

Nükleer Kabuk Modeli ile Ne İzotoplarının Nükleer Yapısının İncelenmesi

*¹Serkan Akkoyun, ²Tuncay Bayram

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Sivas, Türkiye, sakkoyun@cumhuriyet.edu.tr, 

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Trabzon, Türkiye, t.bayram@ymail.com, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 12.04.2020

Kabul Tarihi: 28.08.2020

Öz

Atom çekirdeklerinin nükleer yapılarını araştırma amacıyla kullanılan yaygın yöntemlerden birisi de nükleer kabuk modelidir. Atom elektronlarının yörüngelere yerleşmesine benzer şekilde, nükleer kabuk modelinde de proton ve nötronların, Pauli dışarlama ilkesine uyararak çekirdek içerisinde yörüngelere yerleştiği düşünülmektedir. Bu yörüngeler, kendi aralarında gruplanarak kabukları meydana getirmektedir ki, bir kabuktaki tüm mümkün seviyelerin dolu olması durumunda, kabuğun kapalı olduğu söylenir. Kapalı kabuğa sahip atom çekirdekleri oldukça kararlıdır ve nükleer kabuk modeli hesaplamalarında bu çekirdeklerden fazla olan değerlik nükleonları hesaplamalara katılır. Bu çalışmada, ¹⁶O çekirdeği kapalı kabuk çekirdeği olarak ele alınarak, çift-çift Ne çekirdeklerinin nükleer yapılarını araştırmak için nükleer kabuk modeli kullanılmıştır. Tek parçacık yörüngeleri olarak $d_{5/2}$, $s_{1/2}$ ve $d_{3/2}$ ele alınarak, değerlik nükleonları arasındaki iki cisim etkileşimleri için farklı parametre setleri kullanılmıştır. Sonuçlar birbirleriyle ve mevcut literatür değerleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel değerlere en yakın sonuçların, *usdb* ve *sdnn* parametre setleri ile elde edildiği görülmüştür. Sihirli nötron sayılı ¹⁸Ne izotopunda, ilk uyarılmış seviye enerjisinin beklendiği gibi fazla olduğu görülmüştür. Ardından ²⁰Ne ve ²²Ne çekirdekleri için bu uyarılma enerjisi düşmekte ve sonra yörüngelerin tam dolu hale gelmesi ile tekrar yükselmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nükleer kabuk modeli, nükleer yapı, neon çekirdekleri

Investigation of Nuclear Structures of Ne Isotopes by Nuclear Shell Model

*¹Serkan Akkoyun, ²Tuncay Bayram

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Sivas, Türkiye, sakkoyun@cumhuriyet.edu.tr,

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Trabzon, Türkiye, t.bayram@ymail.com,

Abstract

One of the common methods used to investigate the nuclear structures of atomic nuclei is the nuclear shell model. Similar to the placement of atomic electrons into orbits, in the nuclear shell model, protons and neutrons are thought to fill the orbits within the nucleus, following the principle of Pauli's exclusion. These orbits are grouped to form shells, which are said to be closed if all possible places in a shell are full. Atomic nuclei with closed shells are very stable and valence nucleons that are more than these nuclei are included in the nuclear shell model calculations. In this study, the nuclear shell model was used to investigate the nuclear structure of even-even Ne nuclei by considering the ¹⁶O core as a closed-shell nucleus. Single-particle orbits $d_{5/2}$, $s_{1/2}$ and $d_{3/2}$ are taken into account and different parameter sets are used for two-body interactions between valence nucleons. The results were compared with each other and with current literature values. It was seen that the closest results to the experimental values were obtained with parameter sets of *usdb* and *sdnn*. In the ¹⁸Ne isotope with magic neutron number, it was seen that the first excited level energy was found to be large as expected. Then, this excitation energy decreases for the ²⁰Ne and ²²Ne nuclei and rises again when the orbits become full.

Keywords: Nuclear shell model, nuclear structure, neon nuclei

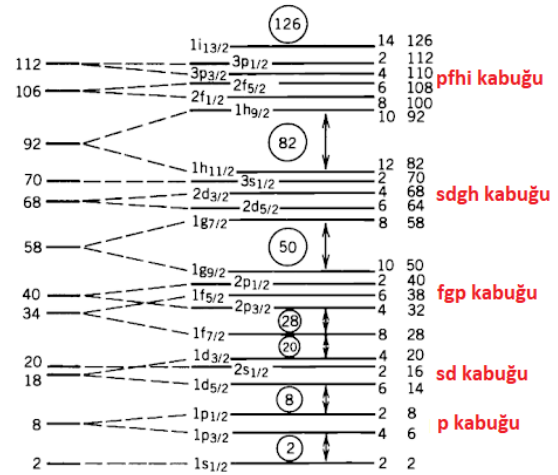
1. GİRİŞ

Atom çekirdeğinin etrafında var olduğu düşünülen atomun yörünge modelinde, elektronların bu yörüngelerde buldukları düşünülmektedir. Elektronların bu yerleşimi, Pauli dışarlama ilkesine göre olur ve aynı kuantum sayısına

