

⁵⁵Mn İzotopunun Fotonükleer Tesir Kesitleri Üzerinde Kollektif Nükleer Seviye Yoğunluğunun Etkisi

Bora CANBULA*¹

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye

(Alınış / Received: 30.10.2019, Kabul / Accepted: 06.03.2020, Online Yayınlanma / Published Online: 20.04.2020)

Anahtar Kelimeler

Fotonükleer reaksiyon,
Tesir kesiti,
Kollektif nükleer seviye
yoğunluğu,
TALYS

Özet: ⁵⁵Mn izotopunun (γ, n), ($\gamma, 2n$) ve ($\gamma, 3n$) fotonükleer reaksiyonlarının tesir kesitleri eşik enerjisinden 37 MeV'e kadar TALYS 1.95 bilgisayar kodu kullanılarak hesaplandı. Elde edilen teorik sonuçlar reaksiyonların deneysel verileri ile karşılaştırıldı. Hesaplamalarda, kollektif nükleer seviye yoğunluğu modeli (CSCFGM-Collective semi-classical Fermi gas model) bilgisayar programında opsiyonel bir girdi olarak dahil edildi ve kollektif etkilerin (rotasyonel ve vibrasyonel) fotonükleer tesir kesitleri üzerindeki etkisi araştırıldı. Sonuçlar incelendiğinde, kollektif yarı-klasik nükleer seviye yoğunluğu modelinin bu reaksiyonların tesir kesiti hesaplamalarında güvenilir bir araç olarak kullanılabilirliği gösterildi. Ayrıca, dev dipol rezonansın baskın olduğu 30 MeV gama enerjisi altında gerçekleşen reaksiyonlarda kollektif katkıları içeren nükleer seviye yoğunluğu fonksiyonunun etkisi analiz edildi.

Collective Nuclear Level Density Effect On Photonuclear Cross Section of ⁵⁵Mn Isotope

Keywords

Photonuclear reaction,
Cross section,
Collective nuclear level
density,
TALYS

Abstract: The cross sections of (γ, n), ($\gamma, 2n$) and ($\gamma, 3n$) photonuclear reactions of ⁵⁵Mn isotope were calculated by using TALYS 1.95 computer code from threshold energy to 37 MeV. Obtained theoretical results were compared with the experimental data. In the calculations, collective nuclear level density was included as an optional input in the computer code and the influence of the collective effects (rotational and vibrational) was investigated. As seen from the results, collective semi-classical nuclear level density model can be used as a reliable tool to calculate the cross sections of photonuclear reactions. Also, the effect of nuclear level density function which includes collective contributions was analyzed below 30 MeV gamma energy dominated by giant dipole resonance for these reactions.

1. Giriş

Fotonükleer reaksiyonların tesir kesitleri uygulamalı ve teorik nükleer fizik alanında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Düşük reaksiyon enerjilerinde özellikle 30 MeV altındaki enerjilerde, dev dipol rezonansı (GDR) gibi yüksek kollektif uyarma modlarının oluşumu ve daha sonra bozunmasıyla devam eden bir süreçte sahip olan fotonükleer reaksiyonlar, çekirdeklerin hem bireysel hemde sistematik özelliklerine duyarlılık gösterirler. 1950'li yıllarda başlayan fotonükleer reaksiyon çalışmaları ile yüzlerce çekirdek için reaksiyon tesir kesiti ölçümlerinin deneysel verileri erişime açık bir veritabanında toplanmıştır [1]. Fotonükleer reaksiyon verileri astrofiziksel nükleosentez, radyasyondan korunma ve tasarımı, radyoterapideki radyasyon doz durumları, nötron üretimi, aktivasyon analizi gibi teorik ve uygulamalı bilimsel araştırma

alanlarında da büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, mono-izotropik bir element olan ⁵⁵Mn'in fotonükleer tesir kesitleri eşik enerjisinden 37 MeV gama enerjisine kadar yarı-klasik kollektif nükleer seviye yoğunluğu modeli [2] kullanılarak hesaplandı. ⁵⁵Mn izotopunun (γ, n), ($\gamma, 2n$) ve ($\gamma, 3n$) reaksiyonlarının tesir kesiti ölçümleri ilk kez 1979 yılında Alvarez vd. tarafından [3] eşik enerjisinden 36.5 MeV'e kadar yapılmıştır. Ölçümlerde hızlı pozitron demetlerinin anihilasyonundan elde edilen monoenerjetik foton demetleri radyasyon kaynağı olarak kullanılmıştır. Daha sonra, ⁵⁵Mn izotopunun fotonükleer tesir kesitleri ¹⁶²Er izotopunun fotonükleer reaksiyon tesir kesiti ölçümlerinde kullanılmak üzere, gama ışınım şiddet fonksiyonları kullanılarak analiz edilmiştir [4].

