dolayı  $f_j(r_{ij}) = \exp(-u(r_{ij}))$  olacak şekilde bir potansiyel  $u(r)$  tanımlarsak varyasyonel dalga fonksiyonumuz şöyle olur:

$$\psi_j = e^{-\sum_{i<j} u(r_{ij})} \phi(R) \quad (4.3)$$

Metropolis yöntemi ile oluşturulan rastgele bir adım kullanarak  $3N$  boyutlu uzayı olasılık dağılımı ile örnekliyoruz

$$\frac{|\psi(R)|^2}{\int dR |\psi(R)|^2} \quad (4.4)$$

Yukarıda verilen yöntem, Ceperley ve diğerleri (Ceperley vd., 1977) tarafından fermiyonlar için tanımlanan VMC yönteminin biraz değiştirilmiş bir versiyonudur. Ayrıca, bu formda bir deneme dalga fonksiyonunun kullanımını ayrıntılı olarak çalışmalarında tartışmışlardır.

Herhangi bir  $F$  operatörünün beklenen değeri,  $M$  hareketli rastgele adımın koordinatları için değerlendirilen operatörün ortalama değeridir:

$$\langle F \rangle = \frac{\int d\vec{r} \Psi^*(\vec{r}) F(\vec{r}) \Psi(\vec{r})}{\int d\vec{r} |\Psi(\vec{r})|^2} \cong \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M F(\vec{r}_i) \quad (4.5)$$

Sistemin toplam enerjisi bu yaklaşım kullanılarak hesaplanır.

## 4.2. ETKİLEŞİM POTANSİYELİ

$V_{ij}$  İki cisim etkileşim potansiyeli ile etkileşen  $N$  parçacıklı serbest bir sistemin Hamiltonyen operatörü şu şekilde yazılabilir:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \sum \nabla_i^2 + \sum V_{ij} \quad (4.6)$$

Prensip olarak, iki cisim etkileşim potansiyeli biliniyorsa böyle bir sistemin tüm

temel durum özellikleri belirlenebilir. Bununla birlikte, nükleon-nükleon etkileşiminin tam olarak doğası hala bilinmemektedir. Nükleon-nükleon etkileşimini tanımlamak için önerilen birçok gerçekçi model potansiyel vardır. Bu gerçekçi potansiyellerin parametreleri, döteron için doğru bağlanma enerjisini elde edecek şekilde ve nükleon saçılma deneylerinde elde edilen faz kayması verilerine uyarlanarak belirlenir. Faz kayması verileri kanaldan kanala büyük farklılıklar gösterir ve operatör bileşenlerine sahip olmak gerekir. Biz bu tez çalışmasında, Lagaris ve Pandharipande tarafından önerilen ve 14 operatör bileşeni içeren Urbana V14 potansiyelini kullanıyoruz. Potansiyelin parametreleri, düşük enerjili nükleon-nükleon saçılma deneylerinden elde edilen faz kayması verilerine ve döteronun özelliklerine uyarlanarak elde edilmiştir (Lagaris ve Pandharipande, 1981b):

$$\begin{aligned}
V_{ij} = & V^c + V^\sigma (\sigma_i \cdot \sigma_j) + V^\tau (\tau_i \cdot \tau_j) + V^{\sigma\tau} (\sigma_i \cdot \sigma_j) (\tau_i \cdot \tau_j) + V^t S_{ij} + \\
& V^{i\tau} S_{ij} (\tau_i \cdot \tau_j) + V^b (L \cdot S) V^{b\tau} (L \cdot S)_{ij} (\tau_i \cdot \tau_j) + V^q L^2 + V^{q\sigma} L^2 (\tau_i \tau_j) + \\
& V^{q\tau} + V^{b\tau} (L \cdot S)_{ij} (\tau_i \cdot \tau_j) + V^q L^2 + V^{q\sigma} L^2 (\tau_i \tau_j) + V^{q\tau} L^2 (\tau_i \tau_j) + \\
& V^{q\sigma\tau} L^2 (\sigma_i \cdot \sigma_j) (\tau_i \tau_j) + V^{bb} (L \cdot S)^2 + V^{bb\tau} (L \cdot S)^2 (\tau_i \tau_j) \quad (4.7)
\end{aligned}$$

Sonsuz nükleer maddenin öteleme değişmezliği nedeniyle, görelî açısal momentum operatörü  $\vec{L}$  'ye bağlı terimler bağlanma enerjisini önemli ölçüde etkilemez. Ayrıca, son terimlerin katkıları ilk dört terimden çok daha küçüktür ve bunların değerlendirilmesi çok daha fazla sayısal hesaplama ve çaba gerektirdiğinden problemi içinden çıkılmaz hale getirmektedir. Biz bu nedenle Urbana potansiyelinin sadece ilk dört terimini beklenen değer hesaplamalarımızda kullandık. Dolayısıyla hesaplamalarımızda kullandığımız iki cisim etkileşimi

$$V_{ij} = V^c + V^\sigma (\sigma_i \cdot \sigma_j) + V^\tau (\tau_i \cdot \tau_j) + V^{\sigma\tau} (\sigma_i \cdot \sigma_j) (\tau_i \cdot \tau_j) \quad (4.8)$$

Şeklindedir. Burada  $V^c, V^\sigma, V^\tau$  ve  $V^{\sigma\tau}$  terimleri sadece  $i$  ve  $j$  nükleonları arasındaki mesafeye bağlıdır.

**Tablo 4.1: Urbana V14 Nükleon-Nükleon Etkileşim Potansiyelinin Parametreleri**

$l$	$l^i$	$S^i$
C	-5,7030	2575,30
$\sigma$	0,7628	-366,56
$\tau$	0,8892	-466,56
$\sigma \cdot \tau$	-0,2790	402,81

$$C=0,2 \text{ fm}^{-2}, R=0,5 \text{ fm}, a = 0,2 \text{ fm}$$

Denklem (4.7) de verilen Urbana etkileşim potansiyelindeki her bir terim üç bölümden oluşur:

$$V^i = V_{\Pi}^i + V_I^i + V_S^i \quad (4.9)$$

$(V_{\Pi}^i)$ , uzun menzilli,  $(V_I^i)$  orta menzilli ve  $(V_S^i)$  kısa menzilli etkileşimleri temsil eder. Etkileşimin uzun menzilli kısmı  $(V_{\Pi}^i)$  yalnızca  $i = \sigma\tau$  için sıfır değildir ve şu şekilde verilir:

$$V_{\Pi}^{\sigma\tau} = 3,488 \frac{e^{-\mu r}}{\mu r} (1 - e^{-cr^2}) \quad (4.10)$$

Burada  $\mu = 0,7 \text{ fm}^{-1}$  pionlar için ters compton dalga boyudur. Orta ve kısa menzilli kısımlar sırasıyla şu şekilde verilir:

$$V_I^i(r) = l^i \left[ \left( 1 + \frac{3}{\mu r} + \frac{3}{(\mu r)^2} \right) \frac{e^{-\mu r}}{\mu r} (1 - e^{-cr^2}) \right]^2 \quad (4.11)$$

ve

$$V_S^i(r) = \frac{S^i}{1 + e^{(r-R)/a}} \quad (4.12)$$

Lagaris ve Pandharipande (Lagaris ve Pandharipande, 1981b) tarafından verilen  $l^i$  ve  $S^i$  potansiyel şiddet değerleri ve  $c$ ,  $R$ ,  $a$  parametreleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir. Üç ve daha fazla cisim etkileşimi kabul edilebilir ve doğru bir nükleer madde hesaplamasına dahil edilmelidir. Çünkü, birçok iki cisim etkileşimleri (Freedman, 1977; James M. Lattimer ve D. G. Ravenhall, 1978; Lagaris ve Pandharipande, 1981a; Walecka,