sahip iki elektron aynı yörüngede asla bulunamaz. Her yörünge, kuantum sayıları ile ilişkili olarak alabileceği azami elektron sayısı vardır. Bu şekilde yörüngelerin elektronlarla dolması sonucunda, belirli bazı elektron sayısına sahip atomların, diğerlerine göre daha kararlı olduğu bilinmektedir. Bu atomlar, iyi bilindiği üzere soy

gazlar olarak adlandırılmaktadır. Bu modele benzer bir modelin, atom çekirdeğinin içinde yer alan ve ortak adları nükleon olan proton ve nötronlara da uygulanabileceği görülmüştür. Nükleer kabuk modeli [1-5] olarak adlandırılan bu modelde nükleonlar, çekirdek içerisindeki yörüngelere Pauli ilkesine göre ayrı ayrı yerleşirler. Soy gazlara benzer olarak, bazı nükleon sayılı çekirdeklerin, diğerlerine göre daha kararlı oldukları gözlemlenmiştir ki bu sayılar nükleer fizikte sihirli sayılar (2, 8, 20, 28, 50, 82 ve 128) olarak adlandırılır [6, 7]. Hem nötron hem de protonu sihirli sayıda olan çift sihirli çekirdekler, küresel yapıda olup oldukça kararlıdır. Sihirli sayıya sahip tek parçacık yörüngelerinin, ardından gelen yörüngeler arasında fazla mesafe olması, yörüngelerin gruplanmış olarak bulunmalarına yol açar. Bu gruplara kabuk adı verilmekte olup, nükleer kabuk modeli ismi buradan gelmektedir. Şekil 1'de görülebilen bu kabuklar, içerdikleri yörüngelere göre isimlendirilirler. Son zamanlarda yapılan teorik ve deneysel çalışmalar, bazı kabuklar için mevcut sihirli sayılardan farklı yeni sihirli sayıların olabileceğine veya mevcutların sihirli olamayabileceğine işaret etmektedir [8].

Nükleer kabuk modeli hesaplamalarında, çift sihirli sayılı çekirdekler, öz (kor) çekirdek olarak ele alınarak, bundan fazla olan değerlik nükleonları hesaplamalara katılır. Öz çekirdekte $J=0$ toplam açısal momentumu veren nükleonların hareket etmediği varsayılmaktadır. Buna göre bu nükleonların, özden çıkarak değerlik nükleonlarının içine dahil olmaları mümkün değildir. Değerlik nükleonlarının, özün hemen üzerindeki kabukta dağılmış olabileceği farz edilerek bu kabuk, model uzayı olarak ele alınır. Model uzayındaki nükleonlar, her bir yörüngede tüm kombinasyonlarda yerleşebilirler. Farklı yerleşimler, çekirdeğin farklı enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur. Model uzayındaki yörüngelerin, yörünge kapasitelerinin artması ve değerlik nükleon sayısının artması, yapılacak olan hesaplamaları oldukça zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, ^{16}O özü kullanılarak, *sd* kabuğunda yer alan çift-çift (hem proton hem nötron sayısı çift sayı) Ne çekirdeklerinin nükleer özellikleri araştırılmıştır. Deneysel verilerinin literatürde mevcut olması ve nötron bakımından iki tane sihirli sayılı izotopa sahip olması bakımından, bu izotopların teorik olarak incelenmesi ile, kullanılan modellerin test edilmesi mümkündür. İncelenen Ne izotopları, öz dışında kalan 2 protona ve 0 ile 12 arasındaki çift sayıda nötrona sahiptir. Proton ve nötronlar, ayrı ayrı olmak üzere, *sd* model uzayında her kombinasyonda dağılmıştır. Ne izotoplarının 2^+ , 4^+ ve 6^+ uyarılmış seviye enerjileri, 4^+ enerjisinin 2^+ enerjisine oranları, taban durumdan 2^+ seviyesine olan indirgenmiş kvadrupol geçiş olasılıkları ve deformasyon parametreleri hesaplanmıştır. Farklı parametre setleri ile yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere, nükleonlar arasındaki etkileşimi tanımlayan *usdb* ve *sdm* iki cisim matris elemanları setlerinin, deneysel değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Hesaplamalar için, Kshell kabuk modeli bilgisayar kodu kullanılmıştır [9].



Üçüncüsü ise, değerlik nükleonlarının birbirleriyle karşılıklı etkileşimidir. Bunların arasında kapalı kabukların bağlanma enerjilerini hesaplamak en zor olanıdır. Hesaplanması en kolay olanı ise, değerlik nükleonları arasındaki etkileşimdir. Eğer bu değerlik nükleonları tek bir yörüngedelerse, sadece bu yörüngedeki nükleonlar arasındaki etkin etkileşimin matris elemanlarını bilmek yeterlidir. Değerlik nükleonları birkaç yörüngeye dağılmışsa, tek nükleon enerjileri arasındaki farklılıklara (tek parçacık enerjisi) da ihtiyaç vardır ki bunlar genellikle deneysel verilerden alınabilir. Kabuk modeli hesaplamalarındaki en önemli noktalardan birisi de, değerlik nükleonları arasında kullanılacak etkin etkileşimin seçilmesidir [14].