Yaklaşık 70 yıllık bir geçmişe sahip olan fotonükleer reaksiyon tesir kesitlerinin deneysel ölçümlerinde,

doğadaki monoenerjik foton yoğunluğu tam olarak bilinemediğinden çekirdek ve foton arasındaki etkileşimde zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle, bu tip reaksiyonların tesir kesiti analizlerinin yapılacağı teorik çalışmalar oldukça önemlidir. Çünkü, fotonükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin iyi olarak analiz edilmesi onların daha geniş enerji aralıklarına genişletilebilmesine, deneysel verisi olmayan reaksiyonlarda tahmin yapılmasına ve kullanım alanlarının artmasına imkan sağlar.

Orta ve ağır çekirdekler için, istatistiksel yaklaşımın [5] fotonükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin tanımlanması için en uygun yöntem olduğu kabul edilir. Bu yöntemin kullanıldığı TALYS [6], EMPIRE [7] veya ALICE/ASH [8] gibi genel amaçlı hesaplama paketleri, bu tür hesaplamaları gerçekleştirmeye olanak sağlar. Bu çalışmada, hesaplamalar TALYS 1.95 bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalarda kullanılan önemli girdilerden bir tanesi nükleer seviye yoğunluğudur. Çalışma grubumuz tarafından ortaya konmuş olan kolektif yarı-klasik nükleer seviye yoğunluğu modeli (CSCFGM) TALYS bilgisayar programına opsiyonel bir girdi olarak dahil edilerek fotonükleer tesir kesitleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Önceki çalışmalarımızda, lityum izotopunun elastik ve inelastik saçılma tesir kesitleri [9] ve alüminyum hedef çekirdeğinin döteronlarla bombardımanı sonucu oluşan reaksiyonların tesir kesitleri [10] yarı-klasik nükleer seviye yoğunluğu modeli kullanarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırıldığında bu reaksiyonlar üzerinde hem modelimizin açıklamadaki başarısı hem de nükleer seviye yoğunluğunun göz önüne alınması gereken bir hesaplama girdisi olduğu görülmüştür. Bu çalışmada amaç, fotonükleer reaksiyonlar üzerinde nükleer seviye yoğunluğunun etkili olduğunu ve kolektif etkileri içeren modelimizin bu tip reaksiyonların tesir kesiti verilerini açıklamada başarılı olabileceğini göstermektir. Bu bağlamda, çalışmamız 2. bölümde materyal ve yöntem, 3. bölümde bulgular ve tartışma ve 4. bölüm de sonuçlar ile sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kolektif yarı-klasik nükleer seviye yoğunluğu (CSCFGM)

Nükleer seviye yoğunluğu, sonsuz küçük enerji aralığında bulunan uyarılmış enerji seviyelerinin sayısına karşılık gelmektedir. Bu enerji seviyeleri düşük uyarılma enerjilerinde gözle ayırt edilip sayılabilirken artan uyarılma enerjilerinde sıklaşır ve sürekli bir fonksiyon haline gelirler. Bu durumda, çekirdeğin uyarılmış seviyelerini belirlemek için bir fonksiyona ihtiyaç vardır ve kullanılan bu fonksiyon nükleer seviye yoğunluğudur. Nükleer astrofizikte [11], medikal fizikte [12] ve özellikle nükleer reaksiyonların tesir kesiti hesaplamalarında önemli

bir girdidir. İlk ve en basit nükleer seviye yoğunluğu modeli Fermi gaz modelidir ve 1936 yılında Bethe [13] tarafından ortaya konmuştur. Bu modele göre, nükleonlar birbirleri ile etkileşmezler, tek-parçacık enerji seviyelerine eşit boşluklar ile yerleşirler ve kolektif seviyeleri yoktur. Uyarılma enerjisine bağlı toplam seviye yoğunluğu fonksiyonu,