1974) ile yapılan nükleer madde çalışmalarının hiçbiri nükleer maddenin tüm özelliklerini tek başına açıklayamamıştır. Ayrıca, tüm iki nükleon etkileşim modelleri nükleer madde için çok büyük bir denge yoğunluğu vermektedir. Yüksek yoğunluklarda aşırı bağlanma gözlemleri, iki cisim etkileşimlerinin kısa menzilli itici kısmının yüksek yoğunluklarda daha etkili olması gerektiğini göstermektedir. Bu hususlar akılda tutularak, üç (ve daha fazla) cisim etkileşimi, literatürdeki diğer birçok çalışmada bulunan potansiyelde yoğunluğa bağlı terimlerle temsil edilmiştir (Lagaris ve Pandharipande, 1981a; P. Roy Chowdhury ve D.N. Basu, 2006). Yoğunluğa bağlı bu üç-cisim etkileşme terimi, nükleer maddenin doğru bağlanma enerjisini ve doyma yoğunluğunu elde etmek için uyarlanan birkaç serbest parametre içerir. Buna fenomenolojik yaklaşım denir ve hassas bir temelde tatmin edici değildir. Üç cisim etkileşimlerinin daha iyi bir tanımı, bazı potansiyel model parametrelerinin (örneğin iki pion değişimi, mezon değişimi) hafif çekirdeklerin bağlanma enerjilerine, form faktörlerine ve simetrik nükleer maddenin doyma noktası verilerine uyarlanmasıyla elde edilebilir. Bu durumda bile, Urbana IX üç nükleon etkileşiminde olduğu gibi simetrik nükleer maddenin doğru doyma davranışını üretmek için fenomenolojik bir potansiyel terimi gerekli olabilir (Akmal ve Pandharipande, 1997). Biz bu çalışmamızda yukarıda bahsettiğimiz nedenlerle, yoğunluğa bağlı terimin Urbana potansiyelinin kısa mesafeli kısmıyla orantılı olduğunu varsayan fenomenolojik yaklaşımı kullanıyoruz ve çok-cisim etkileşmelerini de dahil ederek toplam etkileşime potansiyelimizi aşağıdaki formda kullanıyoruz:

$$V_{14} + TN1 = V_{\Pi} + V_1 + V_s + V_s(A\rho)^B \quad (4.13)$$

Burada  $\rho$  nükleonların yoğunluk sayısıdır. Yukarıdaki denklemde A ve B, nükleer maddenin doğru doyma yoğunluğunu ve bağlanma enerjisini elde etmek için kullanılan serbest parametrelerdir.



**BEŞİNCİ BÖLÜM**  
**ARAŞTIRMA SONUÇLARI**

### 5.1. VARYASYONEL MONTE CARLO HESAPLAMALARINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu bölümde, nükleer madde için Varyasyonel Monte Carlo hesaplamalarından elde ettiğimiz sonuçları sunuyoruz. Nükleer maddenin yoğunluğa bağlı nükleon başına toplam enerji değerlerini ve nükleer maddenin doğru doyma noktasını elde etmek için hesaplamamızda fenomenolojik üç nükleon etkileşimi için parametreler  $A = 1,99$  ve  $B = 2,07$  olarak kullanıldı.  $0,02$  adımla  $\rho = 0,02 \text{ fm}^{-3}$  ile  $\rho = 0,20 \text{ fm}^{-3}$  arasındaki yoğunluklarda nükleon başına toplam enerji değerlerini elde ettik. Bu verilerden, nükleer maddenin doyma yoğunluğunu ve bu yoğunluğa karşılık gelen bağlanma enerjisini elde ettik. Yoğunluklara karşılık gelen enerji değerleri Tablo 5.1 de verilmektedir.

**Tablo 5.1: Varyasyonel Monte Carlo Yöntemiyle Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerji Değerleri**

$\rho$ ( $\text{fm}^{-3}$ )	E/A (MeV)	$\rho$ ( $\text{fm}^{-3}$ )	E/A (MeV)
0,01	0,43055	0,15	-16,40952
0,02	-0,61660	0,16	-16,44442
0,03	-1,94770	0,17	-16,24616
0,04	-3,47116	0,18	-15,75371
0,05	-5,04431	0,19	-14,95511
0,06	-6,67665	0,20	-13,78969
0,07	-8,22716	0,21	-12,28276
0,08	-9,76020	0,22	-10,32876
0,09	-11,17866	0,23	-7,98767
0,10	-12,46503	0,24	-5,19568
0,11	-13,64167	0,25	-2,03855
0,12	-14,63654	0,26	1,60604
0,13	-15,45813	0,27	5,77242
0,14	-16,05123	0,28	10,38412

Nükleer maddenin doyma yoğunluğunu hesaplamalarımızdan  $\rho=0,16 \text{ fm}^{-3}$  ve bu yoğunluğa karşılık gelen nükleer maddenin bağlanma enerjisini de  $E = -16,44 \text{ MeV}$  olarak elde ettik. Elde ettiğimiz bu sonuçlar, deneysel değerlerle ve literatürdeki farklı

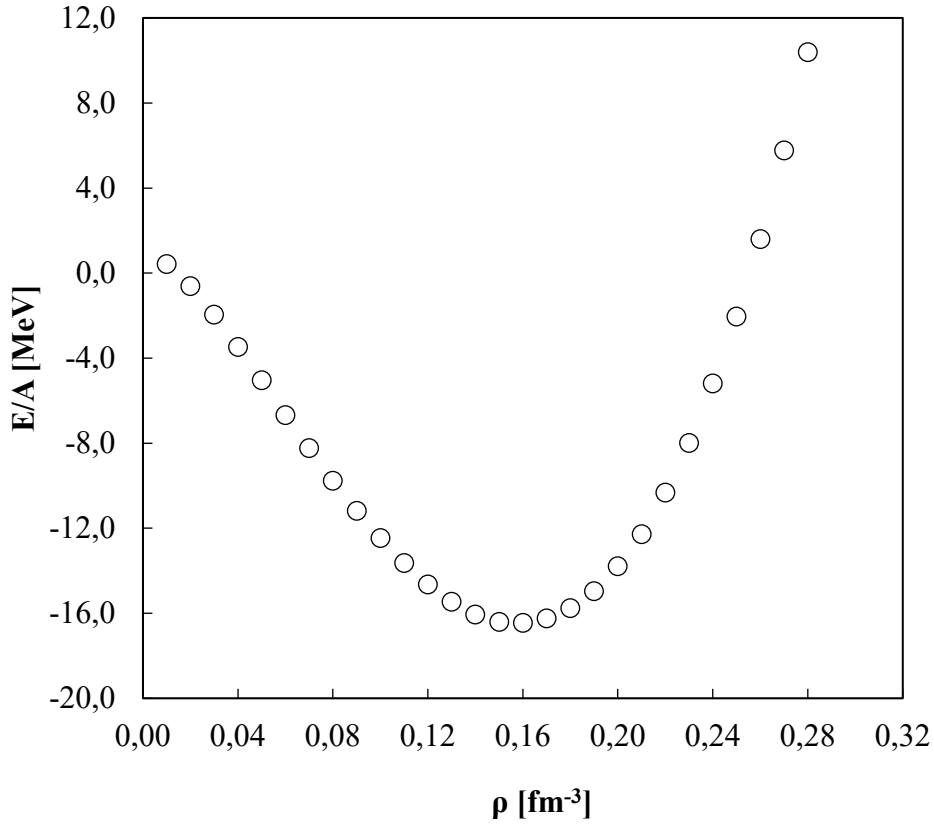
yöntem ve metotlarla elde edilmiş değerlerle Tablo 5.2 de kıyaslanmaktadır. Tablo 5.2 incelendiğinde nükleer madde için VMC den elde ettiğimiz sonuçların hem deneysel verilerle hem de literatürdeki değerlerle uyum içinde olduğu görülmektedir.