Nükleonlar arasında bireysel etkileşmelerin bilinmemesinden kaynaklanan zorluktan ötürü, bu etkileşmeler yerine, diğer nükleonların oluşturduğu ortalama bir potansiyel (ortalama alan yaklaşımı) için içine katılır. Böylelikle nükleer kabuk modeli kapsamında ele alınan problem, çekirdekdeki tüm nükleonları hesaba katan çok-cisim problemi, sadece değerlik nükleonlarını hesaba katan birkaç-cisim problemine indirgenmiş olur.

A tane nükleona sahip çekirdek için Hamiltonyen, Denklem 1'deki gibi yazılabilir.

$$H = \sum_{i=1}^A T_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^A V_{ij} \quad (1)$$

Burada T_i , her bir nükleonun kinetik enerjisi, V_{ij} ise, nükleonlar arasındaki etkileşme potansiyelidir. Fakat nükleonlar arasındaki etkileşme açıkça tanımlı olmadığından dolayı, her bir nükleonun, diğerlerinin oluşturduğu ortalama bir potansiyelde hareket ettiğini varsayarak, Hamiltonyen Denklem 2'de verildiği gibi düzenlenebilir.

$$H = \sum_{i=1}^A [T_i + U_i] + \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^A V_{ij} - \sum_{i=1}^A U_i\right) \quad (2)$$

$$H = H_0 + H_{artuk} \quad (3)$$

Burada H_0 , her bir nükleonun, ortalama bir potansiyel altındaki tek parçacık enerjisidir. Harmonik salıncı, Wood-Saxon ya da Yukawa tipindeki gibi bir merkezi potansiyelin seçimi ile tek parçacık enerjileri belirlenebilir. Artık etkileşmeye (H_{artuk}) ait iki-cisim matris elemanları ise, nükleonların karşılıklı etkileşmelerini temsil eder. Literatürde farklı yöntemlerle elde edilmiş matris eleman setleri mevcuttur. Bu matris eleman setleri, bir veya iki kabuğu kapsayacak şekildedir. İkinci kuantum uzayında yaratma ve yok etme işlemcileri cinsinden Hamiltonyen, Denklem 4'deki halini alır.

$$H = \sum_{ij}^A \epsilon_i a_i^+ a_j + \frac{1}{4} \sum_{ijkl}^A \langle ij|V|kl \rangle a_i^+ a_j^+ a_k a_l \quad (4)$$

Burada ϵ_i değerleri, nükleonların öz çekirdekle etkileşmeleri olan tek parçacık enerjileridir. j yörüngesinde yok edilen parçacık, i yörüngesinde yaratılır. İki cisim etkileşme terimi ise, k ve l yörüngelerinde yok edilen parçacıkların i ve j yörüngelerinde yaratıldığını söyler. Nükleonlar için Slater

determinantları ile tanımlanan çok-parçacık dalga fonksiyonu (Ψ) kullanarak Hamiltonyen denklemi (Denklem 5) çözülerek, çekirdeğin enerji seviyeleri hesaplanabilir.

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \quad (5)$$

Çok parçacıklı sistemler için matris formalizminde gerçekleştirilen bu işlemlerde, model uzayının boyutu ve nükleon sayısı artıkça, Hamiltonyen matrisinin boyutları oldukça yüksek mertebelere (10^{10}) kadar çıkmaktadır. Özdeğerleri elde etmek için matrisler, Lanczos gibi uygun algoritmalar kullanılarak köşegenleştirilir ve çözüme ulaşılır. Bu amaçla, literatürde nükleer kabuk modeli hesaplamalarını yapmak için geliştirilmiş birçok bilgisayar kodu mevcuttur. Bunlara örnek olarak, Oxbash [15], Antoine [16], Nushell [17], Bigstick [18], Redstick [19] ve Kshell [9] verilebilir. Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalarda, Kshell kodu kullanılmıştır. Linux işletim sisteminde çalışan bu kod, Lanczos yöntemi kullanılarak M-şeması gösterimi ile nükleer kabuk modeli hesaplamaları gerçekleştirmeyi sağlar. Çekirdeklerin enerji seviyeleri, spin ve izospinleri, manyetik ve kvadrupol momentleri, seviyeler arasındaki $B(E2)$ ve $B(M1)$ geçiş olasılıkları ve tek parçacık spektroskopik faktörleri kod ile 10^{10} boyutuna kadar hesaplanabilir. Çekirdeklerin deformasyonunu gösteren kvadrupol deformasyon parametresi (β_2) parametresi ise, Denklem 6 yardımı ile hesaplanabilir [20].