$$\rho^{top}(U) = \frac{1}{12\sqrt{2}\sigma} \frac{\exp[2\sqrt{aU}]}{a^{1/4}U^{5/4}} \quad (1)$$

ile verilir. Burada, U uyarılma enerjisi, σ^2 spin eşik parametresi ve a nükleer seviye yoğunluğunun temel değişkeni olan nükleer seviye yoğunluğu parametresidir. a seviye yoğunluğu parametresi U uyarılma enerjisine bağlıdır. Bu bağımlılık genellikle Ignatyuk vd. [14] tarafından ortaya konmuş olan

$$a(U) = \tilde{a} \left(1 + \delta W \frac{1 - \exp[-\gamma U]}{U} \right) \quad (2)$$

formülasyonu ile verilir. Burada \tilde{a} asimptotik seviye yoğunluğu parametresi, δW mikroskopik düzeltme terimi ve γ sönüm parametresidir. \tilde{a} , a seviye yoğunluğu parametresinin nötron ayrılma enerjisinin üzerindeki yüksek enerjilerde gittiği limit değeridir. γ sönüm parametresi, a seviye yoğunluğu parametresinin \tilde{a} limit değerine ne kadar hızlı gideceğini belirleyen değerdir. Bu formülasyon düşük enerjilerde başarılı ancak yüksek enerjilerde bir diverjans problemi ile karşı karşıya kalır. Bu problemin sonraki yıllarda çözülmesinden [15,16] sonra bu formülasyon da tesir kesiti hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Ancak bu formülasyon ile birlikte hesaplamalara dahil edilen kolektif etkilerin sonuca sonradan dahil edilmesi bu etkilerin varlığını istenilen oranda yansıtamamıştır [2,17]. Kolektif etkiler

$$\rho(U) = K_{rot} K_{vib} \rho^{top}(U) \quad (3)$$

şeklinde hesaplamalara dahil edilmiştir. Burada K_{rot} ve K_{vib} sırasıyla rotasyonel ve vibrasyonel iyileştirme faktörleridir. Fermi gaz modelini temel alan ve kolektif etkileri en temelden yani nükleer seviye yoğunluğu parametresinin içine dahil eden nükleer seviye yoğunluğu modeli (CSCFGM) [2] geçtiğimiz yıllarda ortaya konmuştur. Bu modele göre, seviye yoğunluğu parametresinin uyarılma enerjisine bağlı değişimi bir Laplace dağılım davranışı sergiler ve bu davranışın formülasyon şekli

$$a(U) = \tilde{a} \left(1 + A_c \frac{S_n \exp(-|U - E_0|/\sigma_c'^3)}{\sigma_c'^3} \right) \quad (4)$$

ile verilir. Burada, A_c kolektif şiddet olarak adlandırılır ve kritik sıcaklıktaki şekil bağımlı kabuk düzeltme enerjisi olarak tanımlanır. S_n nötron

ayrılma enerjisi, E_0 ise çift-çift çekirdeklerin 2+ seviyelerinin uyarılma enerjilerine karşılık gelir.

$$E_0 = 0.2 \hbar\omega \quad (5)$$

Burada $\hbar\omega = 41/A^{1/3}$ MeV dir.

$$A_c = [M_{den} - (M_0 + E\theta^2)] \frac{\tau_c}{\sinh \tau_c} \quad (6)$$

M_{den} çekirdeğin deneysel kütlesi, M_0 karşılık gelen küresel çekirdeğin kütlesi, E fissilite (ayrılma, bölünme) parametresi ile ilişkili bir katsayı, θ deformasyon büyüklüğü ve $\tau_c = 2\pi^2 T_c / \hbar\omega$ formülü ile T_c nükleer sıcaklığa bağlı bir parametredir. CSCFGM, kolektif etkileri (rotasyonel ve vibrasyonel) kabuk ve çiftlenme etkilerine ek olarak hesaplamalara dahil eder. Ayrıca, ayarlanabilir parametre içermez.