Şekil 5.1, nükleer madde için nükleon başına toplam enerjinin yoğunluğa bağlı değişimini göstermektedir. Literatürde nükleon başına toplam enerjinin yoğunluğa bağımlılığı nükleer maddenin durum denklemi olarak tanımlanır. (Manisa, Atav, ve Sarıaydın, 2010)

**Tablo 5.2: Literatürdeki Araştırmacılar Tarafından Nükleer Madde İçin Elde Edilen Doyma Yoğunluğu, Fermi Momentumu, Bağlanma Enerjisi Değerleri ve VMC Sonuçları**

$\rho$ (fm <sup>-3</sup> )	E (MeV)	Kaynak
0,33219	-25,00	(Wiringa ve Pandharipande, 1979)
0,15891	-16,00	(Friedman ve Pandharipande, 1981)
0,1589	-16,00	(Lagaris ve Pandharipande, 1981a)
0,30373	-17,20	(Lagaris ve Pandharipande, 1981a)
0,33219	-17,50	(Wiringa ve Pandharipande, 1981)
0,18553	-15,00	(Horowitz ve Serot, 1987)
0,27695	-17,80	(B.D. Day ve R. B.Wiringa, 1985)
0,33219	-16,60	(B.D. Day ve R. B.Wiringa, 1985)
0,174	-15,72	(Huber vd., 1994)
0,162	-13,73	(Huber vd., 1994)
0,153	-15,30	(Jena ve Deo, 1996)
0,16114	-16,23	(Myers ve Swiatecki, 1998)
0,192	-13,74	(Atav ve Oğul, 2000)
0,17	-17,00	(Mansour vd., 2018)
0,16	-16,00	(Hassaneen, 2017)
0,16	-16,09	(Togashi vd., 2014)
0,16	-16,06	(Manisa vd., 2005)
0,151	-15,69	(Manisa vd., 2015)
0,16	-16,44	VMC sonuçları (bu çalışma)
0.145-0.20	-15 MeV ile -17 MeV arası	Deneysel değerler (Day, 1978)

**Şekil 5.1:** VMC'den Elde Edilen Toplam Enerjinin Yoğunlukla Değişimi



## 5.2. SEYLER – BLANCHARD PARAMETRELERİNİN ELDE EDİLMESİ

Bir önceki kesimde, Varyasyonel Monte Carlo hesaplamalarımızdan elde ettiğimiz doyma yoğunluğu ve bu yoğunluğa karşılık gelen nükleer maddenin bağlanma enerjisini literatürdeki çalışmalarla ve deneysel verilerle kıyaslayarak, hesaplamalarımızın kabul edilebilirliğini göstermiş olduk.

Bu kesimde ilk olarak VMC den elde edilen bu değerleri ve doyma yoğunluğunu denklem (3.2) de verilen bağlanma enerjisine fit ederek Seyler-Blanchard parametreleri olarak adlandırılan  $\alpha$ ,  $\beta$ , ve  $\gamma$  şeklindeki üç parametreyi bulduk. Daha sonra VMC hesaplamalarımızdan bulduğumuz bu üç yeni Seyler-Blanchard parametresini denklem (3.2) de nükleer maddenin durum denkleminde kullanarak nükleer maddenin bağlanma enerjisini ve doyma yoğunluğunu elde ettik. Hesaplamalarımızdan elde ettiğimiz Seyler-Blanchard parametreleri Tablo 5.3 de verilmektedir. 3.bölümde bahsettiğimiz üzere

Myers ve Swiatecki Seyler – Blanchard Parametrelerini  $\alpha = 19,88$  MeV,  $\beta = 69,02$  MeV ve  $\gamma = 33,46$  MeV olarak elde etmişlerdir. (W. D. Myers ve W. J. Swiatecki, 1969).

**Tablo 5.3: Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Seyler-Blanchard Parametreleri**

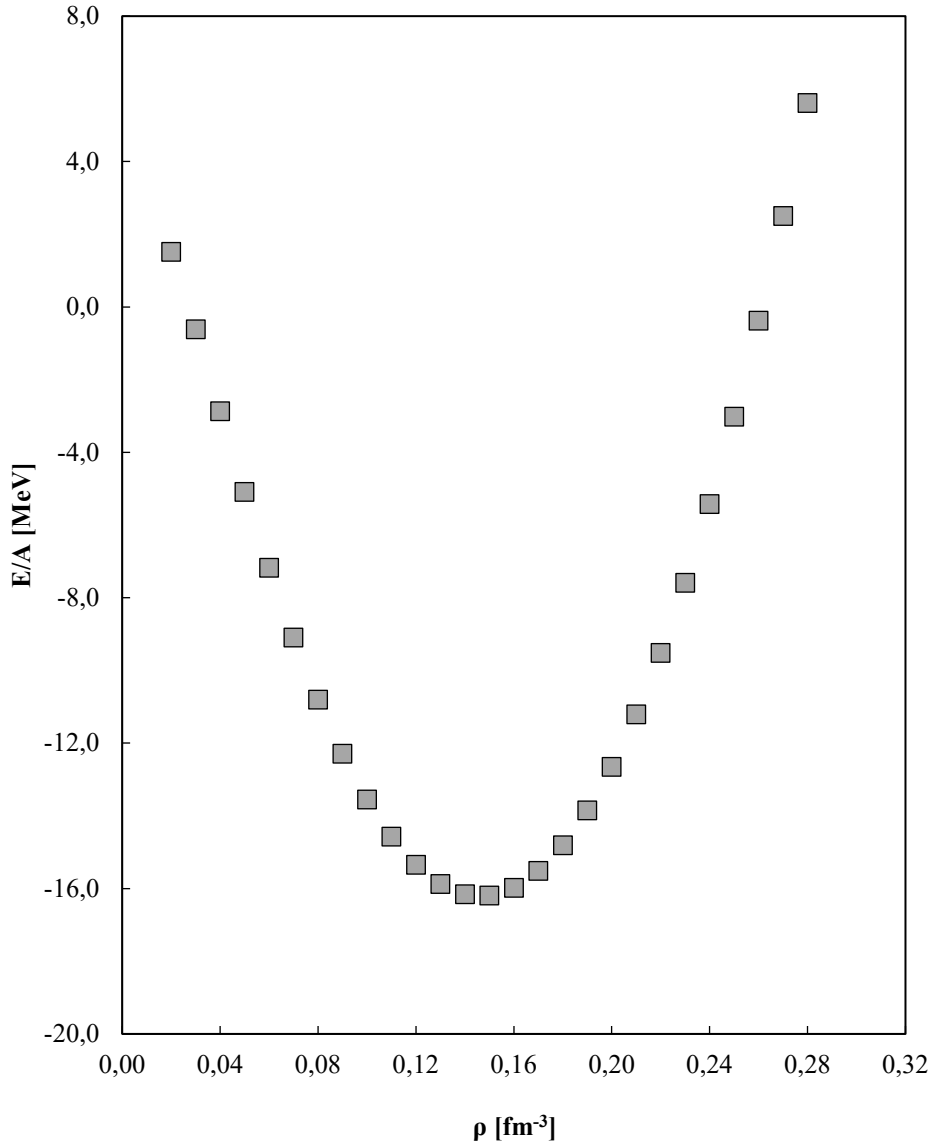
$\alpha$	83,2560 MeV
$\beta$	172,5896 MeV
$\gamma$	73,3376 MeV

Tablo 5.3 de verilen değerler kullanılarak elde edilen, nükleer maddenin nükleon başına toplam enerji değerleri Tablo 5.4 de verilmiştir. Şekil 5.2 de de nükleer madde için nükleon başına toplam enerjinin yoğunluğa bağlı değişimi gösterilmektedir.

**Tablo 5.4: Bu Çalışmada Elde Edilen Yeni Seyler-Blanchard Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerji Değerleri**

$\rho$ ( $\text{fm}^{-3}$ )	E/A (MeV)	$\rho$ ( $\text{fm}^{-3}$ )	E/A (MeV)
0,01	3,044	0,15	-16,189
0,02	1,516	0,16	-15,975
0,03	-0,609	0,17	-15,512
0,04	-2,868	0,18	-14,802
0,05	-5,084	0,19	-13,846
0,06	-7,174	0,20	-12,645
0,07	-9,088	0,21	-11,200
0,08	-10,799	0,22	-9,513
0,09	-12,289	0,23	-7,585
0,10	-13,548	0,24	-5,418
0,11	-14,568	0,25	-3,013
0,12	-15,344	0,26	-0,373
0,13	-15,874	0,27	2,503
0,14	-16,156	0,28	5,612