$$\beta_2 = \frac{4\pi}{3ZR_0^2} [B(E2)/e^2]^{1/2} \quad (6)$$

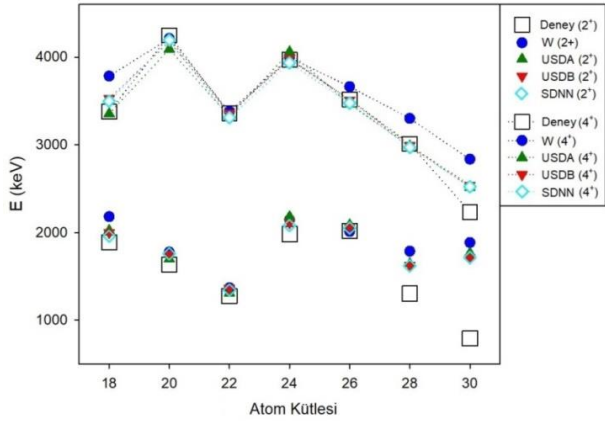
Burada, Z , çekirdeğin proton sayısı, $R_0^2 = 0,0144A^{2/3}$ barn olup, A ise çekirdeğin atom kütesidir.

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Çalışmamızda, model uzayı olarak sd uzayını ele aldık. Bu uzay, ^{16}O öz çekirdeğinin üzerinde yer alan, $d_{5/2}$, $s_{1/2}$ ve $d_{3/2}$ yörüngelerinden oluşmaktadır. Öz çekirdeğin 8 protonu ve 8 nötronu vardır. İncelenen olan Ne çekirdeğinin proton sayısı 10 olduğundan, model uzayındaki değerlik proton sayısı 2'dir. Ayrıca, atom kütesi 18 ile 30 arasındaki Ne çekirdekleri incelendiğinden, model uzayındaki değerlik nötronları 0 ile 12 arasındadır. Literatürde sd model uzayından kullanılmak üzere mevcut olan, cw , cwh [21], $hbumsd$, $hbusd$ [22], $kuosd$, $kuosdh$, pw [23], $sdba$, $sdbn$ [24], w [25], $usda$ [26] ve $usdb$ [27] iki cisim etkileşme matris eleman setlerini ayrı ayrı kullanarak, nötron sayısı 8 ile 12 arasındaki çift-çift Ne çekirdeklerinin nükleer özellikleri elde edilmiştir. Ne çekirdekleri içerisinde 20 ve 22 atom kütleli olanlar, kararlı olan çekirdeklerdir. Diğer çekirdeklerin yarı ömürleri ise en fazla saniyeler mertebesinde. Öncelikle, bu çekirdeklerin ilk 2^+ ve 4^+ seviyelerinin enerjilerini kabuk modeli hesaplamaları ile elde ederek, bu enerjilerin birbirlerine oranları incelenmiştir. Şekil 2'de, Ne çekirdeklerinin ilk 2^+ ve 4^+ enerji seviyeleri, deneysel değerlere [28] en yakın sonuç veren 4 matris eleman seti için verilmiştir. Bu matris elemanları, usd tipi matris elemanları olup, w matris eleman setinin yeni deneysel verilerle geliştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu matris elemanları, 3 tek parçacık enerjisi ve 63 iki-cisim etkileşme matris elemanlarını içermektedir. $usdb$ matris elemanları,

A=16-40 aralığındaki 77 sd kabuğu çekirdeğine ait taban durum ve düşük uyarılmış durum enerjilerinden oluşan 608 deneysel enerji değerinin ele alınarak fit edilmesinden elde edilmiştir. *Sdnn* seti ise, en yenileri olan *usdb* setinin, yapay zeka ile bir miktar iyileştirilmesi ile türetilmiştir. *Usdb* matris elemanları, gizli katman nöron sayısı 8 olan yapay sinir ağlarına girdi olarak verilmiş ve *sdnn*, ağız çıktıları olarak elde edilerek üretilmiştir [24]. Görüldüğü gibi, deneysel değerlere en yakın değerler, *usdb* ve *sdnn* kullanılarak elde edilmiştir.