2.2. TALYS bilgisayar kodu

Nükleer reaksiyonların analiz edilmesi için bilinen en iyi bilgisayar kodlarından bir tanesi TALYS'dir [6]. Döteron, proton, gama, triton, alfa, nötron parçacıkları ile bombardımanı sonucu oluşan nükleer reaksiyonların 1 keV'den 1 GeV'e kadar simülasyonunu gerçekleştirebilen bir programdır. Nükleer seviye yoğunluğu fonksiyonu TALYS bilgisayar programında opsiyonel bir girdi olarak kullanılabilir. Bu çalışmada, kolektif yarı-klasik nükleer seviye yoğunluğu modeli (CSCFGM) TALYS programına opsiyonel bir girdi olarak dahil edilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

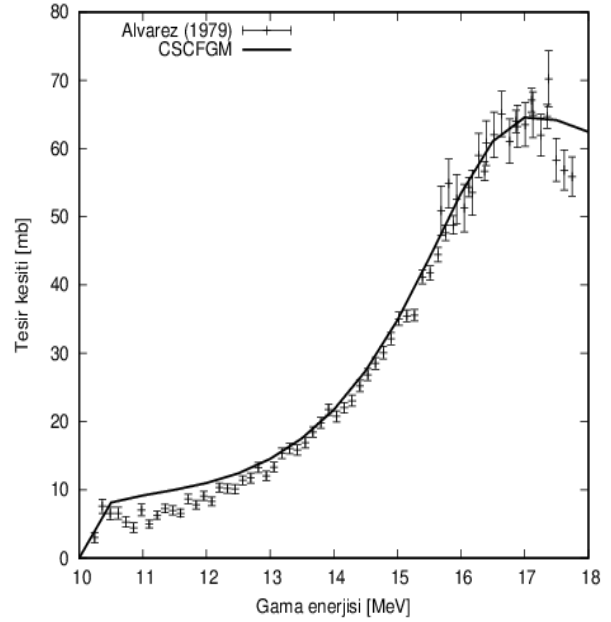
Bu çalışmada, $^{55}\text{Mn}(\gamma, n)^{54}\text{Mn}$, $^{55}\text{Mn}(\gamma, 2n)^{53}\text{Mn}$ ve $^{55}\text{Mn}(\gamma, 3n)^{52}\text{Mn}$ reaksiyonlarının tesir kesitleri kolektif yarı-klasik nükleer seviye yoğunluğu modeli kullanılarak TALYS 1.6 bilgisayar kodu ile hesaplanmıştır. Elde edilen teorik tahminler nükleer reaksiyonların deneysel veri tabanından alınan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Özellikle GDR'nin baskın olduğu bölgelerde fotonükleer reaksiyonların karakteristik yapıları incelenmeye çalışılmıştır.

Tablo 1'de reaksiyonlara ait eşik enerjisi değerleri MeV cinsinden verilmiştir. Eşik enerjisi değerleri incelendiğinde beklendiği üzere nötron çıkışının fazla olduğu reaksiyona doğru artış olduğu görülmektedir. Fotonlar nükleon emisyonu için çekirdeğin bağlanma enerjisinin üzerinde yeterli enerjiye sahip olmalıdırlar. Nükleer bağlanma enerjisi çoğu izotop için 6 MeV'in üzerinde olması nedeniyle fotonlar böyle bir eşik enerjisi değerine sahip olmalıdır.

Tablo 1. Fotonötron eşik enerjileri (MeV cinsinden) [18].

Çekirdek	$E_{eşik}(\gamma, n)$	$E_{eşik}(\gamma, 2n)$	$E_{eşik}(\gamma, 3n)$
⁵⁵ Mn	10.227	19.266	31.220