**Şekil 5.2:** Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunlukla Değişimi



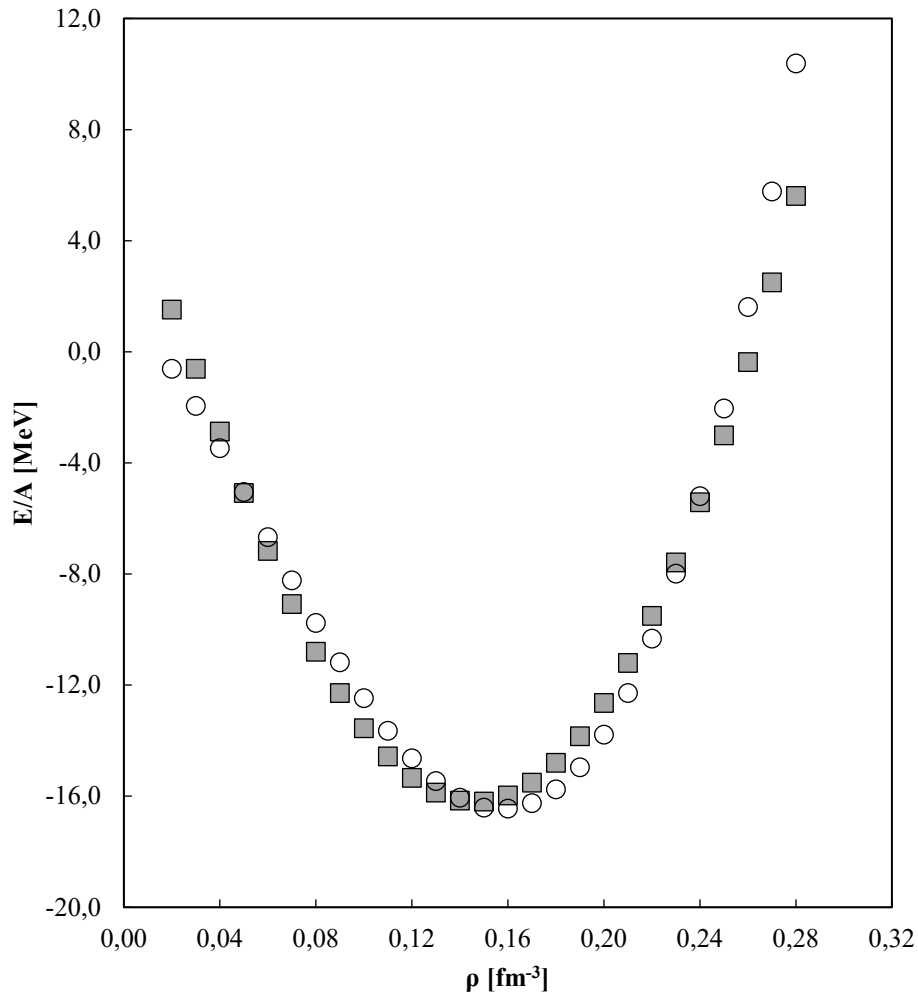
Elde ettiğimiz yeni Seyler-Blanchard parametrelerini durum denkleminde kullanarak nükleer maddenin doyma yoğunluğunu  $\rho=0,16 \text{ fm}^{-3}$  ve bu yoğunluğa karşılık gelen nükleer maddenin bağlanma enerjisini de  $E = -15,975 \text{ MeV}$  olarak elde ettik. Tablo 5.2'deki değerlerle bu elde ettiğimiz sonuçların karşılaştırılması Tablo 5.5 de verilmektedir. Yeni Seyler-Blanchard parametreleri ile elde ettiğimiz sonuçlar, VMC den elde ettiğimiz sonuçlarla, deneysel verilerle ve literatürdeki değerlerle uyum içinde olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.5: Literatürdeki Araştırmacılar Tarafından Nükleer Madde İçin Elde Edilen Doyma Yoğunluğu, Fermi Momentumu, Bağlanma Enerjisi Değerleri ve Bu Çalışma**

$\rho$ (fm <sup>-3</sup> )	E (MeV)	Kaynak
0,33219	-25,00	(Wiringa ve Pandharipande, 1979)
0,15891	-16,00	(Friedman ve Pandharipande, 1981)
0,1589	-16,00	(Lagaris ve Pandharipande, 1981b)
0,30373	-17,20	(Lagaris ve Pandharipande, 1981b)
0,33219	-17,50	(Wiringa ve Pandharipande, 1981)
0,18553	-15,00	(Horowitz ve Serot, 1987)
0,27695	-17,80	(B.D. Day ve R. B.Wiringa, 1985)
0,33219	-16,60	(B.D. Day ve R. B.Wiringa, 1985)
0,174	-15,72	(Huber vd., 1994)
0,162	-13,73	(Huber vd., 1994)
0,153	-15,30	(Jena ve Deo, 1996)
0,16114	-16,237	(Myers ve Swiatecki, 1998)
0,192	-13,74	(Atav ve Oğul, 2000)
0,17	-17,00	(Mansour vd., 2018)
0,16	-16,00	(Hassaneen, 2017)
0,16	-16,09	(Togashi vd., 2014)
0,16	-16,06	2005(Manisa vd., 2005)
0,151	-15,69	2015(Manisa vd., 2015)
0,16	-16,44	VMC sonuçları (bu çalışma)
0,16	-15,975	Bu çalışma, Seyler-Blanchard
0,145-0,20	(-15 MeV) ile (-17 MeV) arası	DeneySEL değerler (Day, 1978)

Nükleer madde için hem Varyasyonel Monte Carlo hesaplamalarından hem de elde ettiğimiz yeni Seyler-Blanchard parametreleriyle elde edilen nükleon başına toplam enerjinin yoğunluğa bağlı değişimi Şekil 5.3 de kıyaslanmaktadır.

**Şekil 5.3:** Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi. İçi Boş Daireler Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Değerleri, İçi Dolu Kareler İse Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri Göstermektedir.



Şekil 5.1’de nükleer madde için Varyasyonel Monte Carlo hesaplamalarımızdan elde ettiğimiz enerji değerlerimizin, doyma yoğunluğumuzun ve bağlanma enerjisinin doğruluğunu kabul etmek için literatürdeki sonuçlarla ve deneysel verilerle kıyaslamıştık. Bu kıyaslama Seyler-Blanchard parametrelerinin nükleer madde için doğru bir şekilde elde edilmesi bakımından önemliydi. Diğer önemli nokta da, elde edilen yeni Seyler-Blanchard parametreleri kullanılarak hesaplanacak nükleon başına toplam enerji değerlerinin Varyasyonel Monte Carlo hesaplamalarından elde edilenlerle tutarlı

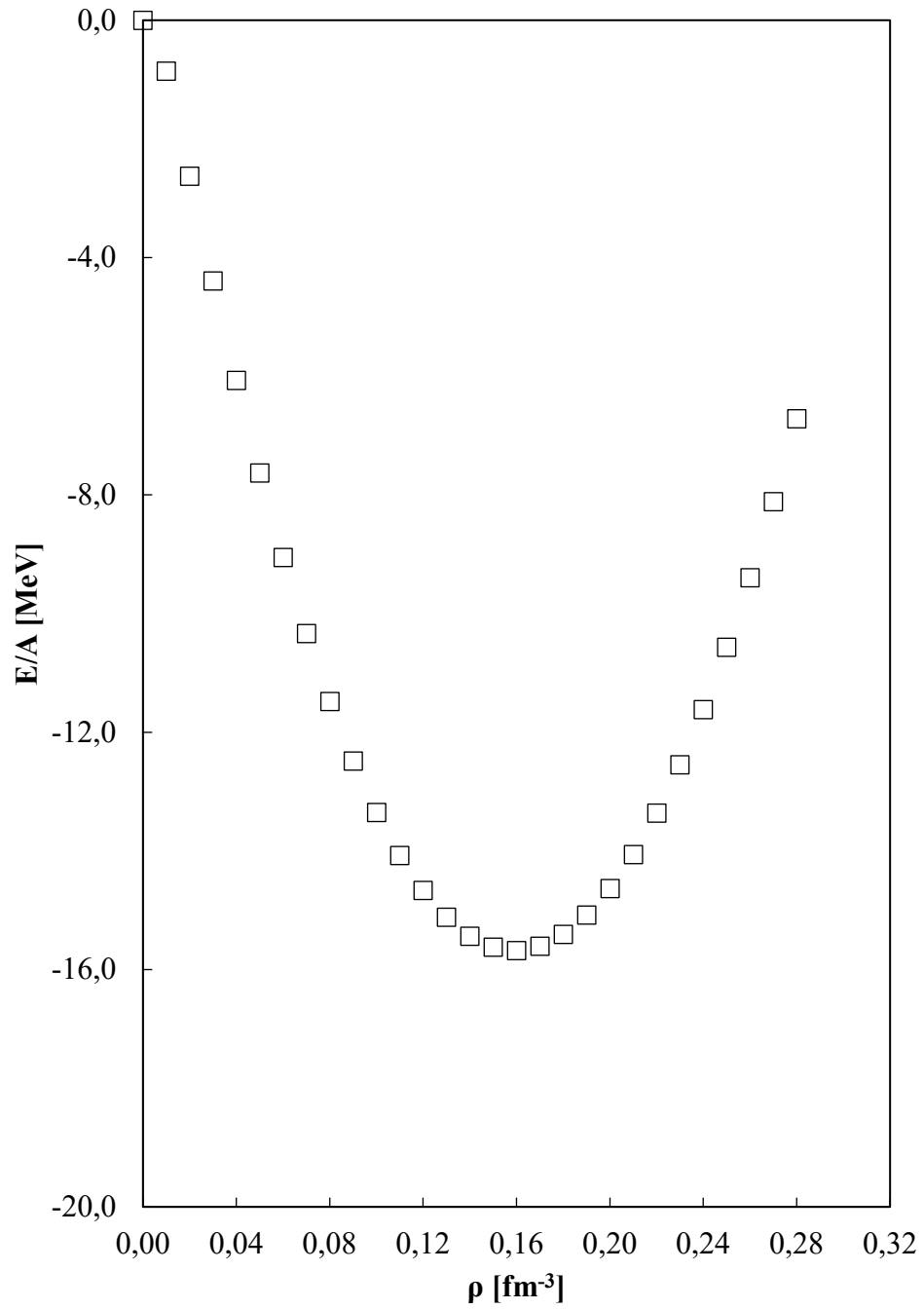
olmasıydı. Şekil 5.3'teki kıyaslama incelendiğinde, Varyasyonel Monte Carlo ve yeni Seyler-Blanchard parametreleriyle elde edilen nükleon başına toplam enerji değerlerinin yoğunlukla değişiminin uyum içinde olduğu görülmektedir.