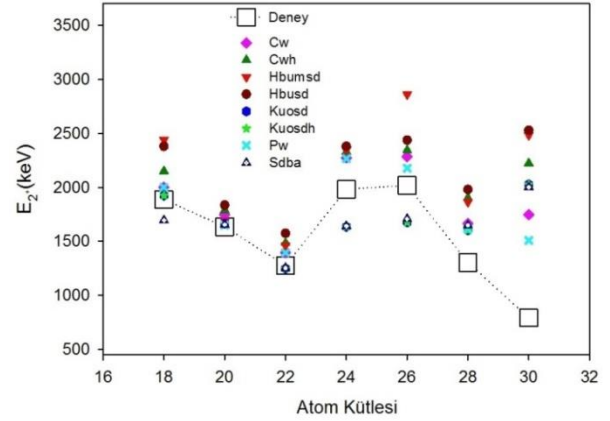
Buna göre, deneysel enerji değerlerinden sapmaların ortalama mutlak değerleri *usdb*, *sdnn*, *usda* ve *w* matris eleman setleri için sırasıyla, 161,56; 161,63; 192,67 ve 270,47 keV olarak elde edilmiştir. ^{18}Ne 'den ^{28}Ne 'ye kadar teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın iken, ^{28}Ne ve ^{30}Ne izotopları için teorik sonuçların deneyselden biraz uzaklaştığı görülmektedir. Bu ayrışma, özellikle 2^+ seviyesinde daha fazladır. Ek olarak, literatürde mevcut olan deneysel verilerden birkaçı, tam kesinlikle belirlenememiştir. Bunlar, ^{26}Ne ve ^{28}Ne için 4^+ seviyeleri ile ^{30}Ne için hem 2^+ hem 4^+ seviyeleridir. Bu çalışmada, tüm matris eleman setleri ile yapılan hesaplamaların yakın sonuçlar vermesi nedeniyle, ^{26}Ne ve ^{28}Ne için literatürde mevcut olan kesin olmayan sonuçlar desteklenmiştir. ^{30}Ne için 4^+ seviyesi literatürdeki deneysel değerine yakın olarak hesaplanmasına karşın, bu izotopun 2^+ seviyesi için elde edilen tüm sonuçlar deneysel değerden oldukça uzaktır [30]. Bu çekirdek, standart olmayan özellikler gösteren ve nötron damlama çizgisine oldukça yakın yerleşmiş inversiyon adası olarak adlandırılan bölgede yer alan bir çekirdektir [31].



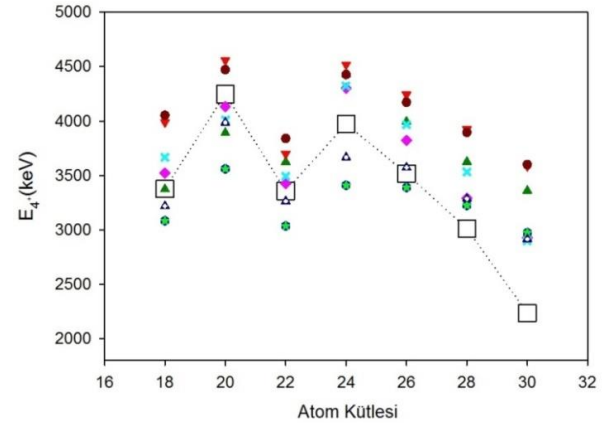
Şekil 2. Çift-çift Ne izotopları için *usd* tipi matris elemanları kullanılarak SM hesaplamalarından elde edilen ve deneysel 2^+ ve 4^+ enerji seviyeleri

Şekil 3 ve 4'de, Ne çekirdeklerinin ilk 2^+ ve 4^+ enerji seviyeleri, diğer matris eleman setleri için deneysel değerlerle birlikte gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, bu setler kullanılarak elde edilen enerji değerleri, *usd* tipli setlere göre deneysel değerlerden daha uzaktır. Buna göre, deneysel enerji değerlerinden sapmaların ortalama mutlak değerleri *cw*, *cwh*, *hbmsd*, *hbusd*, *kuosd*, *kuosdh*, *pw* ve *sdba* matris eleman setleri için sırasıyla, 292,67; 516,00;

618,40; 628,60; 376,00; 415,67; 316,07 ve 299,07 keV olarak elde edilmiştir. Bu sapmalar içinde *usd* tipli setlerin sapmalarına ve deneysel değerlere en yakın olanı, *sdba* seti olup en büyük sapma vereni ise, *hbusd* setidir. Yine ^{30}Ne izotopu için teorik sonuçların deneyselden oldukça uzak olduğu görülmektedir.



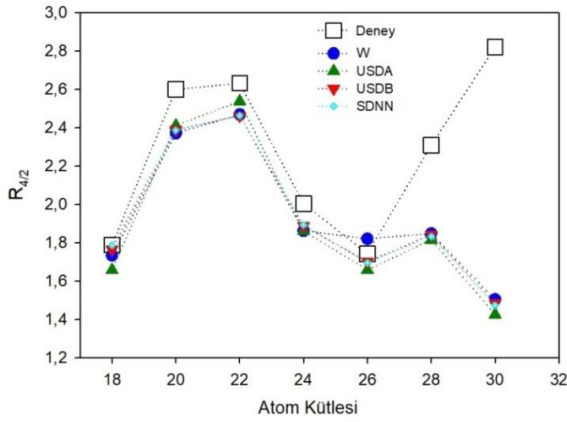
Şekil 3. Çift-çift Ne izotopları için diğer matris elemanları kullanılarak SM hesaplamalarından elde edilen ve deneysel 2^+ enerji seviyeleri



Şekil 4. Çift-çift Ne izotopları için diğer matris elemanları kullanılarak SM hesaplamalarından elde edilen ve deneysel 4^+ enerji seviyeleri