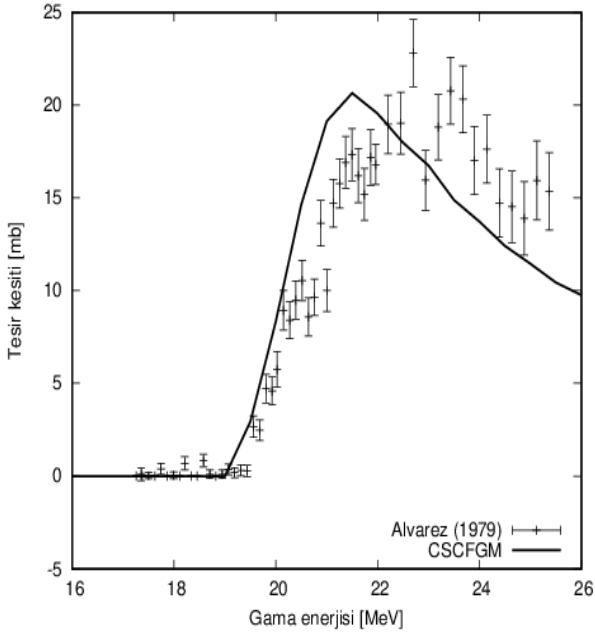
Şekil 1'de $^{55}\text{Mn}(\gamma, n)^{54}\text{Mn}$ reaksiyonunun fotonükleer tesir kesiti hesabının deneysel veriler ile karşılaştırılması sunulmuştur. Reaksiyona ait deneysel veriler oldukça çoktur ve tek bir çalışma grubu [3] tarafından yapılmıştır. Orta ve ağır çekirdekler için tipik olarak beklenen durum, eşik enerjisinden sonra hızlı bir artış ve ardından uyarılmış birleşik sistemin bir karakteristik değeri etrafında merkezlenmiş çok daha fazla kademeli artışların takip etmesidir. Bu karakteristik değer (γ, n) için yaklaşık 2.3 MeV dir [3]. Şekil 1'de 17-18 MeV aralığında görülen pik GDR'ye karşılık gelmektedir. GDR iki genellikle iki büyük zirveden oluşur ancak bazı durumlarda üst üste binen ince bir yapı ile daha geniş pik durumu gözlenebilir. Yaklaşık 10-18 MeV gama enerjisi aralığında bulunan tesir kesiti değerlerinin CSCFGM ile elde edilen teorik sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Tesir kesitinin genel davranışının açıklanması hedeflenen ilk amaçtır. Bunun yakalanması modelin bu reaksiyon için doğru çalıştığını ve kolektif etkileri içeren nükleer seviye yoğunluğunun hesaplara dahil edilmesi gerektiğinin bir göstergesidir.



Şekil 1. $^{55}\text{Mn}(\gamma, n)^{54}\text{Mn}$ reaksiyonunun CSCFGM ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler [3] ile karşılaştırılması.

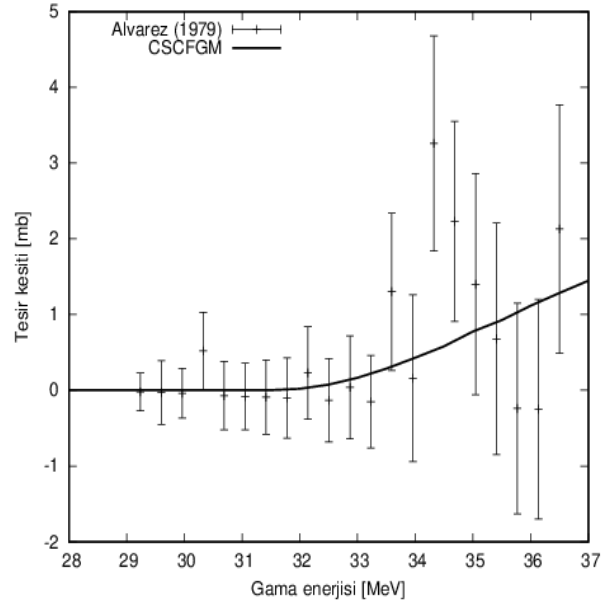
$^{55}\text{Mn}(\gamma, 2n)^{53}\text{Mn}$ reaksiyonunun CSCFGM kullanılarak elde edilen tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması Şekil 2'de verilmiştir. Reaksiyona ait deneysel veriler ilk reaksiyon ile aynı çalışmadan [3] alınmıştır. Fazla sayıda deneysel veri mevcuttur ve verilerin özellikle artan enerjilerde deneysel hata

paylarının arttığı görülmektedir. Tesir kesiti değerleri ise çok küçük değerlerden başlayıp yaklaşık 25 mb'lara kadar ulaşan bir dağılım sergilemektedir. CSCFGM ile elde edilen hesaplama tahminlerinin ise düşük enerjilerden itibaren dağılımın genel davranışını yakaladığı sadece 22 MeV'den sonraki enerjilerde deneysel verilerden uzaklaşma gösterdiği ancak davranışın benzer olduğu görülmektedir. Reaksiyonun, eşik enerjisinden itibaren hızlı bir yükselişe geçtiği ve 23 MeV gama enerjisi civarında dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmalar GDR'ye karşılık gelmektedir ve Şekil 1'deki durumun aksine iki belirgin tepe biçiminde kendini göstermektedir.