Myers ve Swiatecki'nin 1969 yılında yaptıkları bir çalışmada elde ettikleri  $\alpha = 19,88$  MeV,  $\beta = 69,02$  MeV ve  $\gamma = 33,46$  MeV Seyler-Blanchard parametrelerini kullanarak elde ettiğimiz nükleon başına toplam enerji değerleri Tablo 5.6 de verilmiştir. Elde edilen bu enerji değerlerinin yoğunluğa bağlı değişimi de Şekil 5.4 de gösterilmiştir. (W. D. Myers ve W. J. Swiatecki, 1969).

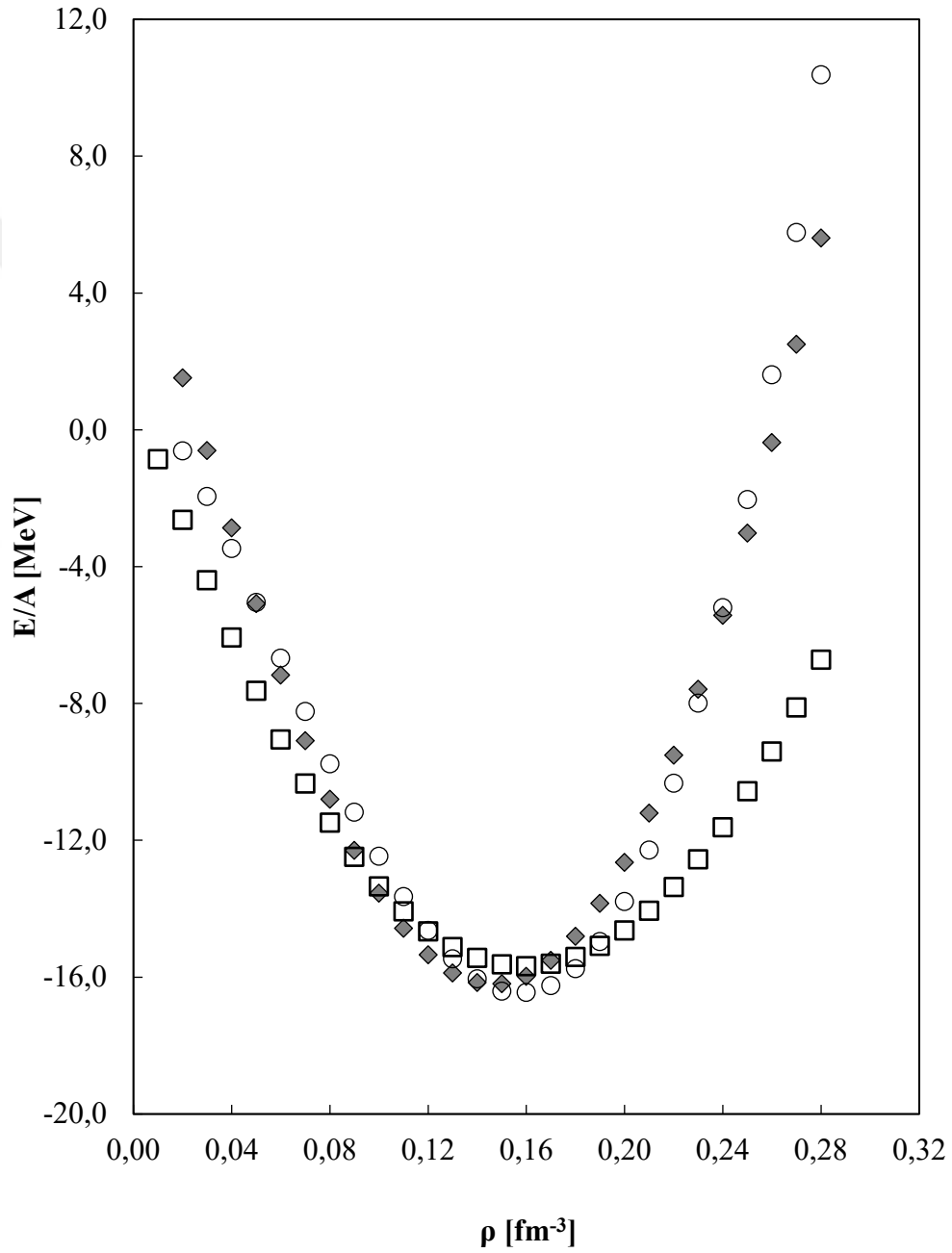
**Tablo 5.6: Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerji Değerleri**

$\rho$ ( $\text{fm}^{-3}$ )	E/A (MeV)	$\rho$ ( $\text{fm}^{-3}$ )	E/A (MeV)
0,01	-0,860	0,15	-15,623
0,02	-2,626	0,16	-15,680
0,03	-4,394	0,17	-15,607
0,04	-6,072	0,18	-15,407
0,05	-7,629	0,19	-15,082
0,06	-9,052	0,20	-14,632
0,07	-10,337	0,21	-14,059
0,08	-11,482	0,22	-13,365
0,09	-12,486	0,23	-12,550
0,10	-13,350	0,24	-11,617
0,11	-14,076	0,25	-10,566
0,12	-14,664	0,26	-9,398
0,13	-15,117	0,27	-8,115
0,14	-15,436	0,28	-6,718