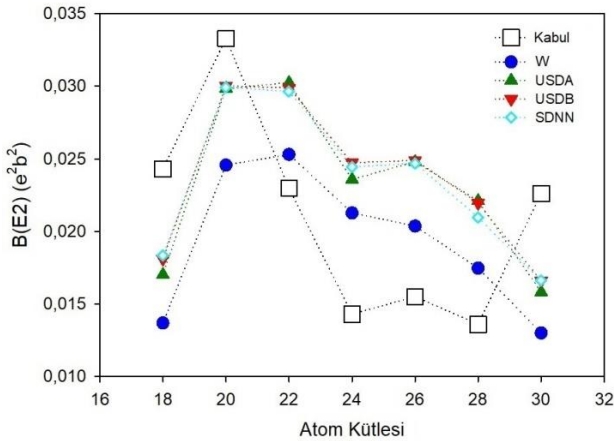
2^+ ve 4^+ enerji seviye değerlerinin birbirlerine oranları ($R_{4/2}$), çekirdeğin deformasyonu hakkında bilgi veren bir değerdir. Buna göre, $R_{4/2}$ oranının 2,00'dan küçük olması çekirdeğin kolektif yapıda olmadığına, 2,00 civarında olması küresel titreşici olduğuna, 2,50 civarında olması geçişken olduğuna ve 3,33 civarında olması da katı-rotor olduğuna işaret eder. Şekil 5'den görüldüğü gibi, ^{18}Ne ve ^{26}Ne 'nin kolektif yapıda olmadığı görülmektedir. ^{20}Ne ve ^{22}Ne geçişken ve ^{24}Ne küresel titreşici olup, deneysel değerler ile teori birbiriyle uyum içerisinde. ^{28}Ne ve ^{30}Ne için ise, elde edilen teorik sonuçların, deneysel değerlerden uzak olduğu görülmektedir. Deneysel değerlere göre bu izotoplar geçişken karakterli izotoplardır. Oysa *usd* tipli matris eleman setleri ile yapılan teorik hesaplamalar sonucunda bunların küresel titreşici oldukları ya da kolektif yapıda olmadıkları görülmüştür. Diğer matris eleman setlerinden *kuosd*, 2,26

değeri ile, ^{28}Ne izotopu için deneysel olan 2,31 değerine en yakın sonucu vermiştir. ^{30}Ne izotopu için ise, 2,82 olan deneysel değere en yakın sonucu, 1,92 ile *pw* seti vermiştir.



Şekil 5. Çift-çift Ne izotopları için ilk 2^+ ve 4^+ enerji seviye değerlerinin birbirine oranları

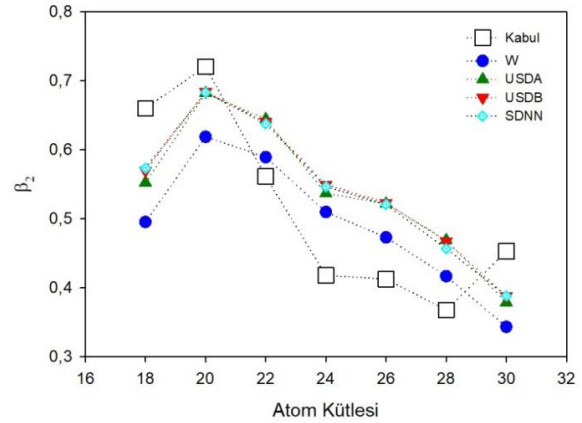
Taban durumdan ilk uyarılmış 2^+ durumuna geçiş olasılığı, indirgenmiş geçiş olasılığı parametresi ($B(E2)$) hesaplanarak verilmiştir. Literatürde teorik ve deneysel sonuçlardan elde edilen pek çok değer kullanılmasıyla elde edilen kabul edilmiş değerler alınarak, kabuk modeli hesaplamalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu değer, çekirdeklerin kolektif davranışlarını görmeye önemli bir niceliktir ve nükleer yapı hakkında bilgi verir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, ^{20}Ne izotopu için $B(E2)$ değerinin yüksek olması, diğerlerine kıyasla biraz daha fazla kolektif davranış gösterdiğine işaret etmektedir [20, 29].



Şekil 6. Çift-çift Ne izotopları için $B(E2)$ değerleri

$B(E2)$ değerlerinden elde edilen kuadrupol deformasyon parametresi (β_2) ise, çekirdek deformasyonunun bir göstergesidir. Bu değer pozitif olması, çekirdeğin şeklinin kutuplardan çekilmiş gibi olduğuna, negatif olması ise kutuplardan basılmış gibi olduğuna işaret eder. β_2 değeri ne kadar büyük ise, bu çekilme ya da basılma da o kadar fazladır. Bu fazlalık ise, çekirdeğin deformasyonunun derecesini gösterir. Şekil 7'den görülebileceği gibi tüm çift-çift Ne izotoplarının β_2 değerlerinin pozitif olması, kutuplardan çekilmiş bir şekilde olduklarına işaret olabilir.