Şekil 2. $^{55}\text{Mn}(\gamma,2n)^{53}\text{Mn}$ reaksiyonunun CSCFGM ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler [3] ile karşılaştırılması.

Şekil 3'de $^{55}\text{Mn}(\gamma,3n)^{52}\text{Mn}$ reaksiyonunun hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler [3] ile karşılaştırılması sunulmuştur. Bu reaksiyonda deneysel veri sayısı diğer hesaplamalarda da olduğu gibi fazladır ve tesir kesiti değerleri 28-37 MeV gama enerjisi aralığında ölçülmüştür. Deneysel veriler incelendiğinde değerlerin çok yüksek deneysel hata değerine sahip oldukları ve tesir kesiti değerlerinin bir önceki reaksiyonlara göre çok daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Reaksiyonun eşik enerjisinden sonra tesir kesiti değerlerinin artmaya başladığı 34-35 MeV aralığında tepe noktasına ulaştığı görülmektedir ve bu tepe noktası reaksiyona ait GDR değeridir. GDR'nin kendisi iki ana pikten oluşur ancak burada muhtemelen üst üste binen ince bir yapı ile belirgin tek bir pik gibi görünmektedir. Tesir kesiti değerlerine bakıldığı zaman diğer iki reaksiyona göre çok küçüktür. Bu davranış ağır çekirdekler için alışılmadık bir durumdur ve nadir görülen bir sonuç olarak bu reaksiyonda karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3. $^{55}\text{Mn}(\gamma,3n)^{52}\text{Mn}$ reaksiyonunun CSCFGM ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler [3] ile karşılaştırılması.

4. Tartışma ve Sonuç

^{55}Mn izotopunun fotonükleer tesir kesitleri kolektif yarı-klasik nükleer seviye yoğunluğu modeli kullanılarak TALYS 1.95 bilgisayar kodu ile hesaplandı. Elde edilen teorik sonuçlar her reaksiyon için deneysel veriler ile karşılaştırıldı. Şekiller toplu olarak değerlendirildiğinde, daha fazla nötron ayrımı gerçekleşen reaksiyona doğru gidildikçe reaksiyon eşik enerjilerinin arttığı ve tesir kesiti değerlerinin azaldığı yorumu yapılabilir. Şekillerdeki dikkat çeken piklerin GDR'ye karşılık geldiği ve GDR'lerin beklenen karakteristik özellikleri arasında yer alan ön kısımlarında birkaç zayıf tepe noktalarının görülmesi durumu tüm şekillerde açıkça görülmektedir. Ayrıca, orta ağır çekirdeklerde 15-25 MeV gama enerji bölgesinde meydana gelen pikler reaksiyonlarda protonların baskın olduğu noktaları işaret etmektedir. Daha ağır çekirdeklere gidildikçe bu durumun tersine dönmesi beklenmektedir. Tüm tesir kesitlerinde zayıf bir yapı ortaya çıkmaktadır. Şekiller incelendiğinde, GDR'nin ön kenarlarında oluşan zayıf tepe noktaları bu durumun kanıtıdır. Çalışmanın ana amaçlarından bir tanesi 30 MeV gama enerjisinin altında yani GDR'nin baskın olduğu aralıkta fotonükleer tesir kesitlerine ait olan deneysel verilerin teorik olarak doğru bir şekilde açıklanması ve bu değerler elde edilirken kullanılan fonksiyonların etkili olup olmadığının araştırılmasıydı. Yaptığımız hesaplamalar ve karşılaştırmalar sonucunda görülüyor ki, kolektif etkileri içeren nükleer seviye yoğunluğu ^{55}Mn izotopunun fotonükleer reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamalarında etkin bir role sahiptir ve fotonükleer reaksiyonların tesir kesiti hesaplamalarında göz önüne alınması gereken bir niceliktir.