**Şekil 5.4:** Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi

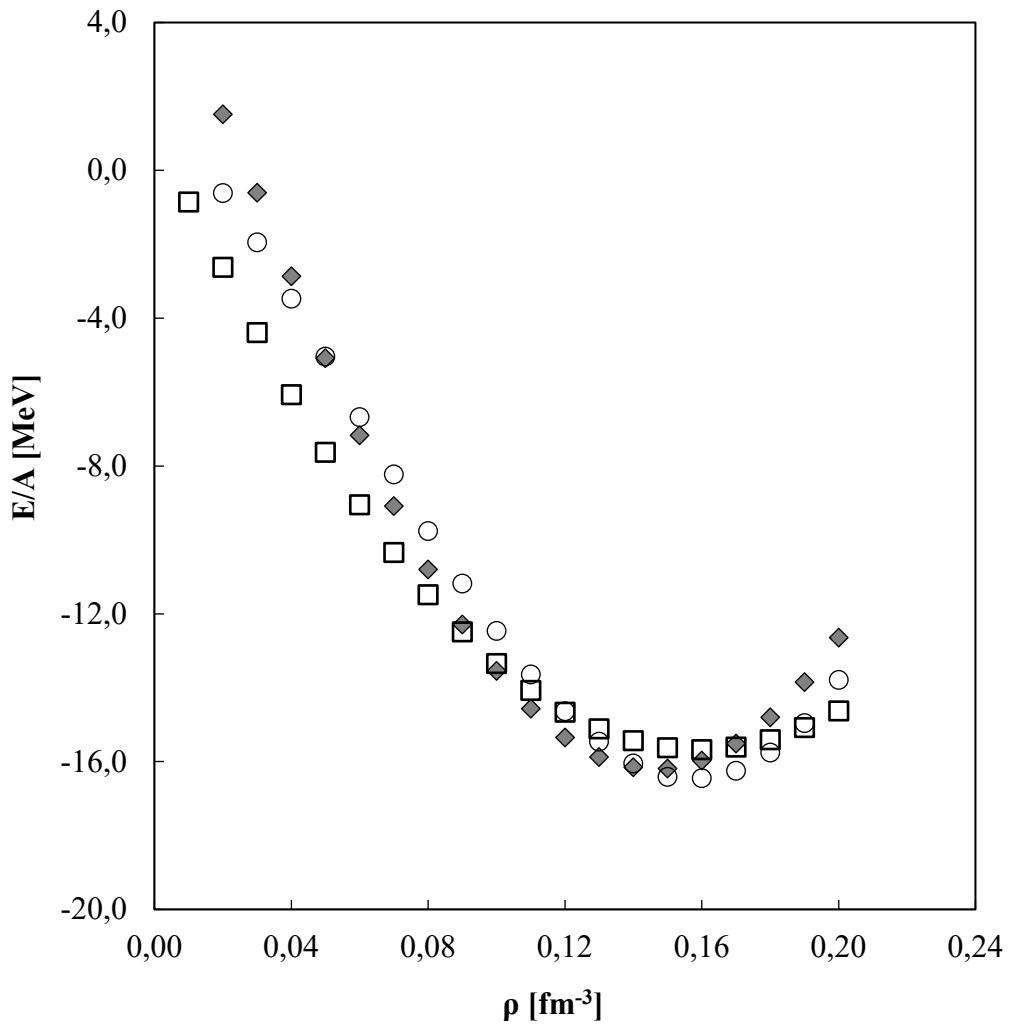


**Şekil 5.5:** Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi. İçi Boş Daireler Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Değerleri, İçi Dolu Kareler ise Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri, İçi Boş Kareler ise Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri Göstermektedir.



Şekil 5.6'da, nükleon başına toplam bağlanma enerjisinin yoğunluğa bağlı değişimi, birisi bizim elde ettiğimiz olmak üzere iki farklı Seyler-Blanchard parametreleriyle ve VMC hesaplamalarıyla elde edilen değerler üzerinden kıyaslanmakta ve uyum içinde olduğu görülmektedir. Özellikle  $0,20 \text{ fm}^{-3}$  yoğunluğa kadar olan değişimde bu uyumluluk daha net görülmektedir.  $0,20 \text{ fm}^{-3}$  yoğunluğa kadar olan nükleon başına toplam bağlanma enerjisinin yoğunluğa bağlı değişimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

**Şekil 5.6:**  $0,01 \text{ fm}^{-3}$  ile  $0,20 \text{ fm}^{-3}$  Yoğunlukları Arası Nükleon Başına Toplam Enerjinin Yoğunluğa Bağlı Değişimi. İçi Boş Daireler Varyasyonel Monte Carlo Hesaplamalarından Elde Edilen Değerleri, İçi Dolu Kareler İse Yeni Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri, İçi Boş Kareler ise Myers ve Swiatecki'nin Seyler-Blanchard Parametreleriyle Elde Edilen Değerleri Göstermektedir.



Buraya kadar sunduğumuz araştırma sonuçlarımızı kısacak özetlersek, yoğunluğa bağlı bir üç-cisim etkileşme terimi de dahil edilmiş Urbana  $V_{14}$  nükleon-nükleon etkileşim potansiyelini kullanarak yaptığımız Varyasyonel Monte Carlo hesaplamalarımızdan elde ettiğimiz sonuçları kullanarak yeni Seyler-Blanchard parametreleri belirledik. Literatüre kazandırdığımız bu yeni Seyler-Blanchard parametreleri ile, nükleer maddenin doyma yoğunluğu, bağlanma enerjisi, durum denklemini deneysel sonuçlarla ve literatürdeki verilerle uyumlu olacak şekilde hesaplanabilmektedir.





**ALTINCI BÖLÜM**  
**SONUÇ VE ÖNERİLER**

Nükleer fizikte, nükleer maddenin durum denklemi, ağır iyon çarpışmaları, süpernova patlamaları ve nötron yıldızlarının yapısının teorik olarak anlaşılması büyük önem taşır. Nükleer çok-cisim problemlerinden birisi, gerçekçi bir nükleon-nükleon (NN) etkileşiminden başlayarak deneysel tahminlere uygun olarak nükleer maddenin bağlanma enerjisi ve doyma özelliklerini elde etmektir. Bunun için birçok teknik kullanılmakta olup, varyasyonel tekniklerde bunlardan birisidir.

1960'lı yıllarda Seyler ve Blanchard tarafından önerilen Seyler-Blanchard Etkin Etkileşimi, çok-cisimli sistemlerde nükleonlar arasındaki nükleon-nükleon etkileşimlerini inceleyen bir modeldir. Nükleer madde, Coulomb kuvvetlerinin ihmal edildiği nükleonlardan oluşmuş bir sistem olduğu için Seyler-Blanchard etkileşimi nükleer maddenin özelliklerinin belirlenmesinde de kullanılan bir etkileşim potansiyelidir.

Biz bu tez çalışmasında, kuantum Monte Carlo yöntemlerinden birisi olan Varyasyonel Monte Carlo yöntemini kullanarak Seyler-Blanchard etkin etkileşimindeki parametreleri elde ettik. Bu elde ettiğimiz yeni parametreleri durum denkleminde kullanarak nükleer maddenin çeşitli yoğunluklar için toplam enerjisini, doyma yoğunluğunu ve bu yoğunluğa karşılık gelen bağlanma enerjisini hesapladık. Varyasyonel Monte Carlo hesaplamalarımızda, yoğunluğa bağlı üç-cisim etkileşimlerini de dahil ederek Urbana  $V_{14}$  nükleon-nükleon etkileşim potansiyeli kullandık. Elde edilen nükleer maddenin özelliklerini, durum denklemini literatür ve deneysel verilerle karşılaştırarak uyum içinde olduğu gördük.

Bundan sonraki hedefimiz, hesaplamalarımızdaki üç-cisim etkileşim potansiyelini ve Seyler-Blanchard etkileşim potansiyelini modifiye edip geliştirerek, sıkıştırılabilirlik, basınç vs. gibi nükleer maddenin daha fazla özelliğini elde etmektir.

## KAYNAKÇA

- Akmal, A., & Pandharipande, V. R. (1997). Spin-isospin structure and pion condensation in nucleon matter. *Physical Review C*, 56(4), 2261-2279. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.56.2261>
- Akmal, A., Pandharipande, V. R., & Ravenhall, D. G. (1998). Equation of state of nucleon matter and neutron star structure. *Physical Review C*, 58(3), 1804-1828. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.58.1804>
- Atav, Ü., & Oğul, R. (2000). Variational monte carlo calculations of nuclear and neutron matter. *Physica Scripta*, 61(1), 52-58. <https://doi.org/10.1238/Physica.Regular.061a00052>
- Baldo, M., Fiasconaro, A., Song, H. Q., Giansiracusa, G., & Lombardo, U. (2001). High density symmetric nuclear matter in the Bethe-Brueckner-Goldstone approach. *Physical Review C*, 65(1), 017303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.65.017303>
- Bandyopadhyay, D., & Samaddar, S. K. (1988). Energy dependent potential in nuclear collisions. *Nuclear Physics A*, 484(2), 315-336. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(88\)90075-9](https://doi.org/10.1016/0375-9474(88)90075-9)
- Bandyopadhyay, D., Samanta, C., Samaddar, S. K., & De, J. N. (1990). Thermostatic properties of finite and infinite nuclear systems. *Nuclear Physics A*, 511(1), 1-28. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(90\)90024-G](https://doi.org/10.1016/0375-9474(90)90024-G)
- Bao-An Li, Lie-Wen Chen, & Che Ming Ko. (2008). Recent progress and new challenges in isospin physics with heavy-ion reactions. *Physics Reports*, 464(4-6), 113-281. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2008.04.005>
- Basu, D. N. (2004). Nuclear incompressibility using the density-dependent M3Y effective interaction. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 30(6), B7-B11. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/30/6/B01>
- B.D. Day, & R. B.Wiringa. (1985). Brueckner-Bethe and variational calculations of nuclear matter. *Physical Review C*, 32, 1057.
- Bethe, H. A. (1990). Supernova mechanisms. *Reviews of Modern Physics*, 62(4), 801-866. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.62.801>
- Bircan, H. (2020). Density Dependence of Nuclear Matter Symmetry Energy: VMC Calculations. *Physics of Atomic Nuclei*, 83(2), 351-367. <https://doi.org/10.1134/S1063778820020064>