Usda, *usdb* ve *sdbn* matris eleman setleri ile yapılan hesaplamaların birbirlerine yakın oldukları ve ^{18}Ne , ^{20}Ne ve ^{30}Ne çekirdekleri için kabul edilmiş değerlere *w* etkileşme setinden daha yakın olduğu görülmektedir. Diğer Ne çekirdekleri için ise, *w* matris eleman seti ile yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçların kabul edilmiş değerlere [20, 29] daha yakın olduğu görülmektedir. Kabul edilmiş sonuçlara göre, bu izotoplar içinde deformasyonu görece fazla olan ^{20}Ne izotopu olup, literatürle uyumludur. Deformasyonu en az olanlar ise, ^{24}Ne , ^{26}Ne ve ^{28}Ne ve ^{30}Ne izotoplarıdır.



Şekil 7. Çift-çift Ne izotopları için β_2 değerleri

Son olarak, bu çalışmada ilk 6^+ seviye enerjileri de bazı Ne izotopları için hesaplanabildiği görülmüştür. ^{22}Ne izotopu için literatürde mevcut olan değerde kesinlik yoktur ve sadece *usdb* ve *sdbn* matris eleman setleri kullanılarak elde edilebilmiştir. ^{28}Ne için literatürde değer bulunmamasına karşın, *hbmsd* matris eleman seti ile bir değer elde edilebilmiştir. Tablo 1'de, hesaplanabilen ilk 6^+ seviye enerjileri, farklı matris eleman setleri için deneysel değerlerle birlikte verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel ve farklı matris elemanları ile yapılan hesaplamalardan elde edilen ilk 6^+ enerji seviye değerleri

İzotop	İlk uyarılmış 6^+ enerji (keV)						
	Deneysel[28]	<i>cw</i>	<i>cwh</i>	<i>hbmsd</i>	<i>hbusd</i>	<i>kuosd</i>	<i>kuosdh</i>
^{20}Ne	8778	8546	7668	8560	9241	8188	7803
^{22}Ne	6311	-	-	-	-	-	-
^{28}Ne	-	-	-	6806	-	-	-
	<i>pw</i>	<i>sdba</i>	<i>w</i>	<i>usda</i>	<i>usdb</i>	<i>sdbn</i>	
^{20}Ne	8405	8564	8515	8360	8547	8593	
^{22}Ne	-	-	-	-	6244	6163	
^{28}Ne	-	-	-	-	-	-	

4. SONUÇ

Bu çalışmada, *sd* model uzayında ^{16}O öz çekirdeğinin üzerinde bulunan çift-çift Ne çekirdeklerinin nükleer yapılarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, çekirdeklerin ilk uyarılmış seviye enerjileri, bu enerjilerin birbirlerine oranları, seviyeler arasındaki geçiş olasılıkları ve deformasyon parametreleri incelenmiştir. Nötron sayısının sihirli olduğu ^{18}Ne çekirdeği için, ilk uyarılmış seviye enerjisinin beklendiği gibi fazla olduğu görülmüştür. ^{20}Ne ve