Kaynakça

- [1] IAEA Nuclear Data Section 2014. Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), <http://www-nds.iaea.org/exfor> (Erişim Tarihi: 10.09.2019).
- [2] Canbula, B., Bulur, R., Canbula, D., Babacan, H. 2014. A Laplace-like Formula for the Energy Dependence of the Nuclear Level Density Parameter. *Nuclear Physics A*, 929, 54-70.
- [3] Alvarez, R. A., Berman, B. L., Faul, D. D., Lewis Jr, F. H., Meyer P. 1979. Photoneutron Cross Sections for ⁵⁵Mn and ⁵⁹Co. *Physical Review C*, 20(1), 128.
- [4] Vagena, E., Stoulos, S. 2017. Average Cross Section Measurement for ¹⁶²Er (γ , n) Reaction Compared with theoretical Calculations Using TALYS. *Nuclear Physics A*, 957, 259-273.
- [5] Hauser, W., Feshbach, H. 1952. The Inelastic Scattering of Neutrons. *Physical Review*, 87(2), 366.
- [6] Koning, A. J., Hilaire S., Duijvestijn, M. C. 2007. TALYS-1.0, International Conference of Nuclear Data Science and Technology, 211-214.
- [7] Herman, M., Capote, R., Carlson, B.V., Oblozinsky, P., Sin M., Trkov, A., Wienke, H., Zerkin, V. 2007. EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation. *Nuclear Data Sheets* 108, 2655-2715.
- [8] Broeders, C. H. M., Konobeyev, A. Y., Korovin, Y. A., Lunev, V. P., Blann, M. 2006. ALICE/ ASH - Pre-Compound and Evaporation Model Code System for Calculation of Excitation Functions, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reactions at Intermediate Energies, Report FZKA 7183. <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7183.pdf> (Erişim Tarihi: 28.08.2019).
- [9] Canbula, B., Canbula, D., Babacan, H. 2015. Analysis of Elastic, Quasielastic, and Inelastic Scattering of Lithium Isotopes on a ²⁸Si Target. *Physical Review C*, 91(4), 044615.
- [10] Canbula, B. 2017. Collective Effects in Deuteron Induced Reactions of Aluminum. *Nuclear Instruments and Methods Section B*, 391, 73-77.
- [11] Rauscher, T., Thielemann, F. K., Kratz, K. L. 1997. Nuclear Level Density and the Determination of Thermonuclear Rates for Astrophysics. *Physical Review C*, 56(3), 1613.
- [12] Okuducu, S., Akti, N., Saraç, H., Bölükdemir, M., Tel, E. 2009. Calculation of Nuclear Level Density Parameters of Some Light Deformed Medical Randonuclides Using Collective Excitation Modes of Observed Nuclear Spectra. *Modern Physics Letters A* 24 (33), 2681-2691.
- [13] Bethe, H. A. 1937. *Nuclear Physics B, Nuclear Dynamics, Theoretical. Reviews of Modern Physics*, 9(2), 69.
- [14] Ignatyuk, A. V., Smirenkin, G., Tishin, A. 1975. Phenomenological Description of Energy Dependence of the Level Density Parameter. *Yadernaya Fizika*, 21(3), 485-490.
- [15] Grossjean, M. K., Feldmeier, H. 1985. Level Density of a Fermi Gas with Pairing Interactions. *Nuclear Physics A*, 444(1), 113-132.
- [16] Demetriou, P., Goriely, S. 2001. Microscopic Nuclear Level Densities for Practical Applications. *Nuclear Physics A*, 695(1-4), 95-108.
- [17] Canbula, B., Babacan, H. 2011. Calculation of the Level Density Parameter Using Semi-Classical Approach. *Nuclear Physics A*, 858(1), 32-47.
- [18] Wapstra, A. H., Bos, K. 1977. The 1977 Atomic Mass Evaluation: in Four Parts Part II. Nuclear-Reaction and Separation Energies. *Atomic Data Nuclear Data Tables*, 19, 215-275.