- Brian D. Serot, & John Dirk Walecka. (1986). Relativistic nuclear many-body theory. *Adv. Nucl. Phys.*, 16, 1.
- Brueckner, K. A., Coon, S. A., & Dabrowski, J. (1968). Nuclear symmetry energy. *Physical Review*, 168(4), 1184-1188. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.168.1184>
- Burrows, A., & Lattimer, J. M. (1986). The birth of neutron stars. *The Astrophysical Journal*, 307, 178. <https://doi.org/10.1086/164405>
- Ceperley, D., Chester, G. V., & Kalos, M. H. (1977). Monte Carlo simulation of a many-fermion study. *Physical Review B*, 16(7), 3081-3099. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.16.3081>
- Chabanat, E., Bonche, P., Haensel, P., Meyer, J., & Schaeffer, R. (1998). A Skyrme parametrization from subnuclear to neutron star densities Part II. Nuclei far from stabilities. *Nuclear Physics A*, 635(1-2), 231-256. [https://doi.org/10.1016/S0375-9474\(98\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(98)00180-8)
- Danielewicz, P., Lacey, R., & Lynch, W. G. (2002). Determination of the equation of state of dense matter. *Science*, 298(5598), 1592-1596. <https://doi.org/10.1126/science.1078070>
- David M. Ceperley, & Lubos Mitas. (1996). *Advances in chemical physics* (I. Prigogine & S. A. Rice, Ed.; C. 93). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470141526>
- Day, B. D. (1978). Current state of nuclear matter calculations. *Reviews of Modern Physics*, 50(3), 495-521. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.50.495>
- Drischler, C., Hebeler, K., & Schwenk, A. (2016). Asymmetric nuclear matter based on chiral two- and three-nucleon interactions. *Physical Review C*, 93(5), 054314. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.93.054314>
- Fedoseew, A., & Lenske, H. (2015). Thermal properties of asymmetric nuclear matter. *Physical Review C*, 91(3), 034307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.91.034307>
- Freedman, R. A. (1977). Green's function formalism and quantum correction for finite-temperature baryon matter. *Physics Letters B*, 71(2), 369-372. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(77\)90242-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(77)90242-8)
- Frick, T., & M uther, H. (2003). Self-consistent solution to the nuclear many-body problem at finite temperature. *Physical Review C*, 68(3), 034310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.68.034310>
- Friedman, B., & Pandharipande, V. R. (1981). Hot and cold, nuclear and neutron matter. *Nuclear Physics A*, 361(2), 502-520. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)90649-7](https://doi.org/10.1016/0375-9474(81)90649-7)

- Ghaemmaghani, S. A., Khoshi, M. R., & Mojarrad, M. G. (2023). Influence of a phase-space extension of nuclear forces on the sharp baryon-quark phase transition in hybrid neutron stars. *European Physical Journal Plus*, 138(5). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04025-x>
- Ghaemmaghani, S. A., & Mojarrad, M. G. (2022). A statistical model for the thermodynamic instabilities of asymmetric nuclear matter. *The European Physical Journal A*, 58(12), 255. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00906-4>
- Ghazanfari Mojarrad, M., & Mousavi Khoroshtomi, S. K. (2017). Thomas–Fermi approximation for the equation of state of nuclear matter: A semi-classical approach from the Landau Fermi-Liquid theory. *International Journal of Modern Physics E*, 26(06), 1750038. <https://doi.org/10.1142/S0218301317500380>
- Hassaneen, K. S. A. (2017). Asymmetric nuclear matter and neutron star properties within the extended Brueckner theory. *The European Physical Journal A*, 53(1), 9. <https://doi.org/10.1140/epja/i2017-12196-6>
- Hempel, M., Fischer, T., Schaffner-Bielich, J., & Liebendörfer, M. (2012). New equations of state in simulations of core-collapse supernovae. *The Astrophysical Journal*, 748(1), 70. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/748/1/70>
- Horowitz, C. J., & Serot, B. D. (1987). The relativistic two-nucleon problem in nuclear matter. *Nuclear Physics A*, 464(4), 613-699. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(87\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(87)90370-8)
- Huber, H., Weber, F., & Weigel, M. (1998). Symmetric and asymmetric nuclear matter in the relativistic approach at finite temperatures. *Physical Review C*, 57(6), 3484-3487. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.57.3484>
- Huber, H., Weber, F., & Weigel, M. K. (1994). Neutron star properties and the relativistic equation of state of asymmetric nuclear matter. *Physical Review C*, 50(3), R1287-R1291. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.50.R1287>
- J. Dabrowski. (1977). *Nukleonika*. 21(143).
- James M. Lattimer, & D. G. Ravenhall. (1978). Neutron star matter at high temperatures and densities. I. Bulk properties of nuclear matter. *The Astrophysical Journal*, 223, 314-323.
- Jastrow R. (1955). Many-Body problem with strong forces. *Physical Review*, 98(5), 1479-1484. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.98.1479>

- Jena, S., & Deo, B. B. (1996). Field-theoretical description of nuclear matter with only the pion-nucleon interaction. *Physical Review C*, 54(1), 353-358. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.54.353>
- Khanna, K. M., & Barhai, P. K. (1975). Symmetry coefficient and the isospin-spin dependence of the single-particle potential. *Physical Review C*, 11(1), 264-265. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.11.264>
- Lagaris, I. E., & Pandharipande, V. R. (1981a). Variational calculations of asymmetric nuclear matter. *Nuclear Physics A*, 369(3), 470-482. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)900324](https://doi.org/10.1016/0375-9474(81)900324)
- Lagaris, I. E., & Pandharipande, V. R. (1981b). Variational calculations of realistic models of nuclear matter. *Nuclear Physics A*, 359(2), 349-364. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)90241-4](https://doi.org/10.1016/0375-9474(81)90241-4)
- Lattimer, J. M., Pethick, C. J., Ravenhall, D. G., & Lamb, D. Q. (1985). Physical properties of hot, dense matter: The general case. *Nuclear Physics A*, 432(3), 646-742. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(85\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90006-5)
- Lattimer, J. M., & Ravenhall, D. G. (1978). Neutron star matter at high temperatures and densities. I. Bulk properties of nuclear matter. *İçinde The Astrophysical Journal (C)*, 223.
- M. Y. M. Hassan, A. Sh. M. Ghazal, & K. M. Mahmoud. (1978). Properties of nuclear matter using the velocity-dependent effective potential of s-wave interaction. *Z. Phys. A*, 286, 319-325.
- Manisa, K. (2011). Determining a Skyrme-Type effective interaction from realistic two-nucleon interaction. *Physics of Atomic Nuclei*, 74(7), 958-970. <https://doi.org/10.1134/S1063778811070106>
- Manisa, K. (2012). EOS of neutron-rich matter and pure neutron matter. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 55(3), 443-449. <https://doi.org/10.1007/s11433-012-4652-6>
- Manisa, K. (2016). A new Landau parameter set for nuclear matter using the Skyrme parameter set. *Romanian Reports in Physics*, 68, 582-593.
- Manisa, K., Atav, Ü., & Ogul, R. (2005). VMC calculations of the ground state properties of nuclear matter. *International Journal of Modern Physics E*, 14(02), 255-267. <https://doi.org/10.1142/S0218301305003004>