^{22}Ne çekirdekleri için bu uyarılma enerjisi düşmekte ve sonra ^{24}Ne ve ^{26}Ne çekirdekleri için tekrar yükselmektedir. Bunun sebebi bu çekirdekler için sırasıyla $d_{5/2}$ ve $s_{1/2}$ yörüngelerinin tam dolu hale gelmiş olmasıdır. ^{30}Ne izotopu için ise $d_{3/2}$ yörüngesi tam dolu hale gelerek, kabuğun kapanmasına neden olacaktır. Bu nedenle, bu çekirdek için de ilk uyarılmış durumun enerjisinin yükselmesi beklenir. Bu çalışmada yaptığımız teorik hesaplamalarda bu yükselmeyi görmemize rağmen, literatürde mevcut ama kesin olarak belirlenmemiş olan deneysel verilere göre, bu artış gözlenmemektedir. Ancak, bu izotopun ilk uyarılmış enerjisinin bu derece düşük olması, küresel şekilde olması yerine oldukça deforme bir çekirdek olduğuna işaret eder. Bu çekirdek, standart olmayan özellikler gösteren ve nötron damlama çizgisine oldukça yakın yerleşmiş inversiyon adası olarak adlandırılan bölgede yer alan bir çekirdektir. Bu nedenle, bu çalışmada yapılan hesapların, standart olmayan bu bölge çekirdekleri açıklanamaması normaldir. Çekirdek deformasyonları incelendiğinde ise, ^{18}Ne için deformasyonun düşük olması, beklendiği gibi hesaplanmıştır. Yine beklendiği üzere, ardından gelen ^{20}Ne ve ^{22}Ne çekirdeklerinde deformasyonun, ^{18}Ne izotopuna göre yüksek olduğu gözlenmiştir. ^{24}Ne ve ^{26}Ne için yine yörüngelerin dolması nedeniyle deformasyonun büyüklüğü azalmıştır. Deformasyon için literatürdeki kabul edilmiş verilerin davranışları incelendiğinde ise, sihirli sayıda nötron sahip olmasına rağmen, ^{30}Ne izotopu için deformasyonun büyüdüğü görülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] A. Bohr A., B.R. Mottelson, Nuclear Structure Vol. 1. New York: W.A. Benjamin, 1969.
- [2] I. Talmi, I, "55 years of the shell model: a challenge to nuclear many-body theory", Int. J. Mod. Phys. E, vol. 14, pp. 821-844, 2005.
- [3] E. Caurier, et al., "The shell model as a unified view of nuclear structure", Rev. Mod. Phys., vol. 77, pp. 427-488, 2005.
- [4] B.A. Brown, "The Nuclear Shell Model Towards the Drip Lines", Prog. Part. Nucl. Phys., vol. 47, pp. 517-599, 2001.
- [5] K.L.G. Heyde, The Nuclear Shell Model, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.
- [6] M.G. Mayer, "On Closed Shells in Nuclei", Phys. Rev., vol. 74, pp. 235-236, 1948.
- [7] M.G. Mayer, "On Closed Shells in Nuclei. II", Phys. Rev., vol. 75, pp. 1969-1970, 1949.
- [8] D. Steppenbeck, et al., "Evidence for a new nuclear 'magic number' from the level structure of ^{54}Ca ", Nature, vol. 502, pp. 207, 2013.
- [9] N. Shimizu, "Nuclear shell-model code for massive parallel computation, KSHELL", arXiv:1310.5431 [nucl-th], 2013.
- [10] http://peiluan-tai.com/physics/shell_model.html (Erişim zamanı; Nisan, 10, 2020).
- [11] I. Talmi, "Fifty Years of the Shell Model — The Quest for the Effective Interaction", Advances in Nuclear Physics, vol. 27, pp. 1-275, 2003.
- [12] O. Haxel, et al., "On the "Magic Numbers" in Nuclear Structure". Phys. Rev., vol. 75, pp. 1766-1766, 1949.
- [13] M.G. Mayer, "Nuclear Configurations in the Spin-Orbit Coupling Model. I. Empirical Evidence", Phys. Rev., vol. 78, pp. 16-21, 1950.
- [14] D.J. Deana, et al., "Effective interactions and the nuclear shell-model", Progress in Particle and Nuclear Physics vol. 53, pp. 419–500, 2004.
- [15] Oxbash for Windows, B. A. Brown, et al., MSU_NSCL report number 1289, 2004.
- [16] ANTOINE, http://www.iphc.cnrs.fr/nutheo/code_antoin_e/menu.html (Erişim zamanı; Nisan, 10, 2020).
- [17] B.A. Brown, W.D.M. Rae, "The Shell-Model Code NuShellX@MSU", Nucl. Data Sheets, vol. 120, pp. 115-118, 2014.
- [18] C.W. Jhonson, et al., "BIGSTICK: A flexible configuration-interaction shell-model code", arXiv:1801.08432v1 [physics.comp-ph], 2018.
- [19] REDSTICK, <http://www.phys.lsu.edu/faculty/cjohnson/redstick.html> (Erişim zamanı; Nisan, 10, 2020).
- [20] S. Raman, et al., "Transition probability from the ground to the first-excited 2+ state of even-even nuclides", Atomic Data and Nuclear Data Tables, vol. 78, pp. 1-128, 2001.
- [21] W. Chung, Ph. D. thesis, Michigan State Univ., 1976.
- [22] B.A. Brown, et al., "Semi-empirical effective interactions for the 1s-0d shell", Ann. Phys. Vol. 182, pp. 191-236, 1988.
- [23] B. M. Preedom and B. H. Wildenthal, "Shell-Model Calculations for ^{22}Na and ^{22}Ne ", Phys. Rev. C, vol. 6, pp. 1633-1644, 1972.
- [24] S. Akkoyun, et al., "Improvement Studies of an Effective Interaction for $N=Z$ sd-shell Nuclei by Neural Networks", arXiv:2001.08561v1 [nucl-th], 2020.
- [25] B.H. Wildenthal, "Empirical strengths of spin operators in nuclei", Progress in Particle and Nuclear Physics, vol. 11, pp. 5-51, 1984.
- [26] B. A. Brown and B. H. Wildenthal, "Status of the Nuclear Shell model", Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. Vol. 38, pp. 29-66, 1988.
- [27] B.A. Brown and W.A. Richter, "New "USD" Hamiltonians for the sd shell", Phys. Rev. C, vol. 74, pp. 034315, 2006.
- [28] Kinsey, R. R., et al., The NUDAT/PCNUDAT Program for Nuclear Data, paper submitted to the 9th International Symposium of Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Budapest, Hungary, October 1996. Data extracted from the NUDAT database, 2.8 (Nisan, 01, 2020).
- [29] B. Pritychenko, et al., "B(E2) Evaluation for $0_1^+ \rightarrow 2_1^+$ Transitions in Even-Even Nuclei", Nuclear Data Sheets, vol. 120, pp. 112-114, 2014.
- [30] Y. Yanagisawa, et al., "The first excited state of ^{30}Ne studied by proton inelastic scattering in reversed kinematics", Physics Letters B, vol. 566, pp. 84–89, 2003.
- [31] E. K. Warburton, et al., "Mass systematics for $A=29-44$ nuclei: The deformed $A\sim 32$ region", Phys Rev C, vol. 41, pp. 1147-1166, 1990.