- Manisa, K., Atav, Ü., & Sarıaydın S. (2010). Equation of state of asymmetric nuclear matter: A VMC study. *Central European Journal of Physics*, 8(4), 587-595. <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0129-2>
- Manisa, K., Erdoğan, M., Bircan, H., & Erdoğan, N. Z. (2017). Nuclear matter incompressibility: From VMC to Skyrme Landau parameterization. *Acta Physica Polonica B*, 48(2), 183-194. <https://doi.org/10.5506/APhysPolB.48.183>
- Manisa, K., Erdoğan, M., & Bostan, S. (2015). Skyrme interaction with VMC calculations of nuclear matter. *Romanian Reports in Physics*, 60, 429-443.
- Mansour, H. M. M., & Ramadan, Kh. A. (1998). Polarized nuclear matter using a modified density dependent Seyler-Blanchard potential. *Physical Review C*, 57(4), 1744-1748. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.57.1744>
- Mansour, H. M. M., Zohry, M. El, & Elmeshneb, A. E. (2018). A study of the three body force effect on the EOS properties of asymmetric nuclear matter. *Armenian Journal of Physics*, 11, 1-10.
- McMillan, W. L. (1965). Ground state of liquid He<sup>4</sup>. *Physical Review*, 138(2A), A442-A451. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.138.A442>
- Mișicu, Ș. (2007). Nuclear matter equations of state for the practitioner. *Romanian Reports in Physics*, 59, 1127-1167.
- Moshfegh, H. R., & Modarres, M. (2005). Asymmetrical nuclear matter calculations with the new charge-dependent Reid potential. *Nuclear Physics A*, 759(1-2), 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.04.021>
- Moshfegh, H. R., & Mojarrad, M. G. (2011). Thermal properties of baryonic matter. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 38(8), 085102. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/38/8/085102>
- Moustakidis, Ch. C. (2008). Temperature and momentum dependence of single-particle properties in hot asymmetric nuclear matter. *Physical Review C*, 78(5), 054323. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.78.054323>
- Müller, H., & Serot, B. D. (1996). Relativistic mean-field theory and the high-density nuclear equation of state. *Nuclear Physics A*, 606(3-4), 508-537. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(96\)00187-X](https://doi.org/10.1016/0375-9474(96)00187-X)

- Myers, W. D., & Swiatecki, W. J. (1990). A Thomas-Fermi model of nuclei. Part I. Formulation and first results. *Annals of Physics*, 204(2), 401-431. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(90\)90395-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(90)90395-5)
- Myers, W. D., & Swiatecki, W. J. (1996). Nuclear properties according to the Thomas-Fermi model. *Nuclear Physics A*, 601(2), 141-167. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(95\)00509-9](https://doi.org/10.1016/0375-9474(95)00509-9)
- Myers, W. D., & Swiatecki, W. J. (1998). Nuclear equation of state. *Physical Review C*, 57(6), 3020-3025. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.57.3020>
- P. Roy Chowdhury, & D.N. Basu. (2006). Nuclear matter properties With the re-evaluated coefficients Of liquid drop model. *Acta Physica PolonicaB*, 37, 2869.
- Pandharipande, V. R., & Wiringa, R. B. (1979). Variations on a theme of nuclear matter. *Reviews of Modern Physics*, 51(4), 821-861. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.51.821>
- Pons, J. A., Reddy, S., Prakash, M., Lattimer, J. M., & Miralles, J. A. (1999). Evolution of proto-neutron stars. *The Astrophysical Journal*, 513(2), 780-804. <https://doi.org/10.1086/306889>
- Prakash, M., & Ainsworth, T. L. (1987). Sigma model calculations of neutron-rich nuclear matter. *Physical Review C*, 36(1), 346-353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.36.346>
- Prakash, M., Bombaci, I., Prakash, M., Ellis, P. J., Lattimer, J. M., & Knorren, R. (1997). Composition and structure of protoneutron stars. *Physics Reports*, 280(1), 1-77. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(96\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(96)00023-3)
- Randrup, J., & de Lima Medeiros, E. (1991). Model for statistical properties of nuclear systems at finite temperature. *Nuclear Physics A*, 529(1), 115-140. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(91\)90788-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(91)90788-8)
- Seyler, R. G., & Blanchard, C. H. (1961). Classical self-consistent nuclear model. *Physical Review*, 124(1), 227-232. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.227>
- Seyler, R. G., & Blanchard, C. H. (1963). Classical self-consistent nuclear model. II. *Physical Review*, 131(1), 355-365. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.131.355>
- Shen, H., Toki, H., Oyamatsu, K., & Sumiyoshi, K. (1998). Relativistic equation of state of nuclear matter for supernova and neutron star. *Nuclear Physics A*, 637(3), 435-450. [https://doi.org/10.1016/S0375-9474\(98\)00236-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(98)00236-X)

- Strobel, K., Weber, F., & Weigel, M. K. (1999). Symmetrie and asymmetrie nuclear matter in the Thomas-Fermi model at finite temperatures. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 54(1), 83-90. <https://doi.org/10.1515/zna-1999-0111>
- Strobel, K., & Weigel, M. K. (2001). On the minimum and maximum mass of neutron stars and the delayed collapse. *Astronomy & Astrophysics*, 367(2), 582-587. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000428>
- Thijssen, J. (2007). *Computational Physics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171397>
- Togashi, H., Takehara, Y., Yamamuro, S., Nakazato, K., Suzuki, H., Sumiyoshi, K., & Takano, M. (2014). Equation of state for nuclear matter in core-collapse supernovae by the variational method. *Journal of Physics: Conference Series*, 569, 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/569/1/012058>
- Tsang, M. B., Zhang, Y., Danielewicz, P., Famiano, M., Li, Z., Lynch, W. G., & Steiner, A. W. (2009). Constraints on the density dependence of the symmetry energy. *Physical Review Letters*, 102(12), 122701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.122701>
- W. D. Myers, & W. J. Swiatecki. (1969). Average nuclear properties. *Annals of Physics*, 55, 395-505.
- Walecka, J. D. (1974). A theory of highly condensed matter. *Annals of Physics*, 83(2), 491-529. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(74\)90208-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(74)90208-5)
- Weber, F., & Weigel, M. K. (1989). Neutron star properties and the relativistic nuclear equation of state of many-baryon matter. *Nuclear Physics A*, 493(3-4), 549-582. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90102-4](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90102-4)
- Wiringa, R. B., Fiks, V., & Fabrocini, A. (1988). Equation of state for dense nucleon matter. *Physical Review C*, 38(2), 1010-1037. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.38.1010>
- Wiringa, R. B., & Pandharipande, V. R. (1979). A variational theory of nuclear matter (III). *Nuclear Physics A*, 317(1), 1-22. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(79\)90448-2](https://doi.org/10.1016/0375-9474(79)90448-2)
- Wiringa, R. B., & Pandharipande, V. R. (1981). On the calculation of correlation functions in nuclear matter. *Physics Letters B*, 99(1), 1-4. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(81\)90791-7](https://doi.org/10.1016/0370-2693(81)90791-7)

Xu, J., Chen, L.-W., Li, B.-A., & Ma, H.-R. (2007). Temperature effects on the nuclear symmetry energy and symmetry free energy with an isospin and momentum dependent interaction. *Physical Review C*, 75(1), 014607. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.75.014607>



## DİZİN

<b>A</b>		<b>N</b>	
Ağır iyon .....	2	Non-relativistik.....	2
Asimetrik nükleer madde .....	6	Nötron sayısı.....	6
Atom fiziği .....	3	Nükleer ... iv, v, viii, 2, 3, 6, 7, 9, 11, 14, 15, 20, 21, 25, 32	
<b>B</b>		Nükleer madde .viii, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 30, 32	
Bağlanma enerjisi.....	viii, 4, 7, 30, 32	Nükleon-nükleon.....	2, 16
Baryon.....	3, 34, 35, 40	<b>Ö</b>	
<b>C</b>		Öteleme .....	16
Compton dalga boyu .....	17	<b>P</b>	
<b>Ç</b>		Pion.....	18, 33, 36
Çekirdek .....	3, 6, 7	Potansiyel .....	3, 9, 15, 16, 18
<b>D</b>		Proton sayısı .....	6
Dalga fonksiyonu .....	13, 14	<b>S</b>	
Doyma noktası .....	7, 18	Saçılma .....	2, 7, 16
<b>E</b>		Seyler-Blanchard ...	viii, ix, xii, xiii, 3, 4, 9, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 38
Etkileşim ..viii, xii, 2, 3, 7, 9, 10, 14, 16, 17, 18, 29, 32		Seyler-Blanchard etkileşim	9, 32, 22, 24, 26, 30
Evren .....	6	Simetrik nükleer madde.....	3, 6
<b>F</b>		<b>T</b>	
Faz geçişi.....	3	Thomas-Fermi .....	2, 3, 38, 39
Fermiyon .....	14	<b>U</b>	
<b>İ</b>		Urbana IX .....	18
İki cisim etkileşimi.....	16	<b>V</b>	
<b>K</b>		Varyasyonel Monte Carlo yöntemi ...	11, 14
Korelasyon .....	14, 15	<b>Y</b>	
Kuantum.....	13, 14	Yoğunluk.....	2, 3, 18
Kuark.....	3	<b>M</b>	
<b>M</b>		Mezon.....	18
Monte Carlo Yöntemi .....	xi, 12	<b>N</b